

Polymerization
Quarterly, 2025
Volume 15, Number 3
Pages 43-52
ISSN: 2252-0449

Applications of Viscoelastic Nanocomposite Hydrogels in the Petroleum Engineering

Zeynab Toraby, Fatemeh Sepahvand, and Pedram Manafi*

Department of Polymer Engineering, Amirkabir University of Technology, Mahshahr
Campus, , P.O. Box 63517-13178, Mahshahr, Iran

Received: 28 April 2025, Accepted: 20 August 2025

Abstract

Recent advances in the design synthesis of polymeric nanocomposites have dramatically expanded their application in oil and gas industry, especially in improving the performance of drilling fluids and wellbore plugging agents. This study is focused on polyacrylamide (PAM)-based nanocomposites, which by reinforcing with various nanoparticles such as nanosilica, copper oxide, nanoclay, exhibit significant improvements in viscosity, mechanical strength, thermal stability, and salt resistance. Adding nanoparticles not only reinforces the molecular network of the polymer but also enhances its performance in difficult conditions of oil wells, including pressure, temperature, and chemical conditions of the well. The utilization of double network hydrogel (DN hydrogel) structures as an innovative strategy for enhancing toughness, compressive resistance, and long-term durability under high-pressure and high-temperature conditions is suggested. The experimental results show that these nanocomposites can reduce filter cake thickness, minimize fluid loss, and offer more controlled rheological behavior, and final stability of polymer. These cases play an important role in maintaining wellbore stability, reducing drilling costs, and increasing the efficiency of repair and maintenance operations. In conclusion, the results of this study show that polyacryl nanocomposites can be used as very effective and durable alternatives of conventional polymers in complex and challenging environments of drilling and oil production.

Key Words

**polyacrylamide,
nanocomposite,
drilling fluid,
temporary blockage,
enhanced oil recovery**

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: pedram_manafi@aut.ac.ir

کاربردهای نانوکامپوزیت‌های هیدروژلی گران‌روکشسان در مهندسی نفت

زینب ترابی، فاطمه سپهوند و پدram منافی*

ماهشهر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۳۱۷۸-۶۳۵۱۷

دریافت: ۱۴۰۴/۲/۸، پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۲۹

پیشرفت‌های اخیر در طراحی و سنتز نانوکامپوزیت‌های پلیمری کاربرد آن‌ها را در صنعت نفت و گاز، به‌ویژه در بهبود عملکرد سیالات حفاری و عوامل انسداد چاه، به طور چشمگیری گسترش داده است. این مطالعه به‌طور خاص بر نانوکامپوزیت‌های برپایه پلی‌آکریل آمید (PAM) متمرکز شده است که با اصلاح به‌وسیله نانوذراتی مانند نانوسیلیکا، مس اکسید، نانورس‌ها و مواردی از این دست، عملکرد شایان توجهی در بهبود خواصی مانند گران‌روی، استحکام مکانیکی، پایداری گرمایی و مقاومت در برابر نمک نشان داده‌اند. افزودن نانوذرات، نه تنها شبکه مولکولی پلیمر را تقویت می‌کند، بلکه عملکرد آن را در شرایط سخت چاه‌های نفتی، شامل فشار، دما و شرایط شیمیایی چاه بهینه می‌سازد. افزون‌براین، استفاده از ساختارهای هیدروژل با شبکه دوگانه (DN hydrogel) به‌عنوان راهکاری نوآورانه برای افزایش چقرمگی، مقاومت فشاری و دوام طولانی‌مدت این نانوکامپوزیت‌ها پیشنهاد شده است. یافته‌های تجربی نشان می‌دهد، به‌کارگیری نانوکامپوزیت‌های برپایه PAM موجب کاهش درخور توجه ضخامت کیک صافی، حداقل‌سازی اتلاف سیال، کنترل بهتر رفتار رئولوژیکی و پایداری نهایی پلیمر می‌شود. این موارد در حفظ پایداری دیواره چاه، کاهش هزینه‌های حفاری و افزایش کارایی عملیات تعمیر و نگهداری چاه نقش بسزایی ایفا می‌کنند. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، نانوکامپوزیت‌های پلی‌آکریل آمید می‌توانند به‌عنوان جایگزین‌های بسیار مؤثر و بادوام مواد سنتی در محیط‌های پیچیده و چالش‌برانگیز حفاری و تولید نفت به‌کار گرفته شوند.

چکیده



زینب ترابی



فاطمه سپهوند



پدram منافی

واژگان کلیدی

پلی‌آکریل آمید،
نانوکامپوزیت،
سیال حفاری،
انسداد موقت،
ازدیاد برداشت نفت

پلی‌آکریل آمید (PAM)، یکی از پلیمرهای سنتزی پرکاربرد در علوم زیستی و مهندسی مواد، تصفیه پساب و مهندسی نفت است که به دلیل ویژگی‌های ساختاری مانند پیوند دوگانه اکسیژن، گروه‌های عاملی متنوع و آب‌دوست، دارای ویژگی‌هایی همچون قابلیت تشکیل ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی، قابلیت جذب آب زیاد، زیست‌سازگاری مطلوب و انعطاف‌پذیری در طراحی ساختارهای ترکیبی را داراست [۱، ۲]. همچنین این پلیمر به طور گسترده در حوزه‌هایی نظیر سیالات حفاری، انسداد موقت چاه‌های نفت و گاز، ازدیاد برداشت و کنترل هرزروی استفاده می‌شود [۳]. با این حال، چالش‌های اساسی مانند ضعف خواص مکانیکی، نقص در پایداری گرمایی و شیمیایی، حساسیت کم به محرک‌های محیطی، استفاده مستقل از PAM را با محدودیت‌هایی مواجه ساخته است [۴].

در دهه اخیر، راهکارهای متعددی برای بهبود این محدودیت‌ها ارائه شده است. یکی از موفق‌ترین آن‌ها، استفاده از نانوذرات به عنوان عامل تقویت‌کننده در ساختار پلی‌آکریل آمید است. افزودن نانوذرات فلزی نظیر نانوذرات نقره (AgNPs)، تیتانیم دی‌اکسید (TiO_2)، روی اکسید (ZnO) و مس اکسید (Cu_2O)، نانوذرات مغناطیسی، نانولوله‌های کربنی (CNTs) [۵] و نانوذرات سلولوزی موجب ارتقای هم‌زمان در پارامترهایی نظیر مدول کشسانی، چقرمگی، مقاومت به پارگی و پایداری شیمیایی شده‌اند [۳، ۶]. علاوه بر افزودن نانوذرات، ساختاردهی پیشرفته‌تری مانند ایجاد هیدروژل‌های با شبکه دوگانه (double network hydrogels) یا سنتز زنجیرهای کوپلیمر نیز می‌توانند در بهبود خواص پلیمر نقش مهمی را ایفا کنند. در این ساختارها، ترکیب PAM با سایر پلیمرها با وجود اتصالات عرضی یونی و کووالانسی به افزایش درخور توجهی در چقرمگی و تحمل در برابر نیروهای مکانیکی منجر می‌شود [۳، ۶]. اگرچه در چاه‌های پر فشار و با دمای زیاد استفاده از عوامل ایجاد اتصال عرضی آلی سبب پایداری بهتری نسبت به عوامل ایجاد اتصال عرضی معدنی می‌شوند. استفاده از نانوذرات فلزی و معدنی در کنار این عوامل موجب می‌شود تا عوامل ایجاد اتصال عرضی شیمیایی بتوانند به عنوان عوامل ایجاد اتصال عرضی یونی عمل کنند و خواص محصول نهایی را بهبود بخشند.

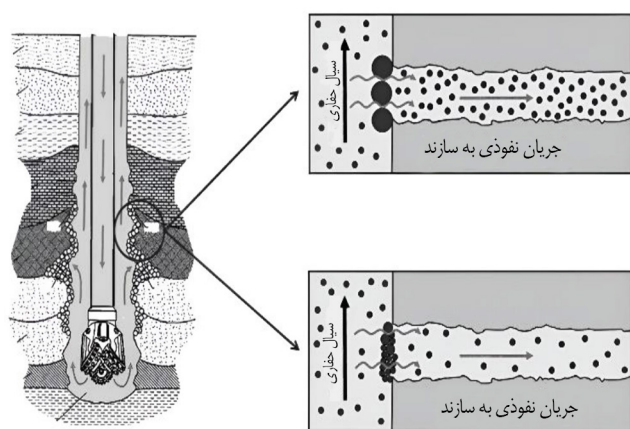
به‌طور کلی، سه روش عمده پلیمرشدن درجا، ترکیب مذاب و ساخت نانوکامپوزیت با روش محلولی برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها وجود دارد. اگرچه پلی‌آکریل آمید را می‌توان با هر سه این روش‌ها کامپوزیت کرد، اما ترکیب مذاب به نسبت دو روش دیگر کاربرد کمتری دارد [۷، ۸].

خواص پلی‌آکریل آمیدها را می‌توان از طریق روش‌های متفاوتی مانند تغییر وزن مولکولی، کنترل چگالی اتصال عرضی، اصلاح زنجیر پلیمری یا استفاده از افزودنی‌ها کنترل کرد، اما در این مطالعه تنها به بررسی تأثیر نانومواد بر خواص نانوکامپوزیت‌های پلیمری پرداخته می‌شود.

سیالات حفاری

سیالات حفاری یا به اصطلاح عامیانه گل حفاری، سیالی غیرنیوتونی با خواص روان‌وردی (thixotropic) کنترل‌شده است که در زمان حفاری، درون چاه در حال گردش بوده و مهم‌ترین وظیفه آن، انتقال کنده‌ها به سطح و پایداری هیدروستاتیکی چاه است [۸، ۹]. افزون‌بر این سیالات حفاری به منظور روان‌سازی و خنک‌کردن مت‌ه حفاری، پاک‌سازی چاه حفرشده، کنترل فشار و بهبود عملکرد رشته حفاری و ابزار در حفره چاه نیز استفاده می‌شوند. شکل ۱، نمایی از عملیات حفاری و نحوه نفوذ سیال به داخل سازند مجاور را نشان می‌دهد. افزون‌بر این در این شکل می‌توان نحوه تشکیل کیک صافی بر دیواره چاه و اثر ضخامت کیک صافی بر عملکرد سیال را به خوبی مشاهده کرد [۹].

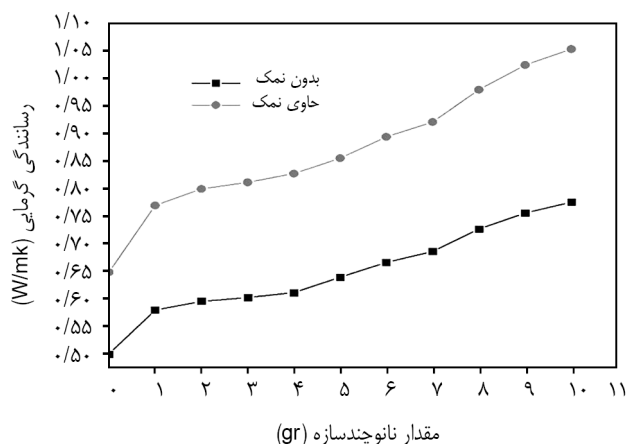
کیک کم‌ضخامت، نفوذپذیری کمتری دارد و مطلوب‌تر است. در این میان، افزودنی‌های پلیمری به تشکیل کیک با ضخامت کمتر و به حداقل رساندن اتلاف سیال، کاهش آسیب سازند و بهبود خواص رئولوژیکی سیالات حفاری آب‌پایه کمک بسزایی می‌کند [۱۰، ۱۱]. پلی‌آکریل آمید (PAM)، به‌ویژه نوع آب‌کافتی آن، به عنوان پلیمر سنتزی پرکاربرد در سیالات حفاری شناخته شده است. پلی‌آکریل آمید با وزن مولکولی زیاد و ساختار زنجیری بلند،



شکل ۱- نمایی از چاه نفت و نحوه تأثیر ضخامت کیک صافی بر قدرت صافش آن [۱۰].

از اندازه گران‌روی می‌تواند خطر آسیب به تجهیزات را افزایش دهد. از این‌رو، باید همواره در محدوده مشخصی باقی بماند یا سیال باید از قابلیت روان‌شوندگی برشی مناسبی برخوردار باشد و با شروع عملیات حفاری، گران‌روی آن تا حد مطلوب کاهش یابد [۱۴]. عامل اساسی و مهم دیگری که در این مطالعه بررسی شد، ضخامت لایه صافی ایجاد شده روی دیواره چاه بود. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، وجود نانوکامپوزیت در ترکیب، میزان ضخامت لایه صافی را تا ۵۵٪ کاهش داده و این مقدار از ۱/۶ mm به کمتر از ۰/۷ mm رسیده است. این بررسی برای مدل‌سازی بهتر، روی سیال حاوی نمک و فاقد نمک انجام گرفت. مشخص شد، وجود یون‌ها در محیط، نه تنها اثر منفی بر خواص صافش ندارد، بلکه باعث عملکرد بهتر سیال نیز می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، از مهم‌ترین وظایف گل حفاری خنک‌کاری مته بوده که عملکرد گل در این‌باره وابسته به میزان رسانندگی گرمایی آن است. عملکرد نانوکامپوزیت سنتز شده در شکل ۳ نشان داده شده است. وجود نانوذرات با ضریب رسانندگی گرمایی زیاد، مانند نانوذرات پایه فلزی اثر مطلوبی بر سرعت انتقال گرما دارد. پژوهش دیگری، نانوکامپوزیت حاوی ۱٪ تیتانیم اکسید تهیه شده و سیالاتی حاوی مقدار متفاوتی از نانوکامپوزیت ساخته شد. سپس، رفتار سیال حاصل از طریق دو مدل رئولوژیکی بینگهام پلاستیک و قانون توانی بررسی شد [۱۵]. نانوذرات تیتانیم اکسید، خواص ضد اکسندگی دارند و از ایجاد خوردگی در تجهیزات و اکسایش زنجیرهای آکریل آمید در محیط چاه جلوگیری می‌کنند و شرایط را برای استفاده طولانی‌مدت تر از سیال ممکن می‌سازند.

مدل بینگهام پلاستیک [۱۶]:



شکل ۳- اثر غلظت نانوکامپوزیت بر رسانندگی گرمایی سیال حفاری [۱۶].

قابلیت ایجاد گران‌روی مناسب حتی در غلظت‌های کم را دارد. با این حال، استفاده از PAM به صورت خالص با محدودیت‌هایی نظیر کاهش پایداری گرمایی، حساسیت به شوری، افت گران‌روی در دماهای زیاد و تمایل به تخریب مکانیکی مواجه است [۱۶]. همه این موارد سبب نیاز به استفاده از افزودنی‌ها و نانوذرات می‌شود. به‌طور کلی از نانوکامپوزیت‌ها به سه منظور در سیالات حفاری استفاده می‌شود [۱۲]:

۱- کنترل رفتار رئولوژیکی سیال حفاری؛

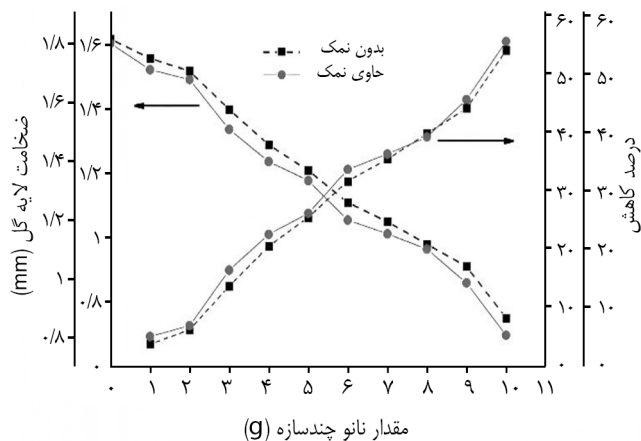
۲- مدیریت ضخامت و استحکام کیک صافی؛

۳- افزایش پایداری سیال در محیط چاه.

نانوذراتی نظیر گرافن اکسید، نانوسیلیکا، روی اکسید، نانولوله‌های کربنی و زئولیت به دلیل داشتن نسبت سطح به حجم زیاد و خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد توانسته‌اند تأثیر در خور توجهی بر ارتقای خواصی مانند پایداری گرمایی، مقاومت در برابر نمک، کاهش افت فشار و بهبود روان‌روی سیالات حفاری داشته باشند [۱۳].

صبوری و همکاران، نانوکامپوزیت پلی‌آکریل آمید حاوی ۱۰٪ نانوذره مس اکسید را تهیه کرده و درصد‌های متفاوتی از این نانوکامپوزیت را به سیال حفاری آب‌پایه اضافه کردند. سپس خواص رئولوژیکی، صافش و گرمایی نهایی سیال را بررسی کردند [۱۱].

همان‌طور که پیش از این قابل‌پیش‌بینی بود، این نانوکامپوزیت نقش گران‌روساز را در ترکیب ایفا کرد و در همان درصد‌های کم، گران‌روی سیال افزایش یافت. نیروهای الکتروستاتیک ایجاد شده به وسیله نانوذرات مس، نقش مضاعفی در افزایش گران‌روی سیال ایفا می‌کنند. پایداری گرمایی زیاد این نانوذرات، امکان حفظ خواص نانوکامپوزیت را در دما و فشارهای زیاد ایجاد می‌کند. باید به این نکته توجه شود که در هنگام طراحی سیال حفاری، افزایش بیش



شکل ۲- اثر غلظت نانوکامپوزیت بر ضخامت کیک صافی [۱۱].

جدول ۱- پارامترهای مدل بینگهام پلاستیک و قانون توانی [۴۴۴۴].

| قانون توانی | | بینگهام پلاستیک | | مقدار نانوکامپوزیت (g) |
|-------------|--------|-----------------|--------|------------------------|
| n | K | PV | YP | |
| ۰/۸۲۲۵ | ۰/۱۷۵۳ | ۰/۰۷۳۹ | ۰/۵۴۰۹ | ۱ |
| ۰/۷۸۴۷ | ۰/۲۴۷۸ | ۰/۰۹۷۷ | ۰/۴۴۳۹ | ۲ |
| ۰/۸۷۵۳ | ۰/۲۲۲۵ | ۰/۱۲۱۸ | ۰/۵۶۷۸ | ۳ |
| ۰/۷۰۷۵ | ۰/۴۴۶۴ | ۰/۱۴۷۶ | ۰/۵۹۳۷ | ۴ |
| ۰/۷۲۶۵ | ۰/۵۴۴۹ | ۰/۱۸۸۶ | ۰/۸۰۴۷ | ۵ |
| ۰/۷۰۶۹ | ۰/۶۱۷۷ | ۰/۲۰۷۷ | ۰/۸۶۹۱ | ۶ |
| ۰/۶۷۲۲ | ۰/۸۶۰۷ | ۰/۲۵۱۲ | ۱/۱۸۹۴ | ۷ |
| ۰/۶۲۲ | ۰/۹۷۵۶ | ۰/۲۷۶۰ | ۱/۰۱۲۱ | ۸ |
| ۰/۶۲۸۶ | ۱/۰۹۴۴ | ۰/۳۲۱۵ | ۱/۱۵۸۱ | ۹ |
| ۰/۵۲۹۳ | ۱/۵۵۸۷ | ۰/۳۸۵۶ | ۱/۲۹۵۸ | ۱۰ |
| ۰/۴۶۵۷ | ۲/۹۰۴۷ | ۰/۹۸۰۷ | ۱/۵۸۶۵ | ۱۴ |

قانون توانی پیش‌بینی شد، با افزایش درصد نانوکامپوزیت در ترکیب، مقدار n نیز کاهش می‌یابد که نشانگر افزایش شدت رفتار روان‌شوندگی برشی در سیالات حاوی مقدار بیشتر نانوکامپوزیت است. این داده‌ها با داده‌های سیال بینگهام پلاستیک تفاوت داشت. در این مطالعه نویسنده ادعا می‌کند، داده‌های مدل قانون توانی با داده‌های تجربی تطابق بیشتری دارد و این مدل رفتار سیال را بهتر توصیف می‌کند. تمام این بررسی‌ها بر سیالی که به مدت ۴ هفته در دمای محیط دچار پیرش شده بود، دوباره انجام گرفت تا عملکرد طولانی‌مدت گل حفاری بررسی شود. مشاهده شد، تمام اعداد کاهش پیدا کرده بودند. این مسئله را می‌توان به شکست زنجیر با وجود یون‌های موجود در محیط یا برهم خوردن توزیع یکسان نانوذرات در ترکیب نسبت داد [۱۵]. این مسیر برای بررسی ضخامت و عملکرد کیک صافی نیز طی شد. خواص سیال حاوی درصد‌های متفاوت نانوکامپوزیت را می‌توان در جدول ۲ مشاهده کرد. در این مطالعه نیز افزایش درصد نانوکامپوزیت در گل حفاری به کاهش ضخامت کیک صافی و افزایش قدرت صافش منجر شده

$$\tau = YP + PV(\gamma) \quad (1)$$

که در آن، YP نقطه تسلیم، PV گرانروی پلاستیک و γ سرعت برش است.

مدل قانون توانی [۱۶]:

$$\tau = K\gamma^n \quad (2)$$

در جدول ۱، پارامترهای مدل بینگهام پلاستیک و قانون توانی درج شده است. ایده‌آل‌ترین حالت در گل حفاری این است که گل در هنگام اعمال تنش یا حرکت مته، کمترین مقدار گرانروی را داشته باشد و گرانروی آن پس از حذف تنش به سرعت افزایش یابد. در ادامه با تشکیل کیک صافی از بازگشت خرده‌های حفاری به داخل چاه جلوگیری کند. در مدل بینگهام پلاستیک رفتار پلیمر بدین صورت پیش‌بینی شد، با افزایش غلظت نانوکامپوزیت در سیال حفاری هم تنش تسلیم و هم گرانروی نهایی افزایش پیدا کرده است که اولی مطلوب و دومی نامطلوب است. اما در مدل

جدول ۲- بررسی اثر نانوکامپوزیت بر ضخامت و عملکرد گل حفاری [۴۴۴۴].

| مقدار نانوکامپوزیت (g) | مقدار هرزروی (mL) | مقدار کاهش هرزروی (%) | ضخامت کیک صافی (mm) | مقدار کاهش ضخامت (%) |
|------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| ۱ | ۵۳ | ۰ | ۱/۵۸ | ۰ |
| ۲ | ۵۲ | ۱/۸۹ | ۱/۵۰ | ۵/۰۶ |
| ۳ | ۵۲ | ۱/۸۹ | ۱/۴۶ | ۷/۵۹ |
| ۴ | ۵۱/۵ | ۲/۸۳ | ۱/۳۴ | ۱۵/۱۹ |
| ۵ | ۵۱ | ۳/۷۷ | ۱/۲۴ | ۲۱/۵۲ |
| ۶ | ۵۰ | ۵/۶۶ | ۱/۱۴ | ۲۷/۸۶ |
| ۷ | ۴۹ | ۷/۵۵ | ۱/۰۸ | ۳۱/۶۵ |
| ۸ | ۴۷ | ۱۱/۳۲ | ۱/۰۰ | ۳۶/۷۱ |
| ۹ | ۴۵ | ۱۵/۰۹ | ۰/۹۰ | ۴۳/۰۴ |
| ۱۰ | ۴۳ | ۱۸/۸۷ | ۰/۸۴ | ۴۶/۸۳ |
| ۱۴ | ۳۹ | ۲۶/۴۱ | ۰/۷۰ | ۵۵/۷۰ |

برحسب تنش و استحکام فشاری آن بررسی شد [۲۳]. به طور معمول هیدروژل‌های با مدول ذخیره بیشتر در این کاربرد عملکرد بهتری نشان می‌دهند. پس از آن، ترکیبات حاوی درصد متفاوتی از نانوکامپوزیت ۱٪ تهیه و بررسی شدند. نتایج نشان داد، عمده تأثیر نانوکامپوزیت بر مدول ذخیره بوده و مدول اتلاف تغییر چندانی نشان نداده است.

ازدیاد برداشت نفت

در روش‌های معمول تولید نفت، تنها حدود ۳۰٪ از نفت موجود در مخزن استخراج می‌شود و برای بازیابی نفت باقی مانده از روش‌های بازیابی تکمیلی استفاده می‌شود. اجرای مؤثر این روش‌ها می‌تواند به بهره‌برداری ۳۰٪ تا ۶۰٪ نفت باقی مانده منجر شود [۲۴]. این روش‌ها به دو دسته گرمایی و غیرگرمایی تقسیم می‌شوند. روش‌های گرمایی مانند تزریق بخار و آب داغ با کاهش گرانی روی نفت، تولید را آسان‌تر می‌کنند. اما به دلیل محدودیت‌هایی مانند عمق مخزن و هزینه‌های زیاد، همیشه قابل استفاده نیستند. در مقابل، روش‌های غیرگرمایی مانند تزریق گاز یا مواد شیمیایی باعث بهبود توزیع جریان و افزایش برداشت نفت می‌شوند [۲۵].

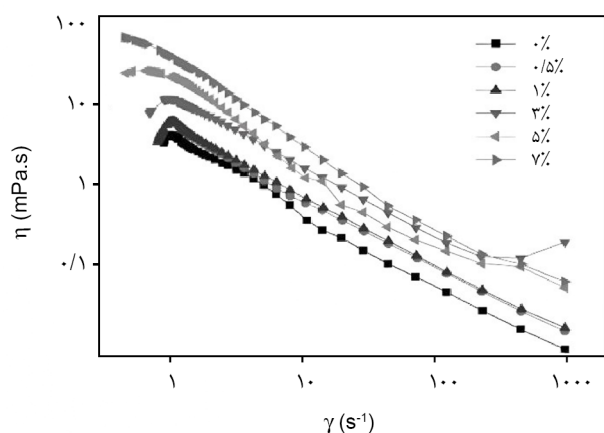
از مشکلات مهم در مخازن قدیمی‌تر، افزایش تولید آب است که نه تنها باعث کاهش بازده برداشت می‌شود، بلکه هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی را نیز افزایش می‌دهد [۴،۵]. برای کنترل این وضعیت، روش‌هایی مانند تزریق سیمان، پلیمر، رزین و سطح فعال استفاده می‌شوند. در این میان، پلیمرها کاربرد گسترده‌تری دارند و به دو شکل سیلاب‌زنی پلیمری و اصلاح به‌کمک ژل پلیمری استفاده می‌شوند [۷]. در حالی که سیلاب‌زنی به نواحی کم‌تراوای اشباع از نفت نفوذ می‌کند، ژل پلیمری با بستن مسیرهای پرتراوا از

است. نکته درخور توجه این است که در سیال دچار پیرش این عملکرد بهتر بوده است [۱۵].

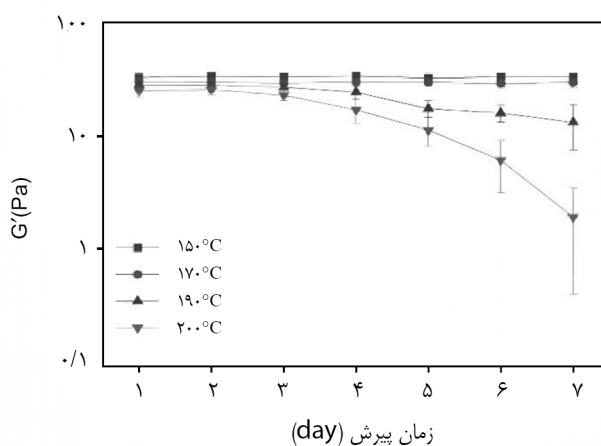
انسداد موقت

چاه‌های تولیدی نفت و گاز پس از آنکه به بهره‌وری رسیدند، بنا به دلایل مختلف نیازمند تعمیر می‌شوند که پیش‌نیاز انجام چنین عملیاتی، انسداد موقت جریان نفتی است [۱۷]. بدین منظور در گذشته از گل‌های حفاری با چگالی زیاد یا محلول‌های چگال نمک‌های معدنی استفاده می‌شد. در این کار، افزون بر هزینه عملیاتی و تجهیزاتی زیاد، تبلور نمک‌های معدنی در محیط سازند، کاهش بهره‌وری شایان توجهی را پس از انجام عملیات تعمیر در پی داشت. طی سال‌های اخیر، ژل‌های پلیمری خودتخریب‌پذیر به منظور انسداد موقت چاه استفاده شده‌اند [۱۸]. مهم‌ترین ویژگی‌هایی که باید در طراحی پلیمر هوشمند برای انسداد موقت چاه‌های نفت و گاز به آن توجه کرد، عبارت از سازگاری با تجهیزات موجود، گرانی روی اولیه و سرعت تغییرات گرانی روی [۱۹]، زمان ژل‌شدگی، پایداری گرمایی و مکانیکی، سازوکار و درصد تخریب‌پذیری، عدم تأثیر بر خواص ترشوندگی سنگ سازند، رفتار پلیمر در pH‌های متفاوت و محیط‌های حاوی نمک، صرفه اقتصادی و قابلیت تولید انبوه هستند [۲۰].

همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز به آن اشاره شد، استحکام هیدروژل و خواص رئولوژیکی آن یکی از مهم‌ترین مواردی هستند که باید به آن توجه کرد [۲۲]. Sun و همکاران، نانوکامپوزیت هیدروژل حاوی درصد‌های متفاوتی از نانوسیلیکا را سنتز و بررسی کردند. در درصد‌های ۵ و ۷، ترکیب خواص روان‌وردی نشان داد. همچنین برای بررسی مقاومت ژل، مدول‌های ذخیره و اتلاف



شکل ۵- نمودار گرانی روی در برابر سرعت برش برای ترکیب درصد‌های متفاوت نانوسیلیکا [۴۴۴۴].



شکل ۴- اثر زمان و دمای پیرش بر مدول ذخیره [۴۴۴].

آلومینیم، تیتانیم، روی و منیزیم می‌توانند موجب افزایش برداشت نفت شوند. این نانوذرات، به‌ویژه در تولید نفت‌های سنگین مؤثر واقع شده‌اند. چراکه به‌دلیل ماهیت آب‌دوست آن‌ها می‌توانند گران‌روی نفت و کشش بین‌سطحی (IFT) را کاهش دهند. همچنین امکان تغییر ترشوندگی سنگ مخزن به حالت آب‌دوست با استفاده از این مواد وجود دارد [۲۷].

در مطالعه Xu و همکاران [۲۸]، نانوذرات TiO_2 در ساختار نوعی هیدروژل کویلیمری برپایه آکرلیک اسید (PAA) و دی‌متیل‌آکریل آمید (DMAA) استفاده شد تا خواص مکانیکی مانند استحکام کششی و فشاری پلیمر بهبود یابد. پیشرفت‌های مشاهده‌شده به وجود پیوندهای استری و هیدروژنی میان نانوذرات TiO_2 و گروه‌های کربوکسیل آزاد زنجیرهای PAA نسبت داده شد. این افزایش در چقرمگی سازه، فعال‌سازی پدیده حافظه شکلی را امکان‌پذیر کرد، به‌گونه‌ای که نانوچندسازه پلیمری قابلیت یادآوری و بازیابی شکل‌های پیشین خود را در پاسخ به محرک‌های محیطی دارا شد.

هورتا-آنجلس و همکاران [۲۶]، از نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید (TiO_2) در هیدروژل PNIPAM از طریق پلیمر شدن انجام‌داده استفاده کردند تا حساسیت پلیمر به شوری و دما کنترل شود. مشاهده شد، این نانوذرات با تثبیت ساختار منافذ، باعث تقویت مکانیکی پلیمر و افزایش تورم آن می‌شوند. در مطالعه دیگری [۲۲]، اثر نانوذرات TiO_2 بر پلی‌آکریل آمید آب‌کافت‌شده برای تولید نفت بررسی شد. آزمایش‌های غرقابی مغزه در سازند ماسه‌سنگ نشان دادند، این نانوذرات باعث افزایش گران‌روی ژل HPAM شده و در غلظت ۲/۳٪ وزنی نانوذرات، افزایش ۴٪ در بازیابی نفت ثبت شد.

زیرکونیم تتراهیدروکسید ($Zr(OH)_2$) هم به‌دلیل داشتن گروه‌های

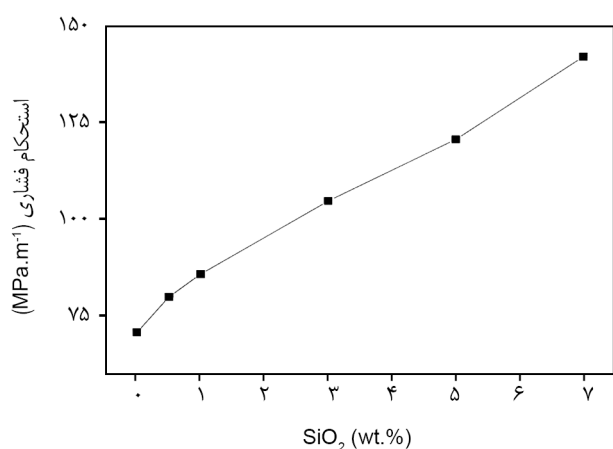
تولید آب اضافی جلوگیری می‌کند [۲۶].

یکی از روش‌های متداول و مقرون‌به‌صرفه برای بهبود تطابق جریان سیال در مخزن، استفاده از ژل‌های با قابلیت جذب آب بوده که اثربخشی آن در افزایش برداشت نفت نیز به اثبات رسیده است. پلیمرها به‌دلیل سهولت تزریق و قابلیت نفوذ مناسب، انتخاب مناسبی برای این روش هستند [۱۷]. همچنین پلیمرها با افزایش گران‌روی آب تزریقی، فرایند برداشت را از طریق سازوکارهای مختلفی مانند کاهش کشش بین‌سطحی، تغییر ترشوندگی سنگ، کنترل نفوذپذیری نواحی مختلف مخزن و کاهش گران‌روی نفت برای بهبود تحرک‌پذیری آن بهینه می‌کنند [۲۵].

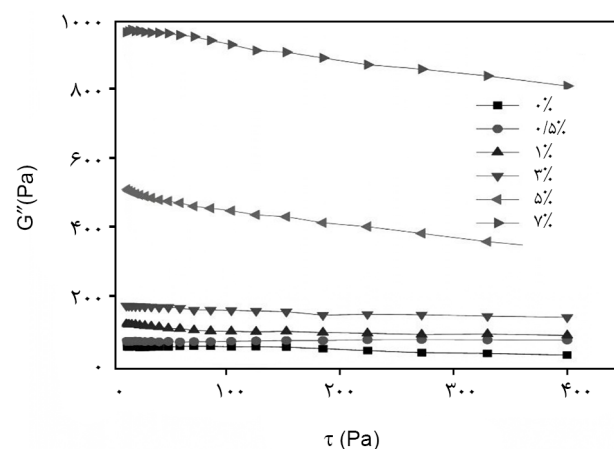
فرایند استفاده از ژل شامل تزریق محلولی از پلیمر و عامل ژل‌کننده به ناحیه هدف در مخزن است تا مسیرهای با نفوذپذیری زیاد مسدود شوند. این محلول معمولاً از ترکیبی شامل پلیمر (حدود ۱/۸٪ وزنی)، عامل ایجاد پیوند عرضی (حدود ۰/۲٪) و آب (حدود ۹۸٪) تشکیل شده است [۲۴]. طراحی این سامانه به‌گونه‌ای انجام می‌شود که پس از گذشت مدت زمان معین و در دمای خاص، ژل پلیمری در محل مدنظر تشکیل می‌شود. پلی‌آکریل آمیدها به علت انحلال‌پذیری در آب و مقرون‌به‌صرفه بودن بهترین گزینه برای انجام این روش هستند. اما همچنان استفاده از آن‌ها به‌شکل خالص، مناسب شرایط چاه نیست و نیازمند نانومواد در ساختار آن‌هاست. در ادامه استفاده از دو دسته از نانومواد در طراحی سامانه‌های ازدیاد برداشت بررسی می‌شود.

نانوذرات فلزی و اکسید فلزی

پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند، نانوذرات اکسید فلزاتی مانند



شکل ۷- مدول‌های ذخیره و اتلاف برای هیدروژل‌های حاوی ۱٪ تا ۳٪ نانوکامپوزیت [۴۴۴۴].



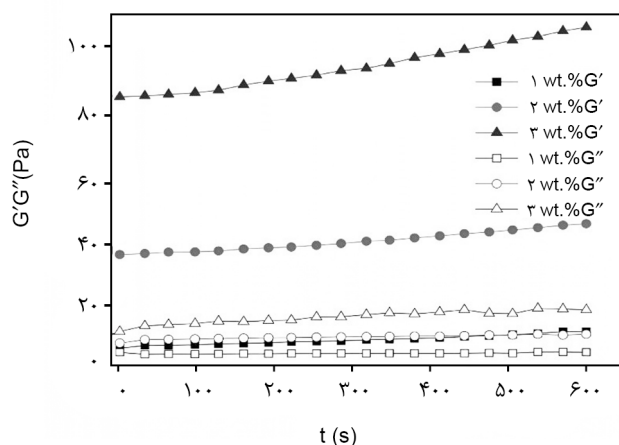
شکل ۶- نمودار مدول ذخیره در برابر تنش برای نمونه‌های حاوی درصد متفاوت نانوسیلیکا [۴۴۴۴].

وجود دارد. اگر این بازه زمانی خیلی بیش از زمان مورد نیاز برای عملیات تزریق باشد، ژل در محل مدنظر به درستی شکل نمی‌گیرد، در اثر فشارهای محیطی تغییر شکل می‌دهد و عملکرد درستی نخواهد داشت [۲۹]. پس از تشکیل ژل نیز استحکام ژل، عامل تعیین‌کننده‌های در عملکرد آن است [۲۸].

سیلیکا، نانوذره‌ای کم‌هزینه و در دسترس است که به راحتی در مقیاس وسیع سنتز می‌شود و دارای گروه‌های آب‌دوست است. استفاده از این نانوذره در ترکیب ژل پلیمری، خاصیت ترشوندگی سنگ را تغییر می‌دهد و بازیافت نفت را بهبود می‌بخشد. مطالعات اولیه نشان داد، سیلیکا باعث افزایش گرانروی و پایداری ساختار در ژل‌های پلیمری می‌شود. همچنین وجود نانوذرات سیلیکا، تحمل شوری پلی‌آکریل آمید را، به ویژه با وجود یون‌های دو ظرفیتی مانند Ca^{2+} و Mg^{2+} ، افزایش می‌دهد [۳۲]. سیلیکا با ایجاد پیوندهای کووالانسی و جلوگیری از حمله کاتیون‌ها به PAM، تخریب پلیمر را کاهش می‌دهد و باعث افزایش گرانروی می‌شود که این نتایج در مطالعات بعدی تأیید شده‌اند [۳۰].

نتیجه‌گیری

باتوجه به بررسی‌های انجام‌شده در این مطالعه و تحلیل جامع داده‌های تجربی و مفهومی ارائه‌شده می‌توان اذعان داشت، استفاده از نانوکامپوزیت‌های برپایه پلی‌آکریل آمید در مهندسی نفت، به ویژه در حوزه انسداد چاه‌ها، رویکرد نوآورانه و مؤثری برای بهبود عملکرد عملیات محسوب می‌شود. در این مطالعه مشخص شد، ترکیب پلی‌آکریل آمید با نانوذراتی نظیر نانوسیلیکا، نانورس، نانوذرات اکسید فلزات (نظیر مس و تیتانیم) به ایجاد نانوکامپوزیت‌هایی با خواص تقویت‌شده از نظر مکانیکی، گرمایی و شیمیایی منجر شده است. این مواد، نه تنها توانسته‌اند استحکام و پایداری ساختاری عوامل انسداد را افزایش دهند، بلکه با کاهش زمان ژل‌شدن، بهبود مدول ذخیره، افزایش مقاومت فشاری و کنترل دقیق‌تر پارامترهای رئولوژیکی به عملکرد بهینه این ژل‌ها در شرایط سخت عملیاتی کمک کرده‌اند. افزودن نانوذرات به فرمول‌بندی پلی‌آکریل آمید سبب بهبود چشمگیر پایداری گرمایی شده است و دمای عملکرد مواد انسدادی را تا بیش از $200^{\circ}C$ افزایش می‌دهند و ضخامت و عملکرد کیک صافی را بهبود می‌بخشد. همچنین در این مطالعه به تأثیر شرایط محیطی مانند شوری و pH بر عملکرد نانوکامپوزیت‌ها توجه شده است. در نهایت می‌توان اذعان داشت،



شکل ۸- اثر درصد نانوسیلیکا بر استحکام فشاری هیدروژل [۳۳].

هیدروکسیل زیاد که می‌تواند پیوندهای هیدروژنی ایجاد کند، گزینه خوبی برای پیوند عرضی در نانوکامپوزیت‌های پلیمری هستند [۲۷، ۲۴]. Jiang و همکاران از این نانوذرات برای اتصال عرضی پلی‌آکریل آمید و AMPS در مجاورت TEMED استفاده کردند. آن‌ها شبکه‌ای قوی از پیوندهای هیدروژنی میان گروه آمید موجود در PAM و گروه سولفونیک اسید AMPS را مشاهده کردند که باعث استحکام مکانیکی زیاد و افزایش قابلیت خودترمیمی می‌شود. چون هیدروژل‌های خودترمیم می‌توانند ساختار آسیب‌دیده خود را پس از مدتی ترمیم کنند از عمر طولانی‌تری برخوردار بوده و مورد توجه واقع شده‌اند. در مطالعه دیگری [۲۵] از این نانوذرات برای بهبود خواص گرمایی و گرانروکشسانی PAM استفاده شد. مشخص شد، افزودن 0.2% تا 0.8% وزنی نانوذرات زیرکونیم تتراهیدروکسید می‌تواند پایداری گرمایی سامانه را به میزان $3^{\circ}C$ تا $5^{\circ}C$ افزایش دهد.

نانوذرات معدنی

نانورس‌ها یکی از انواع نانومواد هستند که تاکنون برای افزایش پایداری سیالات پلیمری استفاده‌شده در ازدیاد برداشت بررسی شده‌اند. مشاهده شده است، افزودن نانورس به هیدروژل PAM باعث افزایش 58% بازیابی نفت در دمای زیاد ($80^{\circ}C$) و شوری زیاد می‌شود. بررسی‌ها نشان داده است، وجود نانورس‌ها در ترکیب می‌تواند پایداری گرمایی را تا بیش از $200^{\circ}C$ افزایش دهد [۲۸]. یکی دیگر از خواصی که باید در نظر گرفته شود، بازه زمانی ژل‌شدن پلیمر است. به شکلی که اگر این بازه بسیار کوتاه باشد، گرانروی ژل در حین تزریق به داخل چاه به سرعت افزایش پیدا می‌کند و امکان شکست عملیات تزریق و آسیب دیدن تجهیزات

بهره‌گیری از نانوکامپوزیت‌های پلی‌آکریل آمید در فرایندهای حفاری، انسداد موقت و ازدیاد برداشت چاه‌های نفت و گاز، نه تنها روش کارآمد و انعطاف‌پذیری در مواجهه با شرایط پیچیده مخازن

زیرزمینی است، بلکه از منظر اقتصادی، زیست‌محیطی و عملکردی نیز نسبت به پلیمرهای مرسوم، مزایای چشمگیری را ارائه می‌دهد.

مراجع

- Manafi M.R., Manafi P., Agarwal S. et al., Synthesis of Nanocomposites from Polyacrylamide and Graphene Oxide: Application as Flocculants for Water Purification, *J. Colloid Interface Sci.*, **490**, 505-510, 2017.
- Fathinejad H. and Karimi E., Synthesis and Characterization of Polyacrylamide-Based Antibacterial Hydrogel Nanocomposite, *Soft Mater.*, **22**, 295-302, 2024.
- Bardajee G.R., Dianatnejad N., Mahmoodi N.O., and Mahmoodain H., Mechanical Properties and Development of Silver Nanoparticle-Enhanced Alginate-Polyacrylamide Double Network Hydrogel, *J. Polym. Res.*, **31**, 343, 2024.
- Ferfera-Harrar H., Berdous D., and Benhalima T., Hydrogel Nanocomposites Based on Chitosan-g-Polyacrylamide and Silver Nanoparticles Synthesized Using Curcuma Longa for Antibacterial Applications, *Polym. Bull.*, **75**, 2819-2846, 2018.
- Manafi M.R., Manafi P., and Pircheraghi G., Rheological Properties of Nanocomposite Aqueous Dispersions Based on Poly(acrylamide-co-acrylic acid) and Carbon Nanotube, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.*, **30**, 207-219, 2017.
- Ferrag C., Li S., Jeon K. et al., Polyacrylamide Hydrogels Doped with Different Shapes of Silver Nanoparticles: Antibacterial and Mechanical Properties, *Colloid. Surf. B: Biointerface.*, **197**, 111397, 2021.
- Caulfield M.J., Qiao G.G., and Solomon D.H., Some Aspects of the Properties and Degradation of Polyacrylamides, *Chem. Rev.*, **102**, 3067-3084, 2002.
- Manafi M., Manafi P., and Kehtari Karam S., Prevent Soil Loss by Copolymer Based on Polyacrylamide, *J. Adv. Mater. Technol.*, **4**, 63-69, 2016.
- Zheng L., Su G., Li Z. et al., The Wellbore Instability Control Mechanism of Fuzzy Ball Drilling Fluid for Coal Bed Methane Wells via Bonding Formation, *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, **56**, 107-120, 2018.
- Moreira B.A., de Oliveira Arouca F., and Damasceno J.J.R., Analysis of Suspension Sedimentation in Fluids with Rheological Shear-Thinning Properties and Thixotropic Effects, *Powder Technol.*, **308**, 290-297, 2017.
- Saboori R., Sabbaghi S., and Kalantariasl A., Improvement of Rheological, Filtration and Thermal Conductivity of Bentonite Drilling Fluid Using Copper Oxide/Polyacrylamide Nanocomposite, *Powder Technol.*, **353**, 257-266, 2019.
- Koh J.K., Lai C.W., Johan M.R. et al., Recent Advances of Modified Polyacrylamide in Drilling Technology, *J. Petrolm. Sci. Eng.*, **215**, 110566, 2022.
- Sadeghalvaad M. and Sabbaghi S., The Effect of the TiO₂/Polyacrylamide Nanocomposite on Water-Based Drilling Fluid Properties, *Powder Technol.*, **272**, 113-119, 2015.
- Bourgoyne A.T., Millheim K.K., Chenevert M.E., and Young F.S., Applied Drilling Engineering, *Soc. Petrolm. Eng.*, 1991.
- Sadeghalvaad M. and Sabbaghi S., The Effect of the TiO₂/Polyacrylamide Nanocomposite on Water-Based Drilling Fluid Properties, *Powder Technol.*, **272**, 113-119, 2015.
- Scott Blair G.W., Hening J.C., and Wagstaff A., The Flow of Cream Through Narrow Glass Tubes, *J. Phys. Chem.*, **43**, 853-864, 1939.
- Zou H., Wang Y., Xu Y. et al., Synthesis and Performance Study of Self-Degradable Gel Plugging Agents Suitable for Medium-and Low-Temperature Reservoirs, *ACS Omega*, **9**, 33702-33709, 2024.
- Fang J., Zhang X., Li L. et al., Research Progress of High-Temperature Resistant Functional Gel Materials and Their Application in Oil and Gas Drilling, *Gels*, **9**, 34, 2022.
- Wang Q., Zhou C., Zhang H. et al., Preparation of Low-Molecular-Weight Polyacrylamide as the Delayed Crosslinking Plugging Agent for Drilling Fluid, *Gels*, **10**(2), 112, 2024
- Okromelidze G.V., Garshina O.V., Nekrasova I.L., and Iljyasov S.E., Method of Well-Killing Operation by Using Visco-Elastic Gels with Controllable Destruction Terms, in: *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, SPE, pp. SPE-171302, 2014, October.
- Chen Z., Wu G., Zhou J. et al., Optimization of Degradable Temporary Plugging Material and Experimental Study on Stability of Temporary Plugging Layer, *Front. Phys.*, **11**, 1167215, 2023.
- Sun F., Dong Z., Lin M., Chen M., and Wang S., High Strength Polyacrylamide/nmSiO₂ Composite Hydrogel for Well Killing, *J. Jpn. Petrolm. Inst.*, **60**, 19-25, 2017.
- Li H., Wang Y., Qiao L., Yang H., and Zhou W., Preparation and Performance Evaluation of a Hydrophobically Associating Polymer as a High-Strength Water-Swelling Temporary Plugging Material, *Chem. Technol. Fuel. Oil.*, **56**, 707-717, 2020.
- Obino V. and Yadav U., Application of Polymer Based Nanocomposites for Water Shutoff—A Review, *Fuels*, **2**, 304-322,

- 2021.
25. Sheng J., Leonhardt B., and Al Azri N.S., Status of Polymer-Flooding Technology, *J. Can. Pet. Technol.*, **54**, 116-126, 2015.
26. Seright R.S., Scheult J.M., and Talashek T., Injectivity Characteristics of EOR Polymers, in: *Proceedings of the SPE Annual Technical*,
27. Karimi A., Fakhroucian Z., Bahramian A. et al., Wettability Alteration in Carbonates Using Zirconium Oxide Nanofluids: EOR Implications, *Energy Fuel.*, **26**, 1028-1036, 2012.
28. Xu B., Li H., Wang Y., Zhang G., and Zhang Q., Nanocomposite Hydrogels With High Strength Cross-Linked by Titania, *RSC Adv.*, **3**, 7233-7236, 2013.
29. Conference and Exhibition, Denver, CO, USA, 21-24 September 2008.
30. Maurya N. and Mandal A., Studies on Behavior of Suspension of Silica Nanoparticle in Aqueous Polyacrylamide Solution for Application in Enhanced Oil Recovery, *Pet. Sci. Technol.*, **34**, 429-436, 2016.