Research article

Available in: http://jips.ippi.ac.ir

Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian), Vol. 33, No. 3, 271-284 August-September 2020 ISSN: 1016-3255 Online ISSN: 2008-0883 DOI: 10.22063/JIPST.2020.1746

Evaluation of Wettability Alteration and Adsorption of Polymer-Modified Silica Nanoparticles for Enhanced Oil Recovery

Hamid Daneshmand, Masoud Araghchi, Meysam Karimi*, and Masoud Asgary

Materials Science and Engineering Research Center, P.O. Box 37195-1135, Tehran, Iran

Received: 6 April 2020, accepted: 1 July 2020

ABSTRACT

ypothesis: The change in the wetting of rock from hydrophobic to hydrophilic is named "wettability alteration". This is an important factor for enhanced oil recovery (EOR). Because of their unique properties, nanoparticles have attracted much attention for enhanced oil recovery. Despite promising results, the main challenges of using nanoparticles are related to colloidal stability and poor absorption of nanofluids under harsh conditions. In recent years, polymer-grafted nanoparticles have been considered as emerging materials for enhanced oil recovery. Methods: In this study, wettability and absorption of polymer-grafted nanoparticles including silica nanoparticles modified by poly(ethylene glycol) methyl ether (mean molecular weight 2000), silica nanoparticles modified by two polymers: poly(ethylene glycol) methyl ether (mean molecular weights 2000 and 5000) and propyl chains are investigated. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and thermogravimetric analysis (TGA) were used to investigate the chemical bonding and polymer content on the silica surface. Scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), water contact angle measurement, and UV-Vis spectroscopy were also used to study morphology, material composition, wettability, and absorption of the substrate, respectively.

Findings: Best performance for silica nanoparticles modified by polyethylene glycol methyl ether (average molecular weight 5000) and propyl chains at 1000 ppm concentration and salinity range 20000-40000 ppm was obtained. This study shows that silica nanoparticles bonded to different polymers can be considered as an effective and novel approach for enhanced oil recovery.

(*)To whom correspondence should be addressed. E-mail: m.karimi300064@yahoo.com

Please cite this article using:

Daneshmand H., Araghchi, M., Karimi M., and Asgary M., Evaluation of Wettability Alteration and Adsorption of Polymer-Modified Silica Nanoparticles for Enhanced Oil Recovery, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **33**, 271-284, 2020.

Keywords:

wettability, adsorption, silica nanoparticles, surface modification, enhanced oil recovery

* مسئول مكاتبات، پيامنگار: m.karimi300064@yahoo.com

ارزیابی تغییر ترشدگی و جذب نانوذرات سیلیکای اصلاح شده با پلیمر برای ازدیاد برداشت نفت

حميد دانشمند، مسعود عراقچی، ميثم کريمی*، مسعود عسگري

تهران، مرکز تحقیقات علوم و مهندسی مواد، صندوق پستی ۱۱۳۵–۳۷۱۹۵

دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۱۱

فرضیه: تغییر ترشدن سنگ از آبگریز به آبدوست، تغییر ترشدگی نامیده می شود. این موضوع، عامل مهمی در ازدیاد برداشت نفت است. نانوذرات نیز به دلیل خواص منحصر به فرد، توجه زیادی را در زمینه ازدیاد برداشت نفت جلب کردهاند. با وجود نتایج امیدوارکننده، چالش های اصلی استفاده از نانوذرات به پایداری کلوئیدی و جذب ضعیف نانوسیال ها در شرایط سخت مخزن مربوط است. در سال های اخیر نانوذرات پیوند شده به پلیمر به عنوان موادی امید بخش برای ازدیاد برداشت نفت مدنظر گرفته اند.

روشها: در این مطالعه، ترشدگی و جذب نانوذرات پیوندشده به پلیمر شامل نانوذرات سیلیکای اصلاحشده با پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر (میانگین وزن مولکولی ۲۰۰۰) و نانوذرات سیلیکای اصلاحشده با دو پلیمر پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر (میانگین وزن مولکولی ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰) و زنجیرهای پروپیل بررسی شده است. طیفنمایی زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR) و آزمون گرماوزنسنجی (TGA) برای بررسی پیوند شیمیایی و مقدار پلیمر روی سطح سیلیکا بهکار گرفته شدند. از میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM)، طیفنمایی پراش انرژی پرتو X (EDS)، اندازهگیری زاویه تماس با آب و طیفنمایی مرئی-فرابنفش (IV-Vis) نیز بهترتیب برای مطالعه شکل شناسی، ترکیب درصد مواد، ترشدگی و جذب زیرلایهها استفاده شد.

یافتهها: بهترین عملکرد برای نانوذرات سیلیکای اصلاح شده با پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر (میانگین وزن مولکولی ۵۰۰۰) و زنجیرهای پروپیل در غلظت ۱۰۰۰ ppm و محدوده شوری ۴۰۰۰۰ – ۲۰۰۰۰ به دست آمد. این مطالعه نشان داد، نانوذرات سیلیکای پیوند شده به پلیمرهای مختلف را می توان به عنوان راهکاری مؤثر و نو برای ازدیاد برداشت نفت درنظر گرفت.

واژههای کلیدی

ترشدگی، جذب، نانوذرات سیلیکا، اصلاح سطح، ازدیاد برداشت نفت

سال سیوسوم، شماره ۳. صفحه ۲۸۴ - ۲۸۴ ISSN: 1016-3255 Online ISSN: 2008-0883 DOI: 10.22063/JIPST.2020.1746

چکىدە

مجله علوم و تكنولوژى يليمر،

قابل دسترس در نشانی: http://jips.ippi.ac.ir

مقاله پژوهشی

مقدمه

هیدروکربن منبع اصلی انرژی است که بیشترین انرژی مصرفشده در جهان را به خود اختصاص می دهد [۱]. تزریق آب معمولی در مخزنهای نفت به عنوان رایج ترین روش بازیابی ثانویه درنظر گرفته شده است که می تواند یک سوم نفت را از مخزنها استخراج کند [۲]. با توجه به تجدیدناپذیری و محدودبودن این منبع انرژی در سراسر جهان، مطالعه و توسعه روشهای نوین بازیابی نفت باقی مانده از فضای منفذهای سنگ مخزن ضروری است [۳].

روش های مختلفی برای افزایش برداشت مقدار نفت خام وجود دارد که با عنوان ازدیاد برداشت نفت (enhanced oil recovery, EOR) نامیده میشوند. مطالعات EOR بر کاهش تنش سطحی میان آب و نفت [۴]، کنترل گرانروی [۵] و تغییر ترشدگی [۶] سنگهای مخزن متمرکز شده است که عامل های مؤثری در بهبود برداشت هستند. نانوذرات از اصلی ترین موادی هستند که بیشترین توجه را برای اهداف EOR جلب كردهاند [٧]. با توجه به خواص منحصر بهفرد اين ذرات، آنها به منفذهای کوچک سنگهای مخزن نفوذ کرده و قابلیت ترشدگی سنگ را از حالت آبگریز به آبدوست تغییر میدهند [۸]. برخلاف حالت آب گريز، سنگ آبدوست مي تواند نفت ذخيره شده در منفذهای ماتریس سنگ را با جریان آب جایگزین کند که این موضوع موجب افزایش برداشت نفت می شود. افزون بر این، سنگهای بسیار آبدوست قابلیت شایان توجهی برای بررسی در طرحهای ذخیرهسازی گاز کربن (carbon gas storage, CGS) دارند. نانوذرات اکسید فلزی مانند ,ZrO₂ ،Al₂O₃ و SiO و SiO می توانند به تغییرات ترشدگی در فرایند EOR کمک زیادی کنند [۹].

بر اساس مطالعات انجام شده از میان نانوذرات اکسید فلزی، نانوذرات سیلیکا به عنوان مؤثر ترین مواد برای EOR در نظر گرفته شده اند. کاربرد گسترده نانوذرات سیلیکا بیشتر به دلیل تغییر مناسب تر شدگی، دینامیک عالی و خواص رئولوژیکی است [۱۰]. با وجود تغییر تر شدگی در شرایط مخزن شبیه سازی شده، بازده نانوذرات سیلیکا ضعیف است. Al-Anssari و همکاران مطالعه ای درباره تغییر تر شدگی کلسیت آب گریز انجام دادند. آن ها دریافتند، غلظت بهینه نانوذرات سیلیکا در شوری /۸-۳ وزنی، ۳pm ۲۰۰۰۰ است [۷]. با وجود نتایج اولیه، چالش های اصلی استفاده از نانوذرات به پایداری کلوئیدی و جذب ضعیف نانوسیال ها در شرایط سخت مخزن مربوط است [۱۱].

در شرایط ویژه مخزنهای نفتی، مانند شوری زیاد، نیروهای دافع الکتروستاتیک میان نانوذرات کاهش مییابد. در نتیجه، ناپایداری نانوذرات موجب تجمع و تشکیل رسوب و کاهش بازده نانوذرات

در تغییر ترشدگی سنگها می شود. برای برطرف کردن این چالش، توسعه روش های بر پایه افزودن ماده سطح فعال به نانوسیال ها مطالعه شده است [۱۲]. این روش ها دارای محدودیت هایی از جمله غلظت زیاد ماده سطح فعال، تشکیل میسل، کاهش پایداری نانوسیال ها و کاهش کارایی نانوذرات به دلیل پوشانده شدن منفذهای کوچک سنگها به وسیله ماده سطح فعال هستند [۱۳].

گزارش شده است، اصلاح نانوذرات با پلیمرها می تواند عملکرد آنها را در شرایط سخت مخزنهای نفت بهبود دهد [۱۴]. این پلیمرها نه تنها می توانند نانوذرات را با سازوکار دافعه فضایی پایدار کنند، بلکه موجب کاهش کشش سطحی، کنترل گرانروی و تغییر ترشدگی می شوند [۱۵،۱۶]. با توجه به بررسیهای انجام شده، نانوذرات پیوندیافته با پلیمر کمتر مطالعه شدهاند. Jang و همکاران [۱۷] پایداری کلوئیدی سیلیکای اصلاح شده با گلیسیدوکسی پروپیل تری متوکسی سیلان را مطالعه کردند. نتایج نشان داد، این نانوذرات بمانند. تغییرات ترشدگی دولومیت و سنگ آهک نیز مطالعه شد و بمانند. تغییرات ترشدگی دولومیت و سنگ آهک نیز مطالعه شد و بمانند. تغییرات ترشدگی دولومیت و سنگ آهک نیز مطالعه شد و بهدست آمد. Maurya و همکاران [۱۸] از پلی آکریل آمید برای اصلاح سطح نانوذرات سیلیکا استفاده کردند. نتایج نشان داد، این نانوذرات بهدست آمد. می توانند در شوری تا ۲۰۰۱ از پلی آکریل آمید برای اصلاح مطح نانوذرات سیلیکا استفاده کردند. نتایج نشان داد، این نانوذرات بهدست آمد. می می می می نفت و آب را دارند و غلظت بهینه مالیت کاهش زاویه تماس ماسه سنگ ۱۲۰۰۰ ورند و غلظت به ترا

همان طور که گفته شد، تهنشینی نانوذرات یا به عبارت دیگر پایداری کلوئیدی نانوذرات از بزرگترین چالش های این حوزه است. بررسی مراجع نشان داد، استفاده از نانوذرات سیلیکای اصلاح شده با پلیمرها برای فرایند EOR کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در هیچ یک از پژوهش های انجام شده، اثر نوع تر شدگی (آب دوستی و آب گریزی) و وزن مولکولی پلیمرها بر مقدار جذب و تغییرات تر شدگی جاذب بررسی نشده است.

از اینرو در پژوهش حاضر از نانوذرات اصلاح سطحی شده با پلیمرهای آبدوست و آب گریز بهره گرفته شد. با پیوندزدن دو نوع پلیمر با خواص متفاوت یا حتی متنافر می توان خاصیت دووجهی در نانوذره ایجاد کرد تا در محیطهای متفاوت رفتار دلخواه داشته باشد [۱۹]. در کنار سطحهای آب گریز یا هیدروکربن بخشی از نانوذره با پلیمر آب گریز عملکرد مناسب دارد و در محیطهای آبی نیز به دلیل وجود پلیمر آب دوست، نانوذرات به خوبی پایدار می ماند. البته ترکیب این دو نوع پلیمر در اصلاح سطح نانوذره نام برده می تواند خواص جدیدی ایجاد کند. استفاده از پلیمرهای حساس به شرایط محیط و کاشت آنها روی سطحها از موضوعهای جالب برای فناوریهای حمید دانشمند و همکاران

جدید است. پژوهشگران با استفاده از این پلیمرها توانستند نانوذرات حساس به شرایط محیط تولید کنند [۲۰]. ترکیب دو نوع پلیمر این قابلیت را به ذره می دهد که در شرایط متفاوت برای رسیدن به حالت حداقل انرژی و حداکثر آنتروپی ساختارها، رفتارهای متفاوتی نشان دهد [۲۱]. در نتیجه در مطالعه حاضر، سه نوع نانوذره سیلیکای اصلاح شده با پلیمرهای آبدوست و آبگریز بررسی شدند. نوع اول نانوذره اصلاح سطحی شده با پلیمر آبدوست، پلی(اتیلن گلیکول) اصلاح شده ترکیبی از پلیمر آبدوست پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر (میانگین وزن مولکولی ۲۰۰۰) بود. نوع دوم نانوذره (میانگین وزن مولکولی ۲۰۰۰) و عامل آبگریز تریمتوکسیپروپیل سیلان بود. نوع سوم نانوذره اصلاح شده نیز مانند نوع دوم درنظر گرفته شد، با این تفاوت که طول شاخه آبدوست پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر (میانگین وزن مولکولی ۲۰۰۰) آن بزرگتر از نوع دوم بود. از عامل آب گریز با هدف افزایش جذب نانوذرات اصلاح شده روی از عامل آب گریز با هدف افزایش جذب نانوذرات اصلاح شده روی

سنگ ماسه یکی از سنگهای مخزنی است [۲۲]. بهدلیل ناپایداری سنگهای مخزنها در آزمونهای زاویه تماس، از دانه شیشهای بوروسیلیکات برای جایگزینی سنگ ماسه استفاده شد [۷]. دلیل استفاده از دانه شیشهای این است که سنگ مخزن دارای ماهیتی متخلخل است و این دانههای شیشهای میتوانند آن را شبیهسازی کنند. سنگ ماسه بهطور عمده از سیلیکا تشکیل شده است که دانه شیشهای بوروسیلیکات نیز همین گونه است. عامل آبگریزی سنگ مخزن، جذب اسید چرب طی زمان است [۲۳]. بدین منظور از اسید چرب پالمیتیک اسید برای آبگریزکردن دانههای شیشهای ایستفاده شد. در واقع در این پژوهش، اثر حالت ترشدگی زیرلایهها نیز بررسی شد که هدف آن مشخص شدن تفاوت جذب نانوذرات اصلاح سطح شده با پلیمرهای مختلف بود. از اینرو، نحوه اثر بر تغییر زاویه تماس زیرلایه بررسی شد.

یکی از زمینه های جدیدی که امروزه در حوزه پژوهش ازدیاد برداشت نفت مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از نانوذرات اصلاح شده با پلیمرهاست. این مواد حساس به محیط هستند که می توانند نسبت به محیط های مختلف رفتاری ویژه داشته باشند. با توجه به شرایط ویژه محیطی مخزنها، استفاده از این مواد می تواند محدودیت های نانوذرات از جمله ناپایداری کلوئیدی و جذب کم آن ها را روی سنگ مخزن برطرف کند. پژوهش حاضر به منظور طراحی نانوذرات اصلاح شده با پلیمرها و بررسی عملکرد این مواد در تغییر ترشدگی و جذب در شرایط مخزن انجام شده است.

تجربى

مواد

از نانوذرات سیلیکای نامتخلخل (AEROSIL®200) با اندازه ذره اولیه ۱۲ مرای انجام آزمونها استفاده شد. زیرلایه دانه شیشهای (بوروسیلیکات با قطر ۳m۳)، پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر با میانگین وزنهای مولکولی ۲۰۰۰ (PEG1) و ۵۰۰۰ (PEG2) بهعنوان عاملهای آبدوست، گلیسیدوکسیپروپیل تریمتوکسیسیلان ٪۸۸ (GPTMS) برای سیلاندارکردن پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر و تریمتوکسی پروپیل سیلان ٪۹۷ (C3S) بهعنوان عامل آب گریز از Sigma-Aldrich بهکار گرفته شدند. استیک اسید، هگزان نرمال (٪۹۹۹)، سولفوریک اسید (٪۸۹)، هیدروژن پراکسید (٪۰۰) و اتانول (٪۹۹۹) محصول Merck و استونیتریل (٪۹۹۹) و پالمیتیک اسید (٪۹۹)

دستگاهها

از طیفسنج زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR) مدل VERTEX 70v مدل (FTIR) ساخت شرکت Bruker برای بررسی پیوند شیمیایی میان سطح ساخت شرکت Bruker برای بررسی چذب نانوذرات اصلاح شده و سیلیکا و پلیمر، طیفسنج مرئی-فرابنفش (UV-Vis) مدل OR 500 ماخت شرکت HACH برای بررسی جذب نانوذرات اصلاح شده و گرماوزن سنج (TGA) مدل TGA 8000 ساخت شرکت Perkin مدل Elmer برای تعیین مقدار پلیمرهای موجود در سطح سیلیکا استفاده شد. نمودار SEM با سرعت دمای گرمادهی 2°۲۰ در جو نیتروژن از 500 مدل SEM با سرعت دمای گرمادهی 2°۲۰ در جو نیتروژن از عدل. نمودار SEM با سرعت دمای گرمادهی 2°۲۰ در جو نیتروژن از 500 مدل TGA ماخت شرکت SEM با سرعت دمای گرمادهی 2°۲۰ در جو نیتروژن از 500 مدل SEM ساخت شرکت SEM با سرعت دمای گرمادهی 2°۲۰ در جو نیتروژن از 500 مدل SEM با سرعت دمای گرمادهی 2°۲۰ در جو نیتروژن از 500 مدل SEM با سرعت دمای گرمادهی 2°۲۰ در جو نیتروژن از 500 مدل SEM با سرعت شرکت SEM با سرحت شرکت SEM با مدل SEM با مدل SEM ماخت شرکت درسی شکل شناسی، دستگاه اندازه گیری پتانسیل زتای مدل SEM در تای نانوسیالها دستگار گرفته شد.

روشھا

اصلاح نانوذرات سيليكا

گروههای سیلانول، Si-OH، روی سطح نانوذرات سیلیکا می توانند با پلیمرهای استفاده شده برهم کنش داشته باشند. برای ایجاد پیوند شیمیایی میان نانوذرات سیلیکا و پلیمرها، از روش سیلان دارکردن برای عامل دارکردن پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر (PEG1 یا PEG2) استفاده شد تا پلیمرها دارای گروه عاملی سیلانی شوند. مخلوطی از

پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر خشک (۳۰ g)، GPTMS (۴ g) و استیک اسید (۲ mL) بهعنوان کاتالیزگر به ارلن دارای ۱۵۰ محلول استونیتریل منتقل شد. محلول بهدست آمده در ۵°۹۰ با همزدن مداوم بهمدت ۶ h بازروانی شد. بدین ترتیب، پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر عامل دارشده با گروه عاملی سیلانی بهدست آمد.

مقدار mL از C3S به طور مستقیم به محلول آب مقطر دارای ۵٪ وزنی سیلیکا اضافه و بهمدت h همزده شد. برای اصلاح سيليكا با يلى(اتيلن گليكول) متيل اتر، يلى(اتيلن گليكول) متيل اتيل عاملدارشده به محلول آب مقطر دارای سیلیکا (٪۵ وزنی) اضافه و بهمدت h همزده شد. این روش برای اصلاح سیلیکا با پلیمر شامل مخلوط پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر و C3S نیز استفاده شد. در مرحله اول C3S اضافه شد و پس از h ۵ همزدن مداوم، محلول درون دستگاه مرکزگزیز قرار داده شد. سیس، پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر عامل دار اضافه شد. pH محلول با سدیم هیدر کسید روی ۹/۵ و دمای بازروانی C°۸۰ تنظیم شد. در نهایت، از روش مرکز گریزی برای حذف پلیمرها و مواد آلی جذبشده فیزیکی به نانوذرات سیلیکا در محلول بهدست آمده استفاده شد، نانوذرات در اتانول پراکنده و دوباره تحت مرکزگریزی قرار گرفتند [۱۷]. سه نوع سیلیکای اصلاحشده شامل نانوذرات اصلاح شده با PEG1/C3S، PEG1 و PEG2/C3S برای اصلاح زیرلایهها آماده شدند که در ادامه با همین اختصارها بهكار گرفته مي شوند.

اصلاح سطح دانههای شیشهای

پیش از اصلاح سطح با نانوسیالها، دانههای شیشهای به کمک حمام فراصوت درون استون، اتانول و آب مقطر به مدت ۳۰ شسته شده و سپس درون گرمخانه خشک شدند. برای به دست آوردن سطحی آب گریز، دانههای شیشهای درون محلول پیرانا، (مخلوط ۲۰۱ اسید سولفوریک ٪۸۹ و هیدروژن پراکسید ٪۳۰) در دمای ۲۰°۲۵ به مدت و کام ۲۴ قرار گرفتند [۲۴]. از آنجا که محلول پیرانا ترکیبی از مواد اکسنده قوی است، بیشتر مواد آلی زیرلایه را از بین می برد و نیز سطحهای استفاده شده را هیدروکسیل دار کرده و آنها را بسیار آب دوست میکند [۲۵]. سپس، دانههای شیشهای با آب مقطر و اتانول شسته شده و درون گرمخانه خشک شدند. دانههای شیشهای اصلاح شده با شده و در دمای ۲۰°۹ به مدت ۲۴ ابزروانی شدند. سرانجام، دانههای شده ای برانا در محلول است ۲۰ بزرمال هگزان – پالمیتیک اسید غوطهور شیشهای آب گریز با اتانول و آب مقطر شسته شدند تا باقی مانده اسید چرب جذب فیزیکی شده روی سطح دانههای شیشهای حذف شود و

اصلاح سطح زیرلایهها (شیشهای یا شیشهای آب گریز) با نانوذرات سیلیکای اصلاحشده

نانوذرات سیلیکای اصلاحشده با پلیمر ابتدا با همزن مغناطیسی بهمدت min و سیس با حمام فراصوت بهمدت ۳۰ min پراکنده شدند. زیرلایههای آمادهشده (دانههای شیشهای یا دانههای شیشهای آب گریز) در شرایط آزمایشگاه غوطهور شدند. برای آزمون شوری، محلول های آزمون از غلظتهای بهینه نانوذرات اصلاحشده با پلیمر بهصورت درصد وزنى در غلظتهاى مشخص سديم كلريد تهيه شدند. چالش مهم در جذب نانوذرات، جذب بهوسیله گرانش و رسوب است. برای رفع این مشکل، نانوذرات طی اصلاح سطح زیرلایهها به آرامی (۶۰ rpm) همزده شدند. در این آزمون، بستهبندی متراکم و نامنظم دانههای شیشهای در بشر ۲۵ mL تهیه شد. بهدلیل اندازه برابر دانههای شیشهای، تخلخل وابسته به اندازه زیرلایه نیست و تخلخل محیط ساخته شده با دانه های شیشه ای به طور نظری ٪۲۶ است [۲۶]. برای تعیین درصد تخلخل دانههای شیشهای با آب، پس از پرکردن کامل بشر با دانههای شیشهای، آب به آن اضافه شد تا فضاهای خالی میان دانههای شیشهای و بشر پر شود. با تقسیم حجم آب اضافه شده به حجم بشر، درصد تخلخل دانه های شیشهای بهدست آمد. درصد تخلخل برای دانه شیشهای ۲۷٪ و دانه شیشهای آب گریز نزدیک به ٪۲۴ بود. علت درصد تخلخل کمتر می تواند این باشد که بهدلیل ماهیت آبگریز دانههای شیشهای، این ذرات در مجاورت آب بههم نزدیکتر شده که این موضوع سبب کاهش فضای خالی میان آنها میشود. سرانجام، زیرلایههای اصلاحسطحیشده (دانههای شیشهای یا دانههای شیشهای آبگریز) با نانوذرات سیلیکای اصلاحشده با پلیمر بهکمک آب مقطر شسته شده و در شرایط محیط درون گرمخانه خشک شدند تا برای اندازهگیری زاویه تماس استفاده شوند. تمام آزمایشها در شرایط محیط و مخزن انجام شد. در مخزنهای نفتی فشار و دمای زیاد غالب است و فشار و بهویژه دما میتواند بر خواص نانوسیال اثر بگذارد. با وجود این، بهمنظور كاهش عاملهاي مؤثر بر سادهسازي تحليل نتايج، تمام آزمایشها در شرایط محیط انجام شد [۷].

اندازه گیری زاویه تماس با آب و جذب نانوذرات سیلیکای اصلاحشده با پلیمر

از روش زاویه تماس ایستا برای بررسی تغییر ترشدگی زیرلایههای اصلاحشده با نانوذرات استفاده شد. بدین منظور، قطرههای آب مقطر ۳µL -۰/۳ در دو موقعیت مختلف روی حداقل پنج زیرلایه دانه شیشهای ریخته شد و زاویه تماس با نرمافزار ImageJ اندازهگیری شد. میانگین اندازهگیریها بهعنوان زاویه تماس نمونه مطالعهشده درنظر گرفته شد. برای بررسی جذب نانوذرات اصلاحشده روی زیرلایهها، منحنی کالیبرهکردن با طیفسنجی مرئی-فرابنفش (UV-Vis) بهدست آمد. اندازهگیریها با طیفنورسنح UV-Vis در ۴۰۰ nm

$$q(t) = (Ci - Cx) V \times M^{-1}$$
(1)

در این معادله، Ci و Cx به ترتیب غلظت اولیه و نهایی نانوسیالها (mg/L)، V حجم محلول، M مقدار جرم زیرلایه ها و (q(t) مقدار میلی گرم نانوذرات جاذب روی زیرلایه ها (میلی گرم بر گرم شیشه) هستند. در آزمایش ها، V و M به ترتیب T۰ mL و ۲۰ بودند.

نتايج و بحث

شناسایی سیلیکای اصلاحشده با پلیمر به کمک FTIR و TGA

طیفهای FTIR سیلیکا، پلیمرها و سیلیکای اصلاح سطحیشده با پلیمر در شکل ۱ نشان داده شده است. پیک ^۱-۸۸۷ سیلیکا، گروه Si-OH را نشان میدهد. در طیف C3S، پیکهای ظاهرشده در ۷۹۸ و ^۱-۱۲۳۰ مربوط به گروه Si-OL بوده و پیکهای ۱۸۰۸ و ۱۶۰۴ cm^{-۱} نشانگر وجود گروههای Gi-OH و Si-OC هستند. پیکها



شکل ۱- طیفهای FTIR سیلیکا، C3S، GPTMS و PEG،PEG ،GPTMS میا عاملدارشده و سیلیکای پیوندخورده با پلیمر (C3S یا PEG عاملدارشده).

Fig. 1. FTIR spectra of silica, C3S, GPTMS, PEG, functionalized PEG and polymer grafted silica (C3S or functionalized PEG).

در محدوده ^{۱-}۳۰۰۰۰ د۲۸۰۰ بهدلیل گروههای آلیفاتیک زنجیر کربنی است [۲۷]. در طیف سیلیکای اصلاح شده با C3S (شکل ۱) بهجز پیکهای اصلی سیلیکا، دو پیک در ۲۰۰۰ دس۳۰۰۰ ظاهر شد که مربوط به C3S است [۲۸]. وجود این پیکها، واکنش شیمیایی میان C3S و سیلیکا را تأیید کرد.

طیف FTIR ترکیب PEG عامل دار شده با گروه سیلانی (شکل ۱) دو پیک حاصل از حلقه اپوکسی GPTMS را در ۸۹۰ و ۲۰۰۰ -۱۲۵۰ و (شکل ۱) نشان داد. همچنین، پیکهای جدیدی حدود ۱۵۰۰ -۱۲۵۰ و ۱۰۰۰ cm⁻¹ ظاهر شدند که مربوط به PEG است. پیک حدود ۱۰۰۰ cm⁻¹ مربوط به گروههای C-O-C و C-C است. بدین ترتیب، عامل دارشدن پلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر (PEG1 یا PEG2) با گروههای سیلان تأیید شد [۲۵]. همان طور که در شکل ۱ مشخص شده است، پس از اصلاح سیلیکا با PEG عامل دارشده، پیک جدیدی حدود ۲۰۰۰ مربوط است.

با توجه به شباهت پیکهای C3S، PEG1 و PEG2، از روش FTIR برای مطالعه مخلوط پلیمرهای پیوندخورده به سیلیکا نمی توان استفاده کرد. بنابراین، از آزمون TGA برای مطالعه ساختار سیلیکای اصلاح شده با مخلوط پلیمر استفاده شد. منحنی های TGA سیلیکا و سیلیکای اصلاح شده با پلیمرها در شکل ۲ نشان داده شدند. دیده می شود، وزن سیلیکا از ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰ ثابت است. اصلاح نانو ذرات سیلیکا در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، سطح سیلیکا با C3S



شكل ٢- منحنى C3S (a) سيليكا و سيليكاى پيوندخورده با PEG1 (c) ،C3S (b) و C3S (c) و C3S (c) Fig. 2. TGA curve: (a) silica, and silica grafted with (b) C3S, (c) PEG1 and C3S, (d) PEG2 and C3S, and (e) PEG1.

حمید دانشمند و همکاران

در مرحله دوم، سطح نانوذرات سیلیکای اصلاحشده با C3S، به كمك PEG1 يا PEG2 اصلاح شده است. از اينرو، أزمون TGA روی سیلیکای اصلاحشده با C3S در نبود PEG برای تعیین مقدار C3S روی سطح سیلیکا انجام شد. منحنی TGA در شکل ۲ (b)، مقدار C3S را حدود ٪۲ و شکلهای ۲ (c) و (d)، مقدار PEG1 و PEG2 را روی سطح سیلیکای اصلاحشده با C3S بهترتیب تقریباً ۱۱ و ٪۲۱ نشان میدهند. افزون بر این، مقدار PEG1 روی سطح نانوذرات سیلیکا بدون C3S حدود ./۲۳ تخمین زده شد (منحنی e) که مقداری بیشتر از PEG1/C3S و PEG2/C3S است. برای PEG1/C3S بهدلیل وجود C3S روی سطح نانوذرات در اولین مرحله اصلاح سطح، در مقایسه با سیلیکای اصلاحشده با PEG1، مقدار پلیمرها کاهش یافته است. وجود C3S روی سطح سیلیکا موجب افزایش دافعه فضایی و کاهش مقدار PEG1 روی آن شده است. مقدار پلیمر در PEG2/C3S، بیشتر از PEG1/C3S اما تقریباً شبیه به سیلیکای اصلاح شده با PEG1 است. این نتیجه بهدلیل وزن مولکولی بیشتر PEG2 در مقایسه با PEG1 بوده که مقدار PEG2 را روی سطح سیلیکای اصلاحشده با C3S نزدیک به سیلیکای اصلاحشده با PEG1 کرده است. برای سیلیکاهای اصلاحشده، مقدار پلیمرها کمتر از ٪۲۵ بود. مقدار نسبتاً کم پلیمرها روی سطح سیلیکا بهدلیل روش پیوندزنی به (grafting to) بوده که برای تهیه آنها استفاده شده است. با توجه به سازوکار دافعه فضایی زنجیرهای پلیمری، این روش نسبت به پیوندزنی از (grafting from) موجب پيوندخوردن مقدار پليمر كمتري مي شود [٢٩].

بررسي زيرلايهها

در شکل ۳ نتایج آزمونهای SEM، SEM و زاویه تماس (۵) زیرلایه دانه شیشهای و دانه شیشهای آبگریز (اصلاح شده با پالمیتیک اسید) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ (۵)، مقدار زاویه تماس شیشه ۶۲۰ محاسبه شد که پس از اصلاح با اسید چرب، به ۱۱۴۰ افزایش یافت (شکل ۳ (۵)). نتایج آزمون EDS زیرلایه دانه شیشهای، زیرلایه دانه شیشهای اصلاح سطح شده با محلول پیرانا و زیرلایه دانه شیشهای آبگریز اصلاح شده با پالمیتیک اسید در جدول ۱ آمده است. بر اساس نتایج، مقدار کربن موجود در سطح زیرلایه دانه شیشهای اصلاح شده با پالمیتیک اسید در جدول ۱ زیرلایه دانه شیشهای اصلاح شده با یالمیتیک اسید در جدول ۱ زیرلایه دانه شیشهای اصلاح شده با یالمیتیک اسید روی سطح زیرلایه دانه شیشهای به مقدار زیادی جذب شده است. برای بررسی جذب پلیمر و مخلوط پلیمرهای پیوندیافته با نانوذرات سیلیکا، از زیرلایه دانه شیشهای و زیرلایه دانه شیشهای آبگریز استفاده شد.





شکل ۳- نتایج EDS ،SEM و زاویه تماس: (a) دانه شیشهای و (b) دانه شیشهای آب گریز.

Fig. 3. Result of SEM, EDS and contact angle of: (a) glass bead and (b) hydrophobic glass bead.

اثر غلظت نانوسیالها بر ترشدگی و جذب زیرلایهها

برای بهدست آوردن عملکرد مناسب، اثر عاملهای مختلف بر ترشدگی و جذب زیرلایهها بررسی شده است. از آنجا که نانوذرات اثر زیادی بر تغییر ترشدگی و جذب زیرلایهها دارند، انتخاب غلظت مناسب در EOR بسیار مهم است. انتخاب غلظت بهینه بهواسطه ویژگیهایی محدود می شود که برای اثربخشی مناسب نانوذرات ضروری است. غلظت زیاد نانوذرات (> ۲۰۰۰۰ ppm) نفوذپذیری نانوذرات در سنگ مخزن را کاهش می دهد [۱۴]. همچنین، پایداری کلوئیدی نانوذرات با افزایش غلظت آنها به طور چشمگیری کاهش حمید دانشمند و همکا*ر*ان

Г	
ł	by piranha solution, and hydrophobic glass bead (EDS test results).
]	Table 1. Materials on the surface of glass bead, treated glass bead
	محلول پیرانا و دانه شیشهای آبگریز (نتایج آزمون EDS).
ι	جدول ۱- مواد روی سطح دانه شیشهای، دانه شیشهای اصلاحشده با

Element	Glass	Treated glass	Hydrophobic
(wt%)	bead	bead by piranha	glass bead
С	-	-	52.36
Ο	41.21	45.1	18.66
Si	52.09	54.9	28.98
Br	3.66	-	-
Na	3.04	-	-

می باید [۳۰]. افزون بر دلیل های اشاره شده، هزینه های اقتصادی برای استفاده از نانوسیالها نیز باید به حداقل برسد [٧]. بنابراین، رسیدن به كمترين غلظت نانوذرات لازم است تا بيشترين بازده را بر كاهش θ سنگهای مخزن داشته باشد. در جدول ۲ دادههای اثر غلظت نانوسیالها طی مدت ۲ h اصلاح سطح روی ترشدگی و جذب زیرلایه دانه شیشهای و زیرلایه دانه شیشهای آبگریز آمده است. اولیه زیرلایه دانه شیشهای ۶۲° اندازه گیری شد. نتایج نشان داد، θ كمترين غلظت نانوذرات اصلاحشده با بيشترين بازده در كاهش زیرلایه دانه شیشهای، ۳۰۰۰ ppm و PEG1/C3S است. این مقدار می تواند به عنوان غلظت بهینه برای PEG1 و PEG1/C3S درنظر گرفته شود. در این غلظت، θ زیرلایه دانهای شیشهای برای PEG1 و PEG1/C3S بهترتیب ۲۵ و ۲۲ کاهش یافت. برای PEG2/C3S کمترین غلظت این نانوسیالها با بیشترین بازده در کاهش θ (از °۶۲ تا ۲۴° ۲۱ در ۱۰۰۰ pt بهدست آمد. مقدار جذب PEG2/C3S روی زیرلایه دانه شیشهای بیشتر از PEG1 و PEG1/C3S بود. این واقعیت بەدلىل ميانگىن وزن مولكولى بىشتر پلىمر پلى(اتىلن گليكول) اين نانوسیالهاست. انرژی اصلی برای جذب، براساس افزایش آنتروپی در ارتباط با دفع مولکولهای حلال آب برای هر مولکول پلیمری جذب شده است و با افزایش وزن مولکولی پلی(اتیلن گلیکول) می توان این انرژی را افزایش داد [۲۶].

PEG1 آب گریزی زیرلایه دانه شیشهای (θ=۱۱۴[°]) را به حالت میانه PEG2/C3S و PEG2/C3S و PEG2/C3S و PEG2/C3S و PEG2/C3S عملکرد بهتری داشتند و توانستهاند زیرلایه دانه شیشهای آب گریز را به حالت آبدوست (۵۵° برای PEG2/C3S و ۵۴° برای PEG1/C3S) بهترتیب در ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ تغییر دهند. با تغییر زیرلایهها از حالت آبدوست به حالت آب گریز، مقدار جذب برای PEG1 تقریباً

ثابت ماند، در حالی که برای PEG1/C3S و PEG2/C3S افزایش یافت. این موضوع بهدلیل وجود برهمکنش آبگریز-آبگریز میان C3S سیلیکای اصلاح شده با اسید چرب زیرلایه دانه شیشهای است که موجب بازده بیشتر PEG1/C3S و PEG2/C3S شده است. نتایج نشان داد، افزایش غلظت نانوسیالها اثر معنی داری بر کاهش θ دارد. این روند با مطالعات پیشین درباره غلظت نانوذرات سیلیکا روی کلسیت و زیرلایه دانه شیشهای [۱۱،۳۱،۳۲] و جذب سیلیکای اصلاح شده افزون بر این می توان نتیجه گرفت، با افزایش آبگریزی زیرلایهها، می باید. بیشتر سنگهای مخزن به شدت آبگریز هستند و این حالت تر شدگی نه تنها موجب کاهش جذب این نانوذرات نمی شود، بلکه به دلیل افزایش برهمکنش آبگریز-آبگریز می تواند موجب افزایش جذب این نانوسیالها نیز شود.

اثر شوری بر خیسشدن و جذب زیرلایهها

نتایج نشان داد، غلظت بهینه نانوسیالها برای کاهش θ، PEG2/C3S است. برای PEG1 و PEG1/C3S و PEG1 و PEG2/C3S است. این غلظتها برای بررسی اثر شوری بر جذب زیرلایهها انتخاب شدند. شکل ۴ پتانسیل زتای نانوسیالها را نشان میدهد. پتانسیلهای زتا برای غلظت PEG1/C3S بهترتیب PEG1 و PEG1/C3S و PEG2/C3S بهترتیب ۲۶-، ۲۲ و ۳۸ mV-بهدست آمد. پتانسیل زتا به پایداری کلوئیدی نانوسیالها مرتبط بوده و مقدار کم آن نشانگر ناپایداری نانوسیال است. مطالعات اخیر نشان





								Na	unofluid co:	ncentration	(mdd)						
				1000			2000			3000	;	4	1000			5000	
Substrate	Nanoflu	id	θ	٩ م	(t)	θ		q (t)	θ	q (t)		θ		(t)	θ		q (t)
			(°)	(mg	$g_{\rm glass}$	(°)	(n	1g/g _{glass})	(°)	(mg/g _{gl}	ass	(°)	(m	g/g_{glass})	(°)	(m	1g/g _{glass})
-	PEG1	_	80.2±3.6		0.1	74.3±4.4	4	0.5	72.5±2.3	0.7	_	70.3±3.3		0.7	69.3±3.	ω	0.8
Hydrophobic	PEG1/C	3S	70.3±3.3		1.2	60.5±5.∠	4+	1.3	53.7±1.7	1.5		50.8±5.2		1.6	47.9±4.		1.8
glass bead	PEG2/C	2S	55.2±5.1		2	50.8±3.(5	2.2	45.8±2.4	2.7		39.7±4.1		ы	34.5±2.1	2	3.4
	PEG1		36.8±3.4	0	.09	31±3.1		0.5	25±2.2	0.6		23.5±2.4		0.7	22.9±2.	4	0.7
Ulass bead	PEG1/C	3S	30.3±4.2	0	.02	27.5±4.3		0.1	22.1±1.1	0.3		20.5±2.3		0.5	19.9±1.:	5	0.7
		2S	25.2±4.1).5	23.6±5.1		0.9	20.4±1.7	1.4		17.5±2.7		1.6	14.5±3.		2
و PEG1/C3S و	PEG2/C	ppm ،۲۵	ی در ۵°د	اصلاح سط	۲ زمان	آبگریز (h	اً م	ی دانه « ی و دا	امثيثه	برلايەھاي د	ل: (q(t)) بندی: ب	(θ) 	زاويه تما	ت نمک بر .(PEG).	- اثر غلظہ 2/C3S ۱۰	جدول ۳-
ho PEG1/C3S ا $ ho$ Table 3. Effect of at ~ 25°C, 3000 $ ho$	PEG1 Y···· PEG1 Y····	ppm ,۲¢ ntrations nd PEG	یح در C)°C on the o	اصارک سط d 1000 pp	زمان ۲ زمان gle (θ) a m PEG2	h) آبگریز nd adsorp 2/C3S.	یشہای ا	ی و دانه ش (t)) of glas	انه شیشها: ss bead ar	برلايەھاى ، nd hydrop	ij (q(t)	ر جذب باass bead	یں (θ) substr	زاویه تما ates (2 h	ت نیک بر ۱(PEG: surface n	- اثر غلظہ ۱۰ 2/C3S nodificat	جدول ۲۲– ۰۰۰ ppr tion time
ho PEG1/C3S ا $ ho$ Table 3. Effect of at ~ 25°C, 3000 p	PEG1 V···· PEG1 V···· f salt concer ppm PEG1 a	ppm ،۲۵ ntrations nd PEG	یح در C on the o	اصارک سط d 1000 pp	۲ زمان gle (θ) a m PEG2	h) آبگریز nd adsorp 2/C3S.	نیٹہ ای آ tion (q(ی و دانه ش (t)) of glas	انه شیشها: ss bead ar	برلایههای و nd hydrop	hobic g	با جذب باass bead	(θ) س substr	ر زاویه تما ates (2 h	ت نیک بر PEG: surface n	- اثر غلظہ ۷۰ 2/C3S nodificat	جدول ۲- ۰۰۰ ppr tion time
و PEG1/C3S و Table 3. Effect of at ~ 25°C, 3000 p	PEG1 V···· PEG1 V···· salt concer f salt concer ppm PEG1 a Nanofluid	ppm ,Υ¢ nd PEG θ	$^{\circ}C$ $^{\circ}C$ $^{\circ}C$ on the contract on the contract of $1/C3S$, and $1/C3S$, and $1/C3S$ of 00	اصلاح سط ontact ang d 1000 pp	زمان ۲ gle (θ) a m PEG2 q(t)	h) آبگريز nd adsorp 2/C3S. 000	نیٹہ ای آ tion (q(ی و دانه ش (t)) of glas Sal	انه شیشه ; ss bead ar t concentra	بر لا یه های و nd hydrop tion (ppm) 8	رز (q(t) hobic و ا	و جذب (ass bead; 35000	(θ) سی substr	ر زاویه تما ates (2 h ; 4000	ب نیک بر q(t) بر الحال بر المال بر المالمال بر المال بر المال المال بر المال بر مال بر المال بر المالمالمالمالمالمالمالمالمالمالمالمالما	- اثر غلظہ 2/C3S ۱۰ nodificat	جدول ۲- جدول ۲ tion time
و PEG1/C3S و I Table 3. Effect of at ~ 25°C, 3000 μ Substrate	PEG1 V···· PEG1 V····	ppm .Υα ntrations nd PEG θ	$^{\circ}C$, \sim \sim on the \circ 1/C3S, an 1/C3S, an $q(t)^*$	اصلاح سط ontact ang d 1000 pp	زمان ۲ زمان gle (θ) a m PEG2	h) آبگريز nd adsorp 2/C3S. <u>9</u>	ا با	ی و دانه څ (t) of glas <u>Sal</u> (°)	ss bead ar ss bead ar t concentra	برلایههای , nd hydrop tion (ppm) (°)	$\frac{1}{q(t)}$) بن جذب lass bead	(θ) سی substr	ر زاویه تما ates (2 h; 400(θ	ب نیک بر QPEG2. surface n	- اثر غلظہ 2/C3S ۱۰ nodificat 6	جدول ۲۰۰ ppr tion time q(t)
$ PEG1/C3S $ $ J $ Table 3. Effect of at ~ 25°C, 3000 μ Substrate	PEG1 V···· ppm PEG1 a PEG1	ppm ،Υ¢ ntrations nd PEG ⁻ <u>50</u> (°)	on the or 1/C3S, an q(t)*	لحب حکلما ontact ang d 1000 pp 1000 θ (°)	ن ۲ زمان ۲ gle (θ) a m PEG2 q(t)	h) آبگريز nd adsorp 2/C3S. 2/C3S. 000 0 0	ینٹہ ای ا tion (q(q(t)	ی و دانه ش (t)) of glas Sal 250 (°) (°)	انه شیشها; ss bead ar t concentra q(t) 0.87	برلایدهای , nd hydrop tion (ppm) 30000 (°) (°) (°)	رز (q(t) hobic ی q(t)	و جذب (ass bead; 35000 (°)	سی (θ) substr q(t)	ر زاویه تما ates (2 h : 400(69±6.5	ت نیک بر cPEG2. surface n q(t)	- اثر غلظہ 2/C3S ۱۰ nodificat <u>ط</u> 450 (°)	-۲ جدول ۲- tion time q(t) 0.8
$_{\mathfrak{g}}$ PEG1/C3S $_{\mathfrak{g}}$ I Table 3. Effect of at ~ 25°C, 3000 µ Substrate	PEG1 V···	ppm ,Y c nd PEG nd PEG θ $(^{\circ})$ 71.9 ± 3.3 53.8 ± 3.4	on the o 1/C3S, an q(t)*	اصد حکرما ontact ang d 1000 pp d 1000 pp θ θ $(^{\circ})$ 70.1±4.1 53.5±4.6	ن ل ان ۲ gle (θ) a m PEG2 q(t) 0.78	h) نبگريز nd adsorp 2/C3S. 2/C3S. 69.6±4.7 53±4.1	نیٹہ ای ا tion (q(q(t) 0.85	ی و دانه ی (t)) of glas (t) (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c	انه شیشه از ss bead at t concentra q(t) 0.87	بر لایدهای , nd hydrop nd hydrop <u>ition (ppm)</u> 68.7±5.8 57.9±4.9	hobic g q(t)	و جذب (lass bead; lass bead; <u>35000</u> 0 0 0 68±6.1 59.5±5.5	(θ) سی substr substr q(t) q(t) 1.4	ر زاویه تما ates (2 h ; 4000 θ (^ο) 69±6.5 62.1±4.9	ت : نک بر .(PEG2 surface n q(t) 1.3	- اثر غلظہ 2/C3S ۱۰ nodificat (°) 71±7 62.9±5.9	-۲ جدول -۲ tion time q(t) 08
و PEG1/C3S و Table 3. Effect of at ~ 25°C, 3000 μ Substrate Hydrophobic glass bead	PEG1/C3S	ppm .Υ¢ ntrations nd PEG: <u>50</u> θ (°) 71.9±3.3 53.8±3.4	on the or (C) -> ح (C) -> -> -> -> -> -> -> -> -> -> -> -> ->	اصاد حکامہ ا ontact ang d 1000 pp d 1000 f 0 1000 0 0 1000 0 0 1000 0 0 1000 0 1000 0 53.5±4.6 55±5.2	ن ازمان ۲ gle (θ) a m PEG2 q(t) 1.6	h) آبگريز nd adsorp 2/C3S. 2/C3S. 2/C3S. 69.6±4.7 53±4.1 53±4.1	نیٹہ ای ا tion (q(q(t) 0.85 1.82	ی و دانه ش (t)) of glas (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c)	ss bead ar ss bead ar t concentra q(t) 0.87 1.7	بر لایدهای , nd hydrop nd hydrop <u>30000</u> 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	(q(t)) hobic g q(t) 1.6	و جذب (lass bead; lass bead; 35000 (°) (°) (°) (°) (°) (°) (°) (°) (°) (°)	(θ) سی substr 9 (t) 9 (t) 1.4	ates (2 h ; 4000 θ (°) 69±6.5 62.1±4.9	:) بنک بر cPEG: .(PEG: surface n q(t) 1.3	- اثر غلظہ 2/C3S ۱۰ nodificat <u>450</u> (°) 71±7 62.9±5.9	-۲ جدول ۲ ion time ion time q(t) 0.8 1.2 1.93
و PEG1/C3S و Table 3. Effect of at ~ 25°C, 3000 µ Substrate Hydrophobic glass bead	PEG1 V··· PEG1 PEG1 PEG1/C3S PEG1 PEG1	ppm ، Υ¢ ntrations nd PEG 9 (°) 71.9±3.3 53.8±3.4 55.5±3.1 23.9±2.4	00° C $_{2}$ \gtrsim 1.6° $(1/C3S, an)$	لعب حکرما pontact ang d 1000 pp d 1000 pp θ (°) 70.1 \pm 4.1 53.5 \pm 4.6 55 \pm 5.2 23.2 \pm 3.1	زمان ۲ gle (θ) a m PEG2 q(t) 1.6 2.01	h) نبگريز آ nd adsorp 2000 θ (°) 69.6±4.7 53±4.1 54±4.2 22.2±3.3	نیٹ ای ا tion (q(tion (q(t) q(t) 1.82 2.05	ی و دانه ی د t)) of glas t)) of glas <u>Sal</u> (°) 69.3±6.2 55±5.2 54.3±4.9	انه شيشه ا: ss bead ar ss bead ar t concentra q(t) 1.7 2,07	بر لا یه های ب nd hydrop nd hydrop <u>68.7+5.8</u> 57.9+4.9 53.8+4.1 22+2.2	hobic g q(t) 1.6 1.1	ر جذب (lass bead; 35000 (°) 68±6.1 59.5±5.5 54.2±5.9 22.8±3.1	(θ) سی substr g(t) 1.4 2,01	ates (2 h ; θ θ θ θ θ θ θ θ	ت نیک بر ت (PEG2 surface n q(t) 1.3	- اثر غلظہ 2/C3S ۱۰ nodificat nodificat (°) 71±7 62.9±5.9 56.8±6.1 25.5±4.2	-۲ جدول ۲- بن ppm tion time (t) (0.8 (1.2 (1.93)
$ _{g} PEG1/C3S _{g} I $ Table 3. Effect of at ~ 25°C, 3000 µ Substrate Hydrophobic glass bead Glass bead	PEG1 V···· PEG1 V···· pm PEG1 a PEG1/C3S PEG1/C3S	ppm ،Υ¢ ntrations nd PEG: <u>50</u> θ (°) 71.9±3.3 53.8±3.4 55.5±3.1 23.9±2.4	on the or q(t)* 1.6 0.95 0.83	احساد حکرما ontact ang d 1000 pp d 1000 θ (°) 70.1 \pm 4.1 53.5 \pm 4.6 55 \pm 5.2 23.2 \pm 3.1 21 \pm 2.2	ن ۲ زمان ۲ m PEG2 0.78 1.6 2.01 0.98	h) نيگريز nd adsorp 2000 θ (°) 69.6±4.7 53±4.1 53±4.1 53±4.1 22.2±3.3 20±3.1	نیٹہ ای ا tion (q(tion (q(q(t) 1.82 2.05 1.01	ی و دانه ش t)) of glas t)) of glas <u>Sal</u> (°) 69.3±6.2 55±5.2 55±5.2 54.3±4.9 22.2±3.1	ss bead ai ss bead ai t concentra q(t) 1.7 1.7 1.05	یر لایه های ب nd hydrop tion (ppm) 30000 (°) (8.7±5.8 57.9±4.9 53.8±4.1 22±2.2 24±3.1	l; j (q(t) hobic g hobic g 1.6 1.1 1.1	و جذب (او جذب (العند) العند) العن) العند) العند) العند) العمن) العمن) العمن) العمن) العمن) العمن) العم	(θ) محب substr q(t) 1.4 2.01 1.06	ates (2 h; 4000 θ θ θ θ θ θ θ θ	ب جب جب بر .(PEG2) surface n q(t) 1.3 1.98	لی غلظہ - اثر غلظہ 2/C3S \- nodificat 	-۲ جدول ۲ ion time (t) q(t) 0.8 1.2 1.93 0.98

ار زیابی تغییر تر شدگی و جذب نانوذرات سیلیکای اصلاح شده با پلیمر برای از دیاد بر <mark>دا</mark>شت نفت

مجله علمی، علوم و تکنولوژی پلیمر، سال سیوسوم، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۳۹۹

۲۷۹

جدول ۲- اثر غلظت نانوسیالها بر زاویه تماس (θ) و جذب (q(t)) زیرلایههای دانه شیشهای و دانه شیشهای آبگریز (۲ زمان اصلاح سطح در ۲۵°C).

حمید دانشمند و همکاران

PEG2/C3S پايدارتر از ساير نانوذرات اصلاح شده است. دليل پايداري

بيشتر PEG2/C3S غلظت كمتر و نيز ميانگين وزن مولكولي بيشتر

داد، پتانسیل زتای بیش از مقدار مطلق ۲۵ mV می تواند سبب پایداری نانوسیال شود [۳۴]. با توجه به نتایج پتانسیل زتا، نانوسیال



PEG1/C3S و PEG1/C3S PEG1 ۳۰۰۰ ppm (۲۵°C). Fig. 5. Results of SEM, EDS, and contact angle images of treated glass bead and hydrophobic glass bead modified by nanoparticles at 20000 ppm salt concentration (2 h surface modification time at ~25°C, 3000 ppm PEG1 and PEG1/C3S, and 1000 ppm PEG2/C3S).

یلی(اتیلن گلیکول) متیل اتر نسبت به PEG1 و PEG1/C3S است. شوری مخزنهای نفتی اثر مستقیمی بر پایداری نانوسیالهای تزریقی و جذب نانوذرات روی سنگ مخزن دارد [۳۵]. عامل اصلی برای پایداری نانوذرات در حالت تعلیق، نیروهای دافع الکتروستاتیک میان نانوذرات است. در پژوهش ها مشخص شده است، برخی از نمکها نه فقط نیروهای دافعه را کاهش میدهند، بلکه موجب تجمع و رسوبدهی نانوسیالها میشوند [٧]. با وجود این، جالب توجه است که شوری زیاد بهدلیل افزایش برهمکنش های فیزیکی-شیمیایی می تواند سبب افزایش جذب نانوذرات شود [۳۶]. مطابق دادههای جدول ۳، هنگامی که غلظت سدیم کلرید افزایش می یابد، θ برای همه زیرلایهها (دانههای شیشهای یا دانههای شیشهای آبگریز) كاهش مى يابد. اين ممكن است، به جذب افزايش يافته نانوذرات اصلاحشده روی زیرلایهها مربوط باشد [۳۷]. افزایش غلظت سدیم كلريد مي تواند بهدليل كاهش دافعه بارهاي منفى ميان زيرلايه دانه شیشهای و نانوذرات، موجب افزایش جذب و کاهش θ زیرلایهها شود. از سوی دیگر، در غلظت زیاد سدیم کلرید، نیروی دافعه به همان اندازه که در نانوذرات اصلاحشده و زیرلایهها ضعیف میشود، میان نانوذرات نیز کاهش می یابد. این موضوع می تواند موجب کاهش پایداری کلوئیدی نانوسیال و کاهش جذب روی زیرلایه شود. برای اصلاح سطح زیرلایه های دانه شیشه ای با PEG1/C3S، زاویه تماس دانه شیشهای با افزایش غلظت سدیم کلرید به ۲۲۰ ۲۰۰۰ از ۲۲° به °۲۰ کاهش یافت. پس از این مرحله، زاویه تماس در غلظت ۴۰۰۰۰ ppm نسب به ۲۰۰۰۰ افزایش یافت. در نتیجه، محدوده بهینهای (برای PEG1/C3S از PEG1/C3S تا ۹۳ غلظت سديم كلريد بهمنظور كاهش زاويه تماس زيرلايهها وجود دارد. نتایج بهدست آمده با نتایج مطالعات پیشین برای اصلاح سطح

کلسیت به وسیله نانوسیالهای سیلیکا [۷] و نیز ماده سطح فعال مطابقت دارد [۲۹،۳۸].

شکل ۵ نتایج آزمونهای EDS ،SEM و اندازه گیری زاویه تماس زیرلایه دانه شیشهای و نیز زیرلایههای دانه شیشهای آبگریز اصلاحشده با نانوسیالها را در ۲۰۰۰۰ ppm غلظت سدیم کلرید نشان میدهد. شکلهای ۵ (al)، (b1) و (cl) بهترتیب مربوط به زیرلایه دانه شیشهای اصلاح سطحشده با PEG1/C3S ،PEG1 و PEG2/C3S هستند. شکل های ۵ (al) و (b1) ساختار مکعبی شکلی را روی لایه جذب شده نشان میدهند، کلر موجود برای نمونه PEG1 و PEG1/C3S به ترتيب ۲۲/۶۲ و ٪۲۹/۷۹ است (جدول ۴). این نتیجه حاکی از وجود سدیم کلرید در زیرلایه دانه شیشهای است. بهدلیل افزایش برهم کنش فیزیکی-شیمیایی، جذب PEG1 و PEG1/C3S با وجود نمک بهترتیب ۴۰ و ٪۶۳ افزایش یافت [۳۱]. از سوی دیگر، پایداری بیشتر PEG2/C3S موجب کاهش مقدار کلر (٪۰/۶۵) روی زیرلایه دانه شیشهای شد. زیرلایه دانه شیشهای آب گریز اصلاح شده با PEG1/C3S ، PEG1 و PEG2/C3S در شکل ۵ (a2 ، b2 و c2) نشان داده شدند. در شکل ۵ (b2) ساختار مکعبی سدیم کلرید مشخص بوده و کلر در سطح ٪۲۲/۳۹ است. نکته شایان توجه، برخلاف زیرلایه دانه شیشهای، مقدار کلر (٪۱/۴۲) روی سطح زیرلایههای دانه شیشهای آبگریز اصلاحشده با PEG1 کم است. این ممکن است، بهدلیل مقدار بار منفی متفاوت سطح زیرلایه دانه شیشهای و سطح زیرلایه دانه شیشهای آبگریز باشد [۳۹]. پالمیتیک اسید روی سطح شیشه در زیرلایههای دانه شیشهای آبگریز، بار منفی سطح را کاهش میدهد که موجب کاهش برهمکنش های فیزیکی-شیمیایی سطح شیشهای با سدیم و کلر می شود. برای زیرلایه های دانه شیشهای آبگریز در مقایسه با زیرلایه دانه شیشهای، درصد نمک

جدول ۴- مواد روی سطح دانه شیشهای و دانه شیشهای آب گریز اصلاح شده با نانوذرات در غلظت ۲۰۰۰۰ ppm نمک (۲ ۲ زمان اصلاح سطح در ۲۵۰۵، PEG1 ۳۰۰۰ ppm و PEG1/C3S و PEG2/C3S ۱۰۰۰ ppm).

Table 4.	Materials or	the surface	of treated gl	ass bead	and hydro	phobic g	glass bead	modified	by nanopa	articles a	it 20000	ppm salt
concent	ration (2 h su	rface modifie	cation time a	~ 25°C	, 3000 ppn	n PEG1 a	and PEG1	/C3S, and	1000 ppn	n PEG2/0	C3S).	

Element		Glass bead		Нус	drophobic glass be	ead
(wt%)	PEG1	PEG1/C3S	PEG2/C3S	PEG1	PEG1/C3S	PEG2/C3S
С	-	-	44.71	68.54	62.18	47.07
0	33.96	9	30.34	17.43	2.73	30.68
Si	27.46	21.18	22.91	10.04	-	20.28
Na	15.96	20.09	1.39	2.58	12.69	1.63
Cl	22.61	49.73	0.65	1.42	22.39	0.34

برای PEG1/C3S ،PEG1 و PEG2/C3S بهترتیب ۹۴، ۴۵ و ٪۴۸ كاهش يافت. اين نتيجه نشان مىدهد، بار سطحى عامل مهمى براى جذب زیرلایهها با وجود نمک است. برای PEG2/C3S، مقدار کلر در زیرلایه دانه شیشهای آبگریز (٪/۳۴، کلر) نزدیک به زیرلایه دانه شیشهای (٪/۹۵/ کلر) بود. این نتیجه بسیار مهم است، زیرا شوری موجود در مخزنهای نفتی میتواند فرایند جذب را تحت تأثیر قرار دهد. در نانوذرات اصلاح شده با مخلوط پلیمرها (PEG2/C3S)، شوری اثر کمتری بر سازوکار و مقدار جذب داشته است. این بهدلیل یایداری زیاد کلوئیدی این نانوسیال در مقایسه با سایر است. اگرچه، پایداری زیاد میتواند جذب را کاهش دهد، زنجیرهای آبگریز C3S موجب برهمکنش آبگریز-آبگریز شده و در نتیجه جذب نانوسیالها را افزایش میدهند. بهطور کلی، انتخاب پلیمرها با وزن مولکولی و خاصیت ترشدگی مناسب می تواند ثبات کلوئیدی و جذب را برای نانوذرات اصلاحشده با پلیمرها همزمان افزایش دهد. مهم است، نقش جذب و رسوب در کاهش زاویه تماس زیرلایهها نشان داده شود. در پژوهش حاضر با وجود شوری، جذب PEG2/C3S روی دانه شیشهای و دانههای شیشهای آبگریز دلیل اصلی کاهش زاویه تماس بود. برخلاف PEG2/C3S، برای PEG1 و بهویژه PEG1/C3S، رسوب نقش مهمی در کاهش زاویه تماس و جذب زیرلایههای دانه شیشهای و دانه شیشهای آبگریز دارد.

نتيجه گيري

استفاده از نانوذرات اصلاحشده با مخلوط پليمرها بهعنوان روشي جدید برای افزایش استخراج نفت از سنگهای مخزن درنظر گرفته می شود. در این پژوهش، مطالعه جامع نانوذرات اصلاح شده با پلیمرها بر اساس عامل های مؤثر از جمله غلظت نانوذرات و شوری انجام شد. نتايج نشان داد، جذب نانوذرات اصلاحشده همراه با افزايش غلظت نانوسیال ها افزایش و زاویه تماس کاهش یافت. با افزایش وزن مولكولى يلى (اتيلن گليكول) متيل اتر، نيز جذب نانوسيال روى زير لايه

on Application of Nanoparticles for EOR Purposes: A Critical Review of the Opportunities and Challenges, Chin. J. Chem. Eng., 27, 237-246, 2019.

3. Guo K., Li H., and Yu Z., In-Situ Heavy And Extra-Heavy Oil

مجله علمی، علوم و تکنولوژی پلیمر، سال سیوسوم، شماره ۳، مرداد–شهریور ۱۳۹۹

افزایش یافت. زنجیر آبگریز C3S روی سطح نانوذرات موجب جذب بیشتر نانوسیالها روی زیرلایههای آبگریز شد. زنجیرهای پروپیل برهمکنش آبگریز -آبگریز میان نانو ذرات و زیر لایهها ایجاد می کنند. سازو کار جذب PEG2/C3S روی زیرلایه کمتر تحت تأثیر شوری قرار دارد. اگرچه، جذب PEG1 و بهویژه PEG1/C3S بهدلیل افزایش برهمکنشهای فیزیکی-شیمیایی در مجاورت شوری روی زیرلایه افزایش یافت. بررسی شکل شناسی و ترکیب مواد زیرلایههای با اصلاح سطح بهوسیله PEG1 و PEG1/C3S حاکی از وجود سدیم و كلر در لايه جاذب بود. با توجه به برهمكنش فيزيكي-شيميايي، شوری موجب جذب بیشتر PEG1 و PEG1/C3S شد. همچنین، از لحاظ عملكردى PEG2/C3S بهتر از PEG1 و PEG1/C3S بود. نانوذرات پیوندخورده با مخلوط پلیمرها عملکرد بهتری در مقایسه با نانوذرات پیوندخورده با پلیمر بهویژه در سامانه آبگریز نشان دادند. انتخاب یلیمرها با وزن مولکولی و خاصیت ترشدگی مناسب می تواند ثبات کلوئیدی و جذب را برای نانوذرات اصلاحشده با پلیمرها همزمان افزایش دهد. استفاده از دو نوع پلیمر با خواص متنافر روی سطح نانوذرات در این پژوهش موجب شد، نه فقط پایداری این مواد بهویژه با وجود شوری موجب شود، آبدوستی یلی (اتیلن گلیکول) متیل اتر حفظ شود، بلکه بهدلیل آب گریزی تریمتوکسی پروپیلسیلان، جذب این مواد بهویژه روی زیر لایه آبگریز افزایش یابد. غلظت بهینه نانوسیال PEG2/C3S در محدوده شوری ۴۰۰۰۰ ppm برای کاهش زاویه تماس زیرلایههای دانه شیشه و دانه شیشهای آبگریز بهترتیب از ۶۲° به ۲۳° و ۱۱۴° به ۵۴° بود. نتایج امیدوارکننده پژوهش حاضر نشان داد، این نانوسیال قابلیت مناسب برای کاربرد در فرایندهای عملی در حوزه ازدیاد

حمید دانشمند و همکا*ر*ان

قدردانی

بر داشت نفت را دارد.

از شرکت توسعه و کاربرد فناوری های نو (تکفن) بهدلیل حمایت مالي در انجام اين پژوهش تشكر و قدرداني مي شود.

مراجع

- 1. Alnarabiji M.S. and Husein M.M., Application of Bare Nanoparticle-Based Nanofluids in Enhanced Oil Recovery, Fuel, 267, 117262, 2020.
- 2. Kazemzadeh Y., Shojaei S., Riazi M., and Sharifi M., Review

Recovery: A Review, Fuel, 185, 886-902, 2016.

- Sun Y., Yang D., Shi L., Wu H., Cao Y., and He Y., Properties of Nanofluids and Their Applications in Enhanced Oil Recovery: A Comprehensive Review, *Energ. Fuel.*, 34, 1202-1218, 2020.
- Li Z., Xu D., Yuan Y., Wu H., Hou J., and Kang W., Advances of Spontaneous Emulsification and Its Important Applications in Enhanced Oil Recovery Process, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 277, 102119, 2020.
- Liu F. and Wang M., Review of Low Salinity Waterflooding Mechanisms: Wettability Alteration and Its Impact on Oil Recovery, *Fuel*, 267, 117112, 2020.
- Al-Anssari S., Barifcani A., Wang S., Maxim L., and Iglauer S., Wettability Alteration of Oil-Wet Carbonate by Silica Nanofluid, *J. Colloid Interface Sci.*, 461, 435-442, 2016.
- Zargartalebi M., Kharrat R., and Barati N., Enhancement of Surfactant Flooding Performance by the Use of Silica Nanoparticles, *Fuel*, 143, 21-27, 2015.
- Ehtesabi H., Ahadian M.M., Taghikhani V., and Ghazanfari M. H., Enhanced Heavy Oil Recovery in Sandstone Cores Using TiO, Nanofluids, *Energ. Fuel.*, 28, 423-430, 2014.
- Hendraningrat L. and Torsæter O., Metal Oxide-Based Nanoparticles: Revealing Their Potential to Enhance Oil Recovery in Different Wettability Systems, *Appl. Nanosci.*, 5, 181-199, 2015.
- Ranka M., Brown P., and Hatton T.A., Responsive Stabilization of Nanoparticles for Extreme Salinity and High-temperature Reservoir Applications, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7, 19651-19658, 2015.
- 12. Israelachvili J.N., *Intermolecular and Surface Forces*, Academic, 2011.
- Songolzadeh R. and Moghadasi J., Stabilizing Silica Nanoparticles in High Saline Water by Using Ionic Surfactants for Wettability Alteration Application, *Colloid. Polym. Sci.*, 295, 145-155, 2017.
- 14. Hendraningrat L., Shidong L., and Torsaeter O., A Glass Micromodel Experimental Study of Hydrophilic Nanoparticles Retention for EOR Project, SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, Moscow, 16-18 October, 2012.
- Rabiee A., Langroudi A. E., Jamshidi H., and Gilani M., Preparation and Characterization of Hybrid Nanocomposite of Polyacrylamide/Silica-Nanoparticles, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, 25, 406-414, 2013.

- ShamsiJazeyi H., Miller C.A., Wong M.S., Tour J.M., and Verduzco R., Polymer-coated Nanoparticles for Enhanced Oil Recovery, J. Appl. Polym. Sci., 131, 40576, 2014.
- Jang H., Lee W., and Lee J., Nanoparticle Dispersion with Surface-Modified Silica Nanoparticles and Its Effect on the Wettability Alteration of Carbonate Rocks, *Colloid. Surf., A: Physicochem. Eng. Asp.*, **554**, 261-271, 2018.
- Maurya N.K., Kushwaha P., and Mandal A., Studies on Interfacial and Rheological Properties of Water Soluble Polymer Grafted Nanoparticle for Application in Enhanced Oil Recovery, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **70**, 319-330, 2017.
- Ershad L.A. and Azadi N., Effects of Adding Nanosilica on Acrylic and Siloxane Hydrophobic Coatings to Protect Calcite Stones, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 15-29, 2019.
- Zhang Z., Maji S., da Fonseca Antunes A.B., De Rycke R., Hoogenboom R., and De Geest B.G., Salt-Driven Deposition of Thermoresponsive Polymer-Coated Metal Nanoparticles on Solid Substrates, *Angew. Chem. Int. Ed. Eng.*, **128**, 7202-7206, 2016.
- Riley J.K., Matyjaszewski K., and Tilton R.D., Electrostatically Controlled Swelling and Adsorption of Polyelectrolyte Brushgrafted Nanoparticles to the Solid/Liquid Interface, *Langmuir*, 30, 4056-4065, 2014.
- Banat I.M., Biosurfactants Production and Possible Uses in Microbial Enhanced Oil Recovery and Oil Pollution Remediation: A Review, *Bioresour. Technol.*, **51**, 1-12, 1995.
- Bodratti A.M., Sarkar B., and Alexandridis P., Adsorption of Poly(ethylene oxide)-Containing Amphiphilic Polymers on Solid-Liquid Interfaces: Fundamentals and Applications, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 244, 132-163, 2017.
- Behzadi A. and Mohammadi A., Environmentally Responsive Surface-Modified Silica Nanoparticles for Enhanced Oil Recovery, J. Nanopart Res., 18, 266, 2016.
- Arslan G., Özmen M., Gündüz B., Zhang X., and Ersöz M., Surface Modification of Glass Beads with an Aminosilane Monolayer, *Turk. J. Chem.*, **30**, 203-210, 2006.
- Mader-Arndt K., Kutelova Z., Fuchs R., Meyer J., Staedler T., Hintz W., and Tomas J., Single Particle Contact Versus Particle Packing Behavior: Model Based Analysis of Chemically Modified Glass Particles, *Granul. Matter.*, 16, 359-375, 2014.
- Roustaei A.and Bagherzadeh H., Experimental Investigation of SiO₂ Nanoparticles on Enhanced Oil Recovery of Carbonate Reservoirs, *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, **5**, 27-33, 2015.

مجله علمی، علوم و تکنولوژی پلیمر، سال سیوسوم، شماره ۳، مرداد–شهریور ۱۳۹۹

- Rostami M., Mohseni M., and Ranjbar Z., Investigating the Effect of pH on the Surface Chemistry of an Amino Silane Treated Nano Silica, *Pigm. Resin Technol.*, 40, 363-373, 2011.
- Rubio N., Au H., Leese H.S., Hu S., Clancy A.J., and Shaffer M.S., Grafting from Versus Grafting to Approaches for the Functionalization of Graphene Nanoplatelets with Poly(methyl methacrylate), *Macromolecules*, **50**, 7070-7079, 2017.
- Al-Anssari S., Wang S., Barifcani A., Lebedev M., and Iglauer S., Effect of Temperature and SiO₂ Nanoparticle Size on Wettability Alteration of Oil-Wet Calcite, *Fuel*, **206**, 34-42, 2017.
- Munshi A., Singh V., Kumar M., and Singh J., Effect of Nanoparticle Size on Sessile Droplet Contact Angle, *J. Appl. Phys.*, **103**, 084315, 2008.
- Nikolov A., Kondiparty K., and Wasan D., Nanoparticle Selfstructuring in a Nanofluid Film Spreading on a Solid Surface, *Langmuir*, 26, 7665-7670, 2010.
- Omurlu C., Pham H., and Nguyen Q., Interaction of Surface-Modified Silica Nanoparticles with Clay Minerals, *Appl. Nanosci.*, 6, 1167-1173, 2016.
- 34. Mondragon R., Julia J.E., Barba A., and Jarque J.C.,

Characterization of Silica–Water Nanofluids Dispersed with an Ultrasound Probe: A Study of Their Physical Properties and Stability, *Powder Technol.*, **224**, 138-146, 2012.

- 35. Parfitt R. and Greenland D., The Adsorption of Poly(ethylene glycols) on Clay Minerals, *Clay Miner.*, **8**, 305-315, 1970.
- Cheraghian G. and Hendraningrat L., A Review on Applications of Nanotechnology in the Enhanced Oil Recovery Part B: Effects of Nanoparticles on Flooding, *Int. Nano Lett.*, 6, 1-10, 2016.
- Salager J.L., Marquez N., Graciaa A., and Lachaise J., Partitioning of Ethoxylated Octylphenol Surfactants in Microemulsion–Oil– Water Systems: Influence of Temperature and Relation between Partitioning Coefficient and Physicochemical Formulation, *Langmuir*, 16, 5534-5539, 2000.
- Iglauer S., Wu Y., Shuler P., Tang Y., and Goddard III W.A., Alkyl Polyglycoside Surfactant–Alcohol Cosolvent Formulations for Improved Oil Recovery, *Colloid. Surf., A: Physicochem. Eng. Asp.*, 339, 48-59, 2009.
- Watson H., Norström A., Torrkulla Å., and Rosenholm J., Aqueous Amino Silane Modification of E-Glass Surfaces, J. Colloid Interface Sci., 238, 136-146, 2001.