

Synthesis of Cobalt Hydrogel Nanocomposite Based on Acrylamide as an Efficient Chemical for Sand Production Control in Oil Reservoirs

Farzin Saghandali¹, Mahsa Baghban Salehi^{2*}, Vahid Taghikhani¹

1. Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology,
Postal Code 1458889614, Tehran, Iran

2. Department of Petroleum Engineering, Chemistry and Chemical Engineering Research Center of
Iran, Postal Code 1497716320, Tehran, Iran

Received: 3 February 2023, accepted: 25 April 2023

ABSTRACT

Hypothesis: Sand production from oil reservoirs is marked by many problems, such as well productivity reduction, operating equipment corrosion, and an increase in production costs; therefore, sand control in unconsolidated reservoirs is crucial for operating companies. Chemical injection into the production vessel, in order to strengthen and reduce sand formation, would be one of the most important methods of sand control.

Methods: In this study the effectiveness of a Co[AM-AMPS-AAC]/PEI-MBA(CO) hydrogel nanocomposite in sand control was investigated. The acrylamide-based nanocomposite is strengthened structurally and thermally by the addition of double crosslinkers and nanoparticles. Structural, morphological, thermal, rheological, compressive strength and flooding tests were carried out to define and assess its efficacy.

Findings: According to X-ray diffraction test findings, nanoparticles are evenly distributed throughout the structure. Morphological tests demonstrated the production of a dense, homogenous, and porous structure and validated the presence of nanoparticles in the structure. According to the thermal gravimetric test, adding nanoparticles increased the starting temperature of degradation from 80 to 195°C. The strain and frequency sweep rheological tests investigated the behavior of the material under different strains and stresses; they confirmed the preservation of the strong structure and linear viscoelastic behavior at a temperature of 90°C, strains between 0.1 and 20%, and frequencies between 0.1 and 10 Hz. The injection of 0.5 PV (pore volume) of 1% (by wt) nanocomposite to the sand pack resulted in a 730% increase in the axial strength of the sand pack according to the compressive strength test and 90% reduction in sand production measured by the chemical flooding test. Considering the stability and proper efficiency in the reservoir's harsh conditions, having linear viscoelastic properties, increasing compressive strength, and reducing sand production, the hydrogel nanocomposite designed in this research is proposed as a new and optimal product to control sand production and migration.

Keywords:

nanocomposite,
hydrogel,
sand production,
chemical flooding,
linear viscoelastic

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: m.salehi@ccerci.ac.ir

Please cite this article using:

Saghandali F., Baghban Salehi M., Taghikhani V., Synthesis of Cobalt Nanocomposite Hydrogel Based on Acrylamide as an Efficient Chemical for Sand Production Control in Oil Reservoirs, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, 35, 543-556, 2023.

ساخت نانوکامپوزیت هیدروژلی کبالت بر پایه آکریل آمید به عنوان ماده شیمیایی مؤثر در کنترل تولید ماسه از مخازن نفت

فرزین سقندلی^۱، مهسا باغبان صالحی^{۲*}، وحید تقی خانی^۱

۱- تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، کد پستی ۱۴۵۸۸۸۹۶۱۴

۲- تهران، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، پژوهشکده مهندسی نفت، کد پستی ۱۴۹۷۷۱۶۳۲۰

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۵

چکیده

فرضیه: تولید ماسه از مخازن نفت موجب ایجاد مشکلات متعددی از قبیل کاهش بهره‌دهی چاه، خوردگی تجهیزات عملیاتی و افزایش هزینه‌های تولید می‌شود. بنابراین، کنترل تولید ماسه در مخازن غیرمستحکم اهمیت زیادی برای شرکت‌های بهره‌بردار دارد. تزریق سیال شیمیایی به سازند به منظور استحکام بخشی و کاهش تولید ماسه یکی از مهم‌ترین روش‌های کنترل تولید ماسه است.

روش‌ها: در این پژوهش، نانوکامپوزیت هیدروژلی (Co[AM-AMPS-AAC]/PEI-MBA(CO) طراحی و کارایی آن در کنترل تولید ماسه بررسی شد. نانوکامپوزیت طراحی شده پایه آکریل آمیدی است و وجود اتصالات عرضی دوگانه به همراه نانوذرات در آن موجب افزایش استحکام ساختاری و پایداری گرمایی در آن می‌شود. به منظور بررسی ساختار و مطالعه کارایی نانوکامپوزیت آزمون‌های ساختارشناسی، شکل‌شناسی، گرمایی، رئولوژیکی، استحکام فشاری و سیلاب‌زنی انجام شد.

یافته‌ها: طبق نتایج آزمون پراش پرتو X نانوذرات به صورت کامل درون ساختار پخش شده‌اند. آزمون‌های شکل‌شناسی با تأیید وجود نانوذرات درون ساختار، ایجاد ساختار چگال، همگن و متخلخل را نشان داد. براساس آزمون گرماوزن‌سنجی افزودن نانوذره موجب افزایش دمای شروع تخریب از ۸۰°C به ۱۹۵°C شد. با آزمون‌های رئولوژیکی جاروب کرنش و بسامد رفتار ماده تحت کرنش و تنش‌های مختلف بررسی و حفظ ساختار مستحکم و رفتار گران‌روکشسان خطی در دمای ۹۰°C، کرنش‌های بین ۰/۱ تا ۲۰٪ و بسامدهای بین ۰/۱ Hz تا ۱۰ Hz تأیید شد. آزمون استحکام فشاری حاکی از افزایش ۷۳٪ استحکام بستر شنی در اثر تزریق ۱٪ وزنی نانوکامپوزیت به مقدار ۰/۵ PV (pore volume) بود. این در حالی است که آزمون سیلاب‌زنی شیمیایی در بستر شنی کاهش ۹۰٪ ماسه تولیدی را پس از تزریق نانوکامپوزیت در بستر شنی تأیید کرد. با توجه به پایداری و کارایی مناسب در شرایط سخت مخزن، دارا بودن خواص گران‌روکشسان خطی، افزایش استحکام فشاری و کاهش تولید ماسه، نانوکامپوزیت هیدروژلی طراحی شده در این پژوهش به عنوان محصولی جدید و بهینه برای کنترل تولید و مهاجرت ماسه پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی

نانوکامپوزیت،

هیدروژل،

تولید ماسه،

سیلاب‌زنی شیمیایی،

گران‌روکشسان خطی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

m.bsalehi@ccerci.ac.ir

مقدمه

بخش شایان توجهی از نفت دنیا، از میدان‌های نفتی با عمر زیاد تولید می‌شوند، این در حالی است که مقدار تولید از این مخازن روند نزولی خود را آغاز کرده‌اند [۱،۲]. شرکت‌های بهره‌بردار به منظور تأمین نیاز جهانی و افزایش بهره‌وری این مخازن از روش‌های ازدیاد برداشت نفت استفاده می‌کنند [۳،۴]. پس از کاهش مقدار تولید نفت با استفاده از تزریق آب به مخزن نفتی فشار درون مخزن افزایش یافته و نفت باقی‌مانده در مخزن به سمت چاه تولیدی رانده می‌شود. طی فرایند تزریق آب به مخزن و برخورد آب با سنگ‌های سازندهای غیرمستحکم، ذرات ماسه از هم جدا می‌شوند و شروع به مهاجرت با جریان سیال می‌کنند. تولید و مهاجرت ماسه با شوری آب تزریق شده به سازند رابطه معکوس دارد و هرچقدر مقدار شوری آب تزریقی کمتر باشد، مقدار تولید ماسه افزایش خواهد یافت [۵].

تولید ماسه از مخازن غیرمستحکم اثر شایان توجهی بر مقدار تولید چاه دارد و موجب کاهش شدید بهره‌وری آن می‌شود. از سوی دیگر، ورود ذرات ماسه به درون چاه موجب خوردگی‌های سایشی شدید در تجهیزات زیرزمینی و سطحی شده و در نتیجه موجب افزایش شدید هزینه‌های تولید به دلیل نیاز به فرایندهای جداسازی ماسه در سطح می‌شود [۶]. با توجه به مشکلاتی که تولید و مهاجرت ماسه به فرایند استخراج و تولید نفت تحمیل می‌کنند، شرکت‌های بالادستی نفت و گاز هزینه‌های زیادی را صرف مقابله با تولید ماسه از مخازن ماسه‌سنگی می‌کنند [۷].

روش‌های عمده کنترل ماسه شامل انواع روش‌های مکانیکی از قبیل آستری‌ها، توری‌ها و پوشش‌های شنی (gravel pack) می‌شوند [۸،۹]. روش‌های مکانیکی متداول‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌های کنترل ماسه هستند، مهم‌ترین معایب روش‌های مکانیکی را می‌توان، پرهزینه بودن نصب، خوردگی توری‌ها و آستری‌ها به دلیل اسیدکاری و خوردگی سایشی شدید در مخازن گازی، گرفتگی و بسته شدن منافذ توری‌ها و آستری‌ها نام برد که باعث کاهش شدید فشار در طول توری و کاهش مقدار تولید می‌شود [۱۰،۱۱]. با توجه به مشکلات و محدودیت‌های ذکر شده و تداوم تخریب سازند، در بسیاری از چاه‌ها امکان استفاده از روش‌های مکانیکی کنترل و مهار ماسه وجود ندارد. مشکلات و چالش‌های استفاده از روش‌های مکانیکی، پژوهشگران حوزه نفت را به سمت ابداع و استفاده از روش‌های شیمیایی برای کنترل ماسه سوق داده است [۷]. در روش‌های شیمیایی کنترل ماسه از مخازن غیرمستحکم ماسه‌سنگی، ماده شیمیایی درون سازند تزریق می‌شود تا با برهم‌کنش با ماسه و سنگ‌های مخزن موجب افزایش استحکام آن‌ها شده و مانع تولید و مهاجرت ماسه شود [۱۲-۱۴]. روش‌های

شیمیایی کنترل ماسه عبارت از استفاده از رزین‌ها، نانوسیال‌ها و پلیمرهای با اتصال‌های عرضی است.

رزین‌ها رایج‌ترین دسته از موادی هستند که به منظور کنترل شیمیایی ماسه استفاده می‌شوند. رزین‌های مختلفی مانند رزین‌های اپوکسی، فوران، پلی‌استر، اوره فرمالدهید و فنول فرمالدهید بدین منظور استفاده شده‌اند. رزین‌ها زمانی که به درون سازند تزریق می‌شوند، پوششی روی سطح ذرات ماسه ایجاد می‌کنند و پس از گذر زمان در شرایط دمایی مخزن شروع به سفت شدن می‌کنند و در نتیجه موجب استحکام بخشی به سازند می‌شوند [۱۵]. سامانه تحکیم رزین‌های متعارف به طور عمده بر پایه حلال هستند. بنابراین موجب نگرانی‌های زیست‌محیطی می‌شوند. سایر روش‌های تقویت رزین‌ها شامل تزریق کاتالیزگر پس از تزریق رزین به درون سازند به عنوان فعال‌ساز واکنش استحکام بخشی است که این روش نیز به دلیل پخش نایکنواخت کاتالیزگر درون سازند با چالش‌های جدی روبه‌روست [۱۶]. حتی در صورت جاگیری صحیح و پخش یکنواخت رزین درون محیط متخلخل، به دلیل سمیت، گران‌روی زیاد سیال تزریقی که موجب کاهش عمق نفوذ می‌شود و کاهش شدید تراوایی پس از تقویت رزین درون سازند، استفاده از این مواد در بسیاری از موارد توصیه نمی‌شود [۱۷].

نانوسیال‌ها دسته دیگری از مواد هستند که برای کاهش یا توقف تولید ماسه از مخازن استفاده می‌شوند [۱۸]. این مواد با تغییر در ترشوندگی سنگ مخزن و تغییر پتانسیل زتای سنگ مخزن و ماسه‌های موجود در سازند، موجب افزایش هم‌بستگی سنگ مخزن و ذرات ماسه یا افزایش هم‌بستگی بین ذرات ماسه می‌شوند [۱۹]. از آنجا که نانومواد با تغییر نیروهای الکتروستاتیکی سطح ذرات ماسه موجب بهینه‌سازی پتانسیل زتا می‌شوند. بنابراین، کارایی آن‌ها به شدت تحت تأثیر یون‌های موجود در سیال‌های درون سازند است، همچنین به دلیل ماهیت ضعیف این نیروها در ایجاد استحکام، در مواردی که تولید شدید ماسه در مخزن وجود دارد، کارایی مناسبی ندارند [۲۰،۲۱]. دسته جدیدتر مواد شیمیایی که برای استحکام بخشی به سازندهای غیرمستحکم استفاده می‌شوند، پلیمرهایی با ساختار سه‌بعدی از قبیل هیدروژل‌ها هستند [۲۲]. هیدروژل‌ها به طور عمده بر پایه آکریل آمید به صورت درجا استفاده می‌شوند. این مواد به صورت ژل‌ساز (gelant) پیش از تشکیل ساختار سه‌بعدی با گران‌روی کم به درون مخزن تزریق می‌شوند، بنابراین با فرایند تزریق هزینه کمی دارند و عمق نفوذ بهتری نسبت به رزین‌ها درون مخزن به دست می‌آید [۱۲]. پس از جاگیری ژل‌ساز درون مخزن محلول عامل ایجاد اتصال عرضی به مخزن تزریق می‌شود تا با ژل‌ساز درون مخزن واکنش

شد. پرکننده بودن نانوذرات در ساختار سه بعدی نانوکامپوزیت با استفاده از آزمایش‌های رئولوژیکی تأیید شد که این موضوع عامل اصلی حفظ رفتار گران‌روکشسانی تحت فشار و برش ناشی از تزریق و قراردادن در مخزن و کنترل تورم است.

تجربی

مواد

مونومرهای استفاده شده در این پژوهش عبارت است از آکریل آمید (AM)، ۲-آکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید (AMPS) و آکرلیک اسید (AAC)، که AM و AMPS به حالت جامد پودری سفید و AAC به حالت مایع بی‌رنگ از شرکت Merck آلمان خریداری شدند. عامل ایجاد اتصال عرضی پلی اتیلن ایمین (PEI) خطی با وزن مولکولی 750000 g/mol و غلظت ۵۰٪ وزنی محلول در آب و متیلن بیس آکریل آمید (MBA) به حالت پودر سفیدرنگ به ترتیب از شرکت‌های Sigma، Aldrich و Merck تهیه شدند. آمونوم پرسولفات به عنوان آغازگر واکنش پلیمر شدن به حالت جامد پودری سفیدرنگ از شرکت Merck خریداری شد. نانوذرات کبالت (Co) با اندازه ذره ۱۵ nm تا ۳۰ nm از شرکت Notrino خریداری شد. شایان ذکر است، در آزمایش‌های مختلف و سنتز نانوکامپوزیت از آب مقطر (مقاومت ویژه $18/25 \text{ M}\Omega\text{cm}$) و در آزمایش‌های مربوط به محیط آب شور از آب‌نمک سدیم کلرید با شوری 100000 ppm استفاده شد.

دستگاه‌ها و روش‌ها

سنتز نانوکامپوزیت هیدروژلی

سنتز نانوکامپوزیت هیدروژلی از راه پلیمر شدن رادیکال آزاد درون بالن سه دهانه تحت جریان گاز نیتروژن انجام شد، بدین منظور مونومرهای AM و AMPS به ترتیب به مقدار ۲ و ۰/۵ g به مقادیر کافی آب افزوده شده و در دمای معمولی به مدت ۲ h با همزن مغناطیسی و سرعت چرخش 250 rpm هم زده شدند. سپس، محلول‌های به دست آمده به درون بالن سه دهانه افزوده شده و درون حمام آب 46°C قرار داده شدند. پس از آن به مدت ۱۵ min مقدار ۱ mL AAC به مخلوط افزوده شد و دمای حمام به 56°C افزایش داده شد. پس از هم زدن مخلوط در دمای مزبور به مدت ۳۰ min، $0/03 \text{ g}$ نانوذره کبالت که در ۴ mL آب مقطر پراکنده شده بود، به مخلوط در حال هم زدن به طور تدریجی با سرعت 1 mL/min افزوده شد. سپس، دمای حمام

دهد و هیدروژل ساختار سه بعدی خود را به دست آورد. هیدروژل‌ها با چسبیدن به سطح ذرات ماسه و سنگ مخزن و چسباندن آن‌ها به هم یا ایجاد پوشش سطحی روی سطح سنگ مخزن موجب افزایش استحکام سازند در برابر تولید ماسه می‌شوند [۲۳]. استفاده از هیدروژل‌های درجا نیز دارای معایب و کاستی‌هایی هست که مانع از استفاده گسترده از این مواد در صنعت به ویژه در مخازنی با دما و شوری زیاد می‌شود. مهم‌ترین مشکل هیدروژل‌های درجا خطر عملیاتی زیاد واکنش پلیمر شدن در شرایط دمایی، فشاری و شوری مخزن است که می‌تواند موجب کاهش کنترل پذیری واکنش و شکست فرایند شود [۲۴].

به منظور غلبه بر مشکلات عنوان شده، ذرات هیدروژلی از پیش ساخته شده معرفی شدند. این ذرات هیدروژل‌های کاملاً تشکیل شده‌ای هستند که پیش از تزریق خشک می‌شوند و به حالت پودر درمی‌آیند و به حالت تعلیق به همراه سیال انتقال دهنده که معمولاً آب است، در گرانروی نزدیک به آب به درون سازند تزریق می‌شوند. بنابراین فرایند تشکیل آن‌ها تحت تأثیر دما، شوری و سایر مواد درون سازند نیست و تزریق و جاگیری صحیح آن‌ها به دلیل گرانروی کم بسیار قابل کنترل تر از روش‌های پیشین است [۲۵]. هیدروژل‌ها و به طور کلی اکثر مواد پلیمری در برابر دما، تغییرات فشار و شوری زیاد مخازن آسیب پذیر هستند. بنابراین استفاده از این مواد در شرایط سخت مخازن ایران با محدودیت‌های جدی روبه‌رو است [۲۶]. در این پژوهش با هدف غلبه بر این محدودیت‌ها سنتز نانوکامپوزیت هیدروژلی از پیش ساخته $\text{Co[AM-AMPS-AAC]/PEI-MBA}$ طراحی شد. انتظار می‌رود، ساختار ابتکاری طراحی شده دارای استحکام ساختاری و حفظ پایداری گرمایی در مخازن با دمای زیاد (150°C) بوده و به دلیل پیش ساخته بودن از مشکلات عملیاتی مربوط به ژل‌های درجا میرا باشد.

در نانوکامپوزیت هیدروژلی طراحی شده از آکریل آمید به عنوان مونومر پایه استفاده شد. مونومرهای ۲-آکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید به عنوان عامل افزایش مقاومت در برابر شوری زیاد و مونومرهای آکرلیک اسید به عنوان عامل افزایش دهنده مقدار تورم در ترکیب نانوکامپوزیت استفاده شدند. از عامل ایجاد اتصال عرضی پلی اتیلن ایمین و متیلن آریل آمید، به منظور افزایش استحکام ساختاری در برابر تنش‌های وارد شده به نانوکامپوزیت هنگام تزریق و جاگیری درون سازند، ایجاد واکنش شیمیایی و ساختار سه بعدی و تورم پذیر و نگهداری آب در ساختار، استفاده شد. نانوذرات کبالت به دلیل خواص الکتروشیمیایی و اثر هم افزایی وجود نانوذرات و هیدروژل و نیز به منظور افزایش پایداری گرمایی به سامانه افزوده

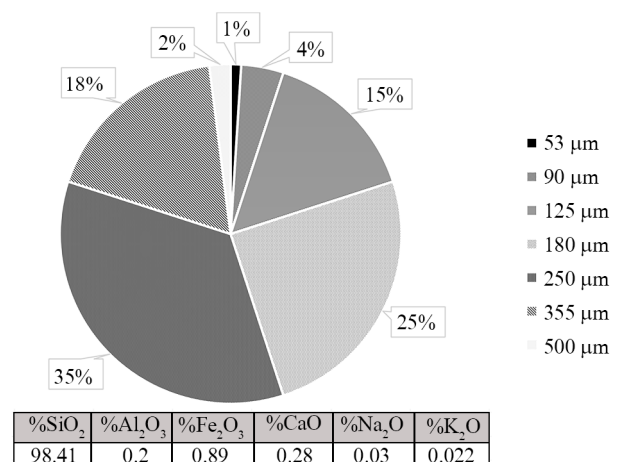
روش‌شناسی آزمایش‌ها

به منظور شناسایی بلوری یا بی‌شکل بودن ساختار نانوکامپوزیت هیدروژلی و ارزیابی نحوه پخش نانوذرات درون ساختار، آزمایش پراش پرتو X (XRD) با پراش‌سنج Bruker AXS-D8 Advance انجام شد [۲۸،۲۹]. برای بررسی برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی گروه‌های عاملی و پیوندهای موجود در نانوکامپوزیت هیدروژلی طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوری (FTIR) با طیف‌سنج Perkin-Elmer Spectrum 10.03.06 در محدوده عدد موجی 450 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} انجام شد [۳۰-۳۲]. شکل‌شناسی سطح نانوکامپوزیت سنتز شده در حالت خشک و متورم با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) Tescan-VEGA ساخت جمهوری چک و میکروسکوپ الکترونی پویشی محیطی (E-SEM) E-SEM-fei quanta 250 در جو نیتروژن بررسی شد، همچنین از آزمون EDS برای تأیید وجود مواد مختلف در ساختار بهره گرفته شد [۲۸،۳۳]. پایداری گرمایی نمونه ساخته شده با گرماوزن‌سنجی (TGA) به کمک گرماوزن‌سنج Netzsch-TGA در جو نیتروژن و بین دماهای 35°C تا 500°C بررسی شد [۳۴]. با هدف بررسی رفتار نانوکامپوزیت تحت کرنش و تنش و کمی‌سازی مقادیر رفتار کشسان و گران‌رو نمونه، از رئومتر Anton Paar مدل MCR301 استفاده شد. با استفاده از این دستگاه، آزمون‌های جاروب کرنش و جاروب بسامد در دمای 90°C به ترتیب در بسامد ثابت 1 Hz و کرنش‌های بین $0/1$ تا $200/1$ و کرنش ثابت 1% و بسامدهای بین $0/1 \text{ Hz}$ تا 100 Hz انجام شد [۳۵،۳۶]. آزمون استحکام فشاری به منظور بررسی اثر تزریق نانوکامپوزیت بر افزایش استحکام فشاری بستر شنی انجام شد، در این آزمون با استفاده از پمپ Enerpack, US با فشار 5800 psi در فشار محیطی 300 psi و در دمای 90°C که با ژاکت گرمایی ایجاد شد، 1% وزنی نانوکامپوزیت در آب با سرعت 20 mL/min به مقدار $0/5 \text{ PV}$ به بستر شنی تزریق شد و پس از گذشت زمان کافی برای نانوکامپوزیت به منظور برهم‌کنش با بستر شنی استحکام فشاری آن اندازه‌گیری شد [۱۲]. در نهایت، برای مطالعه مقدار تولید ماسه از بستر شنی و اثر نانوکامپوزیت بر کاهش تولید ماسه در شرایط مخزن مطابق شکل ۲ از آزمون سیلاب‌زنی مغزه استفاده شد. بدین منظور بستر شنی با ابعاد طول $7/2 \text{ cm}$ و قطر $3/6 \text{ cm}$ تهیه شد و درون نگه‌دارنده مغزه قرار داده شد و با استفاده از ژاکت گرمایی، دمای آن به 90°C رسید. در این آزمون از پمپ تزریق با بیشینه سرعت تزریق 32 mL/min و حداکثر فشار 600 bar استفاده شد. پیش از تزریق نانوکامپوزیت، آب در سرعت‌های مختلف به بستر شنی تزریق شد تا مقدار تولید ماسه از بستر شنی در هر سرعت اندازه‌گیری شود. پس از آن، $0/5 \text{ PV}$ نانوکامپوزیت تهیه شده با غلظت 1% وزنی در آب با

آب به 66°C رسانده شد و پس از 30 min ، 10 mL محلول دارای مقادیر مساوی اتصال‌دهنده عرضی PEI و MBA به مقدار $0/03\%$ وزنی به راکتور واکنش افزوده شد. دمای حمام آب به تدریج به دمای 76°C رسانده شد و $0/2 \text{ g}$ آغازگر APS به حالت محلول در مقادیر کافی آب تحت جریان نیتروژن به راکتور واکنش افزوده شد. پس از انجام فرایند پلیمر شدن به نانوکامپوزیت سنتز شده 24 h تحت دمای محیط استراحت داده شد تا فرایند پلیمر شدن تکمیل شود. سپس، نانوکامپوزیت هیدروژلی سنتز شده با استون و آب شسته شد تا از نبود مونومرهای واکنش‌نده اطمینان حاصل شود. در نهایت، نمونه درون آون خلأ در دمای 65°C به مدت 24 h قرار داده شد تا کاملاً خشک شود، قطعات خشک شده نانوکامپوزیت هیدروژلی با آسیاب به پودرهایی با قطر $1 \mu\text{m}$ تبدیل شد [۲۵،۲۷].

ساخت بستر شنی

با هدف بررسی اثر نانوکامپوزیت هیدروژلی سنتز شده درون محیط متخلخل، با استفاده از آزمون توزیع اندازه ذرات مغزه‌های ماسه‌سنگی مربوط به مخزن آسماری ایران، بسترهای شنی (sandpack) برای آزمون‌های استحکام فشاری و سیلاب‌زنی مغزه ساخته شد. بدین منظور، مطابق با توزیع اندازه ذرات مخزن آسماری، بستر شنی با ابعاد قطر 38 mm و طول 76 mm با استفاده از ماشین قالب مخصوص ساخت مغزه و ماشین فشار، زیر فشار 2 bar در دمای 90°C ساخته شد. توزیع اندازه ذرات بستر شنی ساخته شده و مشخصات شیمیایی ماسه استفاده شده در شکل ۱ آمده است.

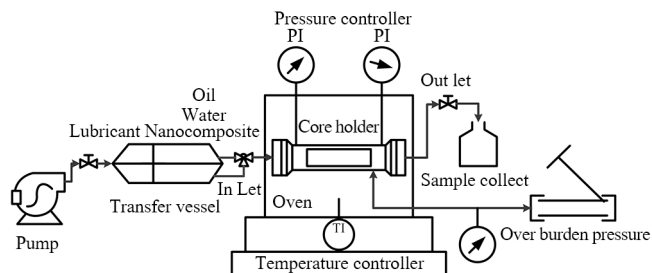


شکل ۱- مشخصات شیمیایی ماسه و توزیع اندازه ذرات در بستر شنی ساخته شده.

Fig. 1. Chemical characteristics of sand and size distribution of manufactured sandpack particles.

پخش ورقه‌ای گفته می‌شود. طبق شکل ۳ (a) طیف پراش پرتو X برای هر نانوکامپوزیت و نانوذره کبالت نشانگر عدم همپوشانی است. بنابراین جدایی فاز انجام نشده و نانوذرات بین لایه‌های زنجیر پلیمری قرار گرفته است. بنابراین، وجود نانوذرات در ساختار تأیید شده و تشکیل نانوکامپوزیت هیدروژلی ثابت شد.

در نانوکامپوزیت $\text{Co[AM-AMPS-AAC]/PEI-MBA(CO)}$ برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی با آزمون FTIR مطالعه شد. طبق شکل ۳ (b)، پیک جذبی در 623 cm^{-1} به دلیل وجود آلکین‌ها در عامل ایجاد اتصال عرضی MBA است، پیک‌های 803 و 864 cm^{-1} به پیوند یگانه کربن-هیدروژن در آلکان‌های موجود در AM و AAC و نیز ارتعاش پیوند نیتروژن-هیدروژن در گروه آمینی در AM، PEI و MBA مربوط است. پیک جذبی در 1036 و 1170 cm^{-1} به دلیل نوارهای گروه سولفوکسید در AMPS و ارتعاش گروه کربوکسیلیک اسید در AA مشاهده می‌شوند. پیک جذبی در 1451 cm^{-1} به پیوند کربن-کربن در پلیمر شدن مونومرهای مختلف مربوط است. جذب در 2926 cm^{-1} به دلیل ارتعاش کششی گروه کربوکسیلیک اسید در AA است. افزون بر پیک‌های بیان‌شده که نشانگر وجود مواد نام‌برده درون ساختار نانوکامپوزیت بودند، پیک‌های جذبی نیز وجود دارند که تشکیل ساختار سه‌بعدی و ایجاد پیوند بین عامل ایجاد اتصال عرضی و زنجیرهای پلیمری را نشان می‌دهند، مانند پیک در 1656 cm^{-1} که به (N-O-H) نسبت داده می‌شود و در واکنش اتصال عرضی PEI و AA دیده می‌شود. جذب 1740 cm^{-1} به دلیل ارتعاش‌های استر (RCOOR) در اتصال عرضی بین MBA و AA است. نوار جذب در 3437 cm^{-1} به دلیل ارتعاش‌های آمیدی (RCONHR) در اتصال عرضی بین



شکل ۲- طرح کلی سامانه سیلاب‌زنی مغزه.

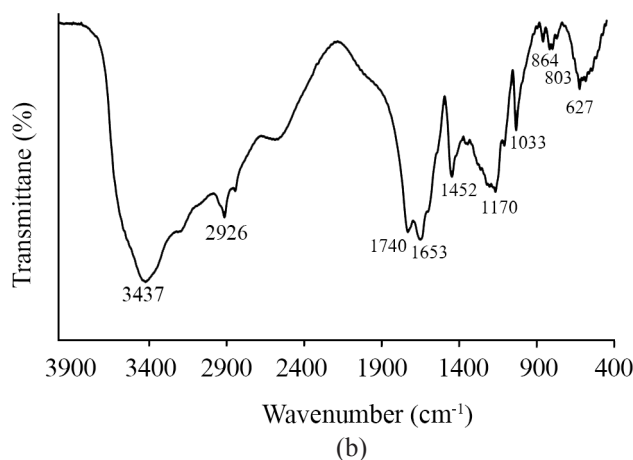
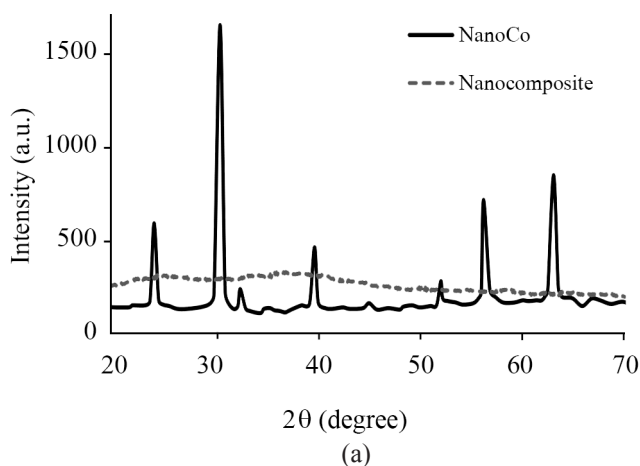
Fig. 2. Schematic for coreflooding setup.

سرعت 50 mL/h به بستر شنی تزریق شد. بستر شنی به مدت 24 h در دمای 90°C قرار گرفت، پس از آن دوباره آب در سرعت‌های مختلف به بستر شنی تزریق شد تا مقدار ماسه خروجی در این حالت نیز اندازه‌گیری شده و با حالت قبل مقایسه شود [۳۷،۳۸].

نتایج و بحث

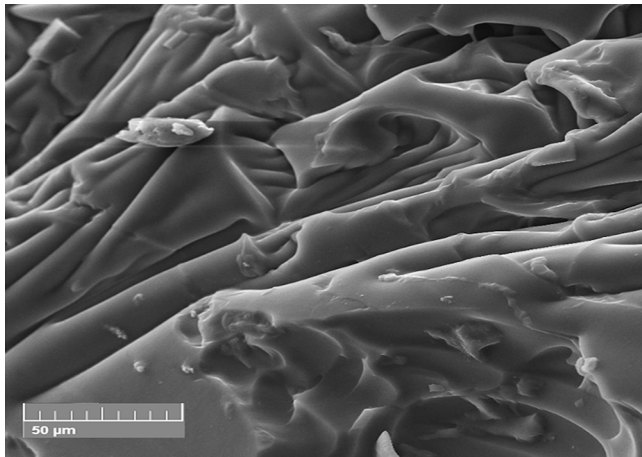
ساختارشناسی

با توجه به هدف پژوهش که دستیابی به نانوکامپوزیتی برای تزریق به مخازن نفتی است، لازم است نانوکامپوزیت سنتز شده در مقابل تنش و دمای زیاد مقاوم باشد. نانوذرات زمانی می‌توانند بیشترین اثر را روی ساختار هیدروژل بگذارند و موجب افزایش حداکثری استحکام ساختاری و مقامت گرمایی شوند که به‌طور یکنواخت و حداکثری درون شبکه سه‌بعدی هیدروژل پخش شده باشند که به این حالت،

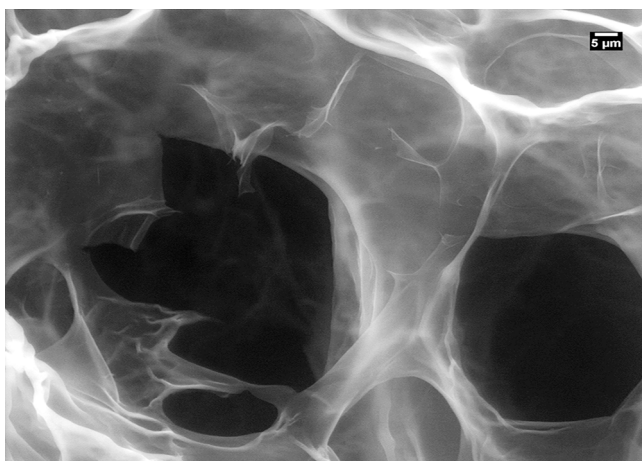


شکل ۳- (a) طیف پراش پرتو X نانوکامپوزیت و نانوذره کبالت و (b) طیف FTIR نانوکامپوزیت سنتز شده.

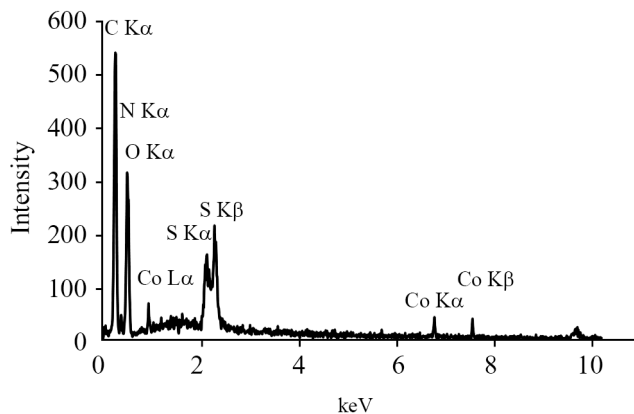
Fig. 3. (a) X-ray diffraction spectrum of nanocomposite and cobalt nanoparticle and (b) FTIR spectrum of synthesized nanocomposite.



(a)



(b)



(c)

شکل ۴- (a) تصاویر SEM نمونه خشک با مقیاس $50 \mu\text{m}$ ، (b) تصاویر ESEM نمونه متورم نانوکامپوزیت با مقیاس $5 \mu\text{m}$ و (c) نمودار EDS نانوکامپوزیت.

Fig. 4. (a) SEM images of dry sample with a scale of $50 \mu\text{m}$, (b) ESEM images of swollen nanocomposite sample with a scale of $5 \mu\text{m}$, and (c) EDS chart of nanocomposite.

PEI و AM یا AA است. با توجه به پیک‌های مشاهده‌شده در شکل ۳ (b)، ایجاد ساختار سه‌بعدی تأیید شد.

شکل‌شناسی

ساختار سطح نانوکامپوزیت در حالت خشک و متورم با تصاویر میکروسکوپ پویشی و پویشی محیطی مطالعه شد. مطابق شکل ۴ (a) و (b)، سطح نمونه در حالت خشک ساختار زبر، متراکم و غنی از چین‌وچروک دارد. ساختار چروکیده موجب افزایش مقدار تورم شده و تراکم زیاد چین‌وچروک در هم‌رونده در سطح، باعث افزایش مقاومت در برابر تنش می‌شود و استحکام ساختاری نانوکامپوزیت را افزایش می‌دهد. تصاویر میکروسکوپ پویشی محیطی، نشانگر سطح نمونه در حالت تر و پس از تورم است. وجود حفره‌ها در ساختار، نشانگر ایجاد ساختار شبکه‌ای و وجود مکان‌هایی برای تجمع و نگهداری محلول است. همچنین اتصالات عرضی بین زنجیرهای پلیمری به وضوح قابل دیدن است. بنابراین مطابق این تصویر، ساختار شبکه‌ای، سه‌بعدی و متخلخل در نانوکامپوزیت سنتز شده قابل تأیید است. نتایج آزمون EDS در شکل ۴ (c) نشان‌دهنده وجود عناصر کربن، اکسیژن، گوگرد، نیتروژن و کبالت در ساختار نانوکامپوزیت است. با توجه به جنس و ماهیت آلی زنجیرهای پلیمری در هیدروژل وجود کربن، اکسیژن، گوگرد و نیتروژن توجیه‌پذیر است. وجود کبالت نیز در این آزمون، تأیید دیگری بر تشکیل نانوکامپوزیت است.

گرم‌اوزن‌سنجی

یکی از مهم‌ترین نقاط ضعف استفاده از پلیمرها در مخازن نفتی، پایداری کم این مواد در شرایط سخت مخزن است، بنابراین پایداری گرمایی نانوکامپوزیت ساخته‌شده از مهم‌ترین عوامل در اثربخشی استفاده از آن در مخازن نفتی با دمای زیاد است. برای بررسی پایداری گرمایی ماده سنتز شده و مطالعه اثر افزودن نانوذره کبالت از آزمون گرم‌اوزن‌سنجی برای هیدروژل بدون نانوذره و نانوکامپوزیت سنتز شده بین دمای محیط و 50°C استفاده شد. طبق شکل ۵، با افزایش دما ساختار هر دو نمونه در سه مرحله تخریب شده و کاهش وزن داشته‌اند. اما، نانوذرات کبالت در ساختار هیدروژل مانند عایق گرمایی عمل کرده، سرعت تخریب را کاهش داده‌اند. بنابراین، در محدوده دمایی مخازن آبرگرم (150°C – 80°C)، هیدروژل بدون نانوذره، شروع به تخریب می‌کند و ۷٪ کاهش وزن دارد، در حالی که نانوکامپوزیت طراحی شده تا دمای 150°C کمتر از ۰/۶٪ کاهش وزن دارد و مراحل تخریب آن از دمای بیش از 190°C شروع می‌شود. تعداد و محدوده تخریب در نمونه‌ها با استفاده از مشتق منحنی کاهش

تعادلی نانوکامپوزیت هیدروژلی کاهش می‌یابد:

$$ESR = \frac{m_s - m_0}{m_0} \quad (1)$$

در این معادله، m_s وزن نهایی پس از تورم کامل و m_0 وزن نمونه خشک پیش از غوطه‌وری در آب است [۳۹].

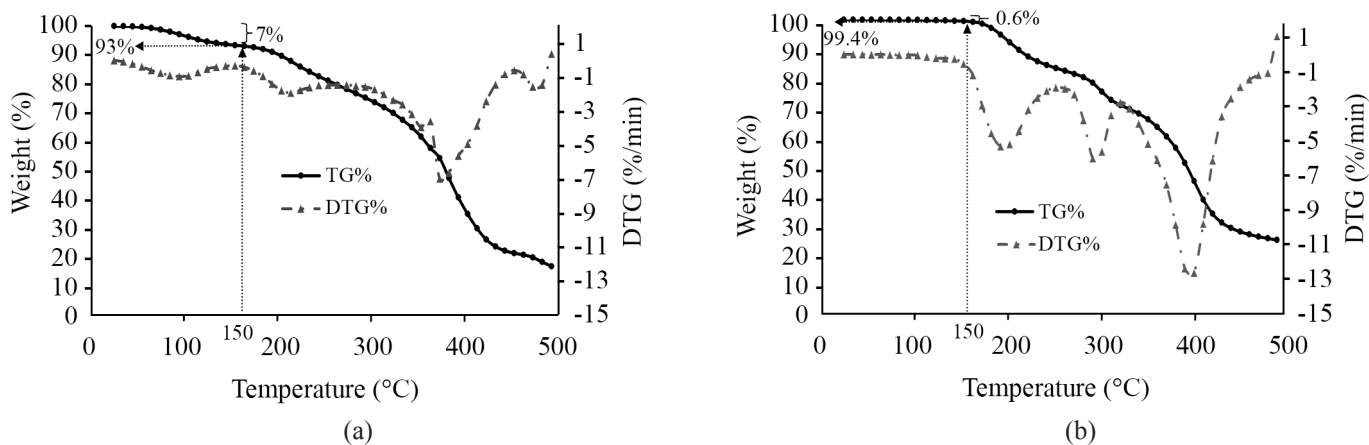
آزمون رئولوژیکی

خواص رئولوژیکی نانوکامپوزیت سنتز شده در 90°C با آزمون‌های جاروب کرنش و بسامد مطالعه شد. دلیل اهمیت آزمون‌های رئولوژیکی قرار گرفتن نانوکامپوزیت تحت کرنش و تنش‌های متوالی هنگام تزریق ماده شیمیایی درون مخزن و عبور آن از خلل و فرج موجود در محیط متخلخل سازند است. کارایی نانوکامپوزیت برای کنترل ماسه در مخازن به توانمندی حفظ ساختار در دمای مخزن تحت کرنش و تنش‌های متوالی بستگی دارد. بر اساس نتایج شکل ۶ (a) که به آزمون جاروب کرنش در بسامد ثابت ۱ Hz و دمای 90°C مربوط است، در کرنش‌های بین ۰/۱٪ تا ۲۰٪ مقادیر مدول کشسانی به مراتب بیشتر از مدول گرانرو بوده و با تغییر کرنش، مقادیر آن‌ها تغییر نمی‌کند. این موضوع نشانگر مقاومت ساختاری زیاد و رفتار گرانروکشسان خطی در این محدوده است. با افزایش بیشتر کرنش، مدول کشسانی شروع به کاهش می‌کند و مدل گرانرو به سرعت افزایش می‌یابد تا اینکه در کرنش ۱۵۰٪ مدول گرانرو از مدول کشسانی پیشی می‌گیرد و ژل دچار پارگی می‌شود. آزمون جاروب بسامد در کرنش ثابت ۱٪ و دمای 90°C ، در بسامدهای ۰/۱ Hz تا

وزن (DTG) بررسی شد. طبق نتایج برای نانوکامپوزیت سنتز شده، مرحله اول تخریب در محدوده 195°C تا 260°C به دلیل تخریب گروه‌های هیدروکسیلی و سولفونیک اسیدی رخ می‌دهد. مرحله دوم به دلیل تخریب گروه‌های آمیدی در بازه‌های 270°C و 330°C و مرحله سوم تخریب مربوط به تخریب گروه کربوکسیلی و زنجیر اصلی پلیمر در بازه 360°C تا 430°C رخ می‌دهد.

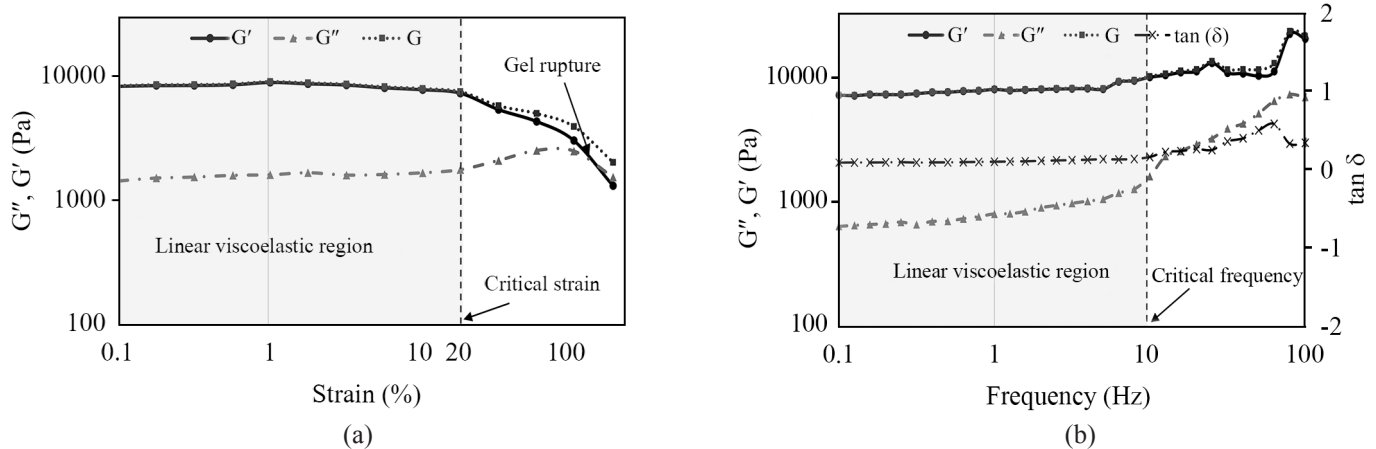
آزمون تورم تعادلی

نانوکامپوزیت سنتز شده به دلیل داشتن اتصال‌های عرضی و ساختار متخلخل که در بخش‌های قبلی مشاهده شد، قابلیت نگهداری حلال در ساختار خود را دارد. برای مطالعه مقدار قابلیت تورم نانوکامپوزیت سنتز شده و بررسی اثر دما و شوری بر کارایی آن از آزمون تورم تعادلی استفاده شد. بدین منظور، مقدار مشخصی ماده سنتز شده، وزن شده و درون کیسه تراوا با مش $50 \mu\text{m}$ قرار داده شد. سپس، نمونه در دمای محیط تا 90°C درون آب مقطر و محلول آب سازند با شوری ۲۰۰۰۰۰ ppm قرار گرفت. وزن نانوکامپوزیت پیش از غوطه‌وری درون محلول و در انتهای آزمایش پس از رسیدن به مقدار تورم نهایی اندازه‌گیری شده و نسبت تورم تعادلی نانوکامپوزیت از معادله (۱) محاسبه شد. طبق نتایج مقدار تورم تعادلی در آب مقطر و آب شور با افزایش دما از 25°C به 90°C به ترتیب از ۱۱/۵ و ۳/۹ به ۸۶/۵ و ۱۳/۴ افزایش یافت. دلیل کاهش تورم تعادلی با افزایش شوری، افزایش غلظت یون‌های متحرک در محلول با افزایش مقدار نمک است. طبق نظریه فلوری افزایش غلظت یون‌ها موجب کاهش فشار اسمزی برای تورم ژل می‌شود در نتیجه سرعت تورم و مقدار تورم



شکل ۵- دمانگاشت‌ها برای (a) هیدروژل بدون نانوذرات و (b) نانوکامپوزیت هیدروژلی در محدوده دمای 35°C تا 500°C .

Fig. 5. Thermograms for (a) hydrogel without nanoparticle and (b) hydrogel nanocomposite in the temperature range of 35°C to 500°C .



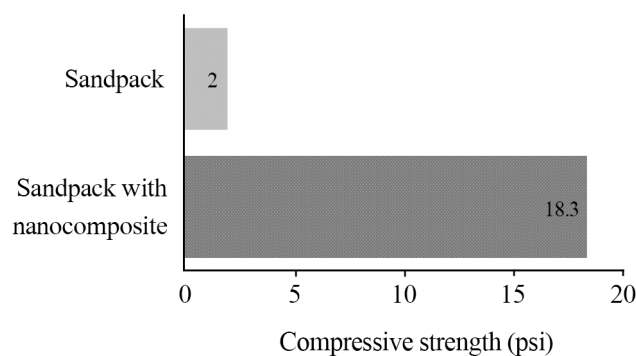
شکل ۶- (a) نتایج آزمون جاروب کرنش در بسامد ثابت ۱ Hz و کرنش‌های بین ۰/۱٪ تا ۲۰۰٪ و (b) نتایج آزمون جاروب کرنش ثابت ۱٪ و بسامدهای ۰/۱ Hz تا ۱۰۰ Hz.

Fig. 6. (a) Strain sweep test results at a constant frequency of 1 Hz and strains between 0.1% and 200% and (b) Frequency sweep test results at a constant strain of 1% and frequencies between 0.1 and 100 Hz.

۲۴ h در شرایط دمایی مخزن قرار داده شد تا فرصت کافی به نانوکامپوزیت برای برهم‌کنش با ماسه‌های موجود در بستر شنی به منظور استحکام‌بخشی به آن داده شود. پس از آن هر دو بستر شنی در آزمون استحکام فشاری محوری قرار گرفتند. نتایج شکل ۷ نشانگر افزایش ۷۳٪ در استحکام بستر شنی و رسیدن استحکام آن از ۲/۲ psi به ۱۸/۳ psi است.

آزمون سیلاب‌زنی شیمیایی

مقدار کارایی نانوکامپوزیت در کاهش تولید ماسه در برابر جریان سیال با آزمون سیلاب‌زنی شیمیایی بستر شنی انجام شد. بدین منظور بستر شنی ساخته‌شده مطابق فرایند شرح داده‌شده، در سرعت‌های



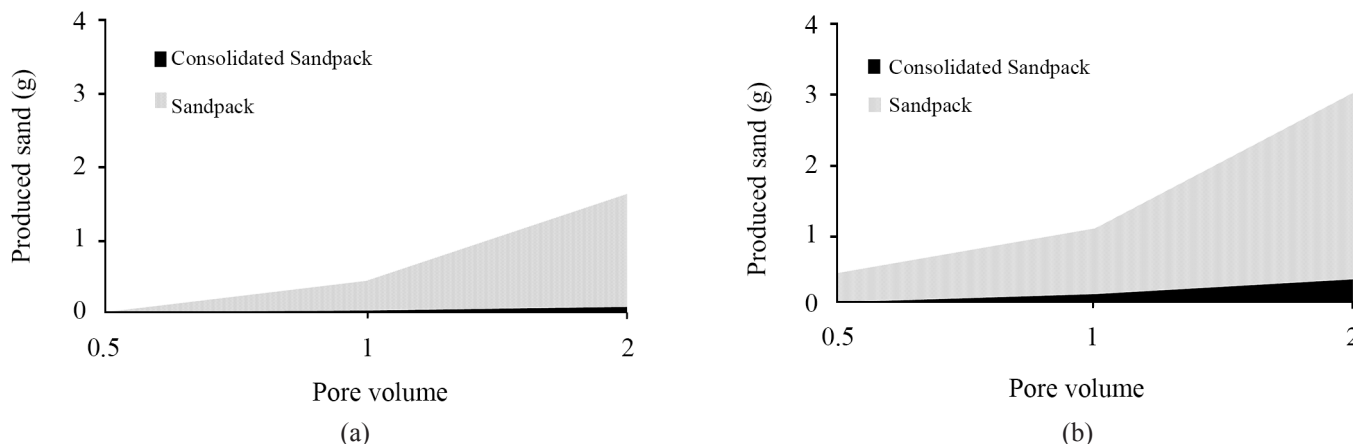
شکل ۷- اثر تزریق نانوکامپوزیت بر استحکام فشاری محوری.

Fig. 7. Effect of nanocomposite injection on axial compressive strength.

۱۰۰ Hz، به منظور بررسی اثر اعمال کرنش‌های پی‌درپی انجام شد. طبق نتایج شکل ۶ (b)، نانوکامپوزیت سنتزی در بسامدهای ۰/۱ Hz تا ۱۰ Hz، رفتار گران‌روکشسان خطی نشان داده است، مقادیر مدول کشسانی به مراتب بیشتر از مدول گران‌رو بوده و شیب تغییرات آن‌ها نسبت به تغییرات بسامد کمتر از ۲ است. این موضوع نشان‌دهنده حفظ استحکام ساختاری و تشکیل ساختار سه‌بعدی مستحکم در نانوکامپوزیت است. قرارگرفتن تانژانت دلتا در مقادیر کمتر از ۱ در طول آزمون، نشانگر حفظ ساختار گران‌روکشسان بین بسامدهای ۰/۱ Hz تا ۱۰۰ Hz است. در بسامدهای بیش از ۱۰ Hz سرعت افزایش مدول گران‌رو افزایش می‌یابد و ماده سنتز شده از رفتار گران‌روکشسان خطی فاصله می‌گیرد. بنابراین با توجه به آزمون‌های رئولوژیکی انجام‌شده قابلیت نانوکامپوزیت سنتز شده برای حفظ ساختار گران‌روکشسان تحت فرایندهای تزریق و جاگیری تأیید شد. با توجه به مقایسه استحکام ساختاری نمونه طراحی‌شده با ساختارهای مشابه که دارای یک اتصال‌دهنده عرضی بودند، وجود اتصال‌دهنده عرضی دوگانه را می‌توان از دلایل استحکام ساختاری زیاد نمونه سنتز شده، عنوان کرد.

آزمون استحکام فشاری

اثر تزریق نانوکامپوزیت در افزایش استحکام سازند، با آزمون استحکام فشاری اندازه‌گیری شد. بدین منظور دو بستر شنی با شرایط یکسان که در بخش روش‌شناسی آزمایش‌ها شرح داده‌شده ساخته شد. یکی از بسترهای شنی تحت تزریق نانوکامپوزیت قرار گرفت و



شکل ۸- اثر تزریق نانوکامپوزیت بر تولید ماسه از بستر شنی: (a) سرعت جریان ۱۵۰ mL/h و (b) سرعت جریان ۳۰۰ mL/h.
 Fig. 8. The effect of nanocomposite injection on sand production from sandpack (a) 150 mL/h flow rate and (b) 300 mL/h flow rate.

می‌شوند. هر یک از سازوکارهای نام‌برده مزایا و معایبی دارند که بر اساس شرایط مخزن و سیال آن استفاده می‌شوند. سازوکار تغییر نیروی الکتروستاتیک استحکام سازند را افزایش می‌دهد و به دلیل استفاده از نانوسیالات در این روش موجب کاهش تراوایی نمی‌شود، اما این روش به شدت تحت تأثیر pH و یون‌های موجود درون سازند است و اثر کمی در افزایش استحکام سازند دارد. روش تزریق موادی برای انجام واکنش شیمیایی با ذرات ماسه، عمق نفوذ مناسبی دارد و موجب افزایش مطلوب استحکام می‌شود. اما به دلیل انجام واکنش در محیط سازند، این روش به شدت تحت تأثیر محیط سازند است و فقط با نوع خاصی از سنگ‌های سازند واکنش می‌دهند.

سازوکار سوم تزریق مواد پلیمری برای ایجاد پوشش روی سازند و چسباندن ذرات ماسه به یکدیگر است. استفاده از رزین‌ها، پلیمرهای درجا و هیدروژل‌های از پیش‌ساخته در این دسته قرار می‌گیرند، رزین‌ها با وجود افزایش مناسب استحکام سازند موجب کاهش شدید تراوایی می‌شوند، پلیمرهای درجا نیز به شدت تحت تأثیر مواد شرایط درون سازند هستند. اما هیدروژل‌های از پیش‌ساخته که در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند، به دلیل شکل‌گیری خارج از محیط سازند، ریسک عملیاتی کمی دارند اما با کاستی‌هایی در استحکام ساختاری و پایداری گرمایی روبه‌رو هستند. از این‌رو، استفاده از نانوذرات در ساختار هیدروژل‌ها موجب افزایش پایداری گرمایی و استحکام ساختاری ماده سنتز شده می‌شود. در جدول ۱ نتایج کاهش تولید ماسه هنگام استفاده از نانوکامپوزیت سنتز شده با نتایج پژوهش‌های پیشین مقایسه شده است.

۱۵۰ و ۳۰۰ mL/h تحت تزریق آب در مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ PV قرار گرفت و مقدار ماسه تولید شده اندازه‌گیری شد. سپس به بستر شنی دیگری که در مشخصاتی همانند بستر شنی قبلی، ساخته شده بود، ۰/۵ PV نانوکامپوزیت با غلظت ۱٪ تزریق شد و سپس تحت جریان آب با سرعت‌هایی مشابه مرحله قبل قرار گرفت و مطابق مرحله پیش در حجم‌های تزریق مختلف، مقدار ماسه خروجی اندازه‌گیری شد. مطابق نتایج نشان داده شده در شکل ۸، پس از تزریق نانوکامپوزیت با تزریق آب در سرعت‌ها و حجم‌های مختلف مقدار تولید ماسه به شدت کاهش یافته است. پس می‌توان نتیجه گرفت، با تزریق نانوکامپوزیت چسبندگی ذرات ماسه و استحکام بستر شنی بدون آسیب جدی به سازند، افزایش یافته است.

مقایسه نتایج با پژوهش‌های پیشین

تولید ماسه یکی از چالش‌برانگیزترین مشکلات صنعت نفت و گاز است که موجب مشکلات متعدد عملیاتی می‌شود. بنابراین، پژوهش‌های گسترده‌ای درباره کنترل یا کاهش تولید ماسه انجام شده و روش‌های مختلفی بدین منظور توسعه یافته است. با توجه به محدودیت‌های ذکر شده برای روش‌های مکانیکی، روش‌های شیمیایی افزایش استحکام سازند مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های شیمیایی با سه سازوکار: (الف) افزایش نیروی الکتروستاتیک بین ذرات ماسه و سنگ مخزن، (ب) انجام واکنش شیمیایی بین ذرات ماسه برای ایجاد پیوند کووالانسی بین ذرات و (ج) پوشش‌دهی سطح ذرات ماسه و سازند با لایه‌ای از پلیمر یا ژل برای جلوگیری از خوردگی سایشی و چسباندن ذرات به یکدیگر، مانع تولید ماسه

جدول ۱- مقایسه نتایج تولید ماسه از بستر شنی تقویت شده با نانوکامپوزیت سنتز شده در این پژوهش با پژوهش های پیشین.

Table 1. Comparing the results of sand production from sandpack reinforced with nanocomposite synthesized in this research with previous researchs.

Topic	Method	Material	Reduction of sand production (%)	Ref.
Reduction of fines migration by nanofluids injection: an experimental study	Nanofluid	MgO	15	40
New low-cost resin system for sand and water control	Polymer	Furan resin	60	41
Thermal and mechanical evaluation of the stability of recycled poly(ethylene terephthalate) applied as sand control agent in petroleum wells	Polymer	poly(ethylene terephthalate)	75	42
Modifying the zeta potential of formation fines utilizing chemical treatment: An alternative to sand control to increase productivity: A colombian field application	Polymer	low molecular weight organosilanes	90	43
Sand control: Experimental performance of polyacrylamide hydrogels	Polymer gel	Sulfonated polyacrylamide copolymer Hydrogel	91	39
This work	Polymer nanocomposite	Cobalt nanocomposite hydrogel based on acrylamide	95	This work

نتیجه گیری

تصاویر میکروسکوپ پویشی محیطی ایجاد حفره‌هایی برای نگهداری آب و تشکیل ساختار سه‌بعدی، غنی از حفره و متخلخل را تأیید کرد. به دلیل اهمیت پایداری گرمایی نانوکامپوزیت در شرایط مخازن دمازیاد، آزمون گرماوزن‌سنجی انجام شد. نتایج این آزمون نشانگر تخریب‌نشدن ساختار تا حداکثر دمای مخازن نفتی یعنی حدود 150°C است که پایداری گرمایی نانوکامپوزیت در این شرایط دمایی با کاهش وزن کمتر از 0.6% تأیید شد. آزمون‌های جاروب کرنش و جاروب بسامد ایجاد ساختار مستحکم و سه‌بعدی را نشان داده و حفظ رفتار گران‌روکشسان خطی در دمای 90°C ، کرنش‌های بین $1/0$ تا 20% و بسامدهای بین $1/0$ Hz تا 10 Hz را ثابت کرده است. به منظور بررسی اثربخشی تزریق نانوکامپوزیت بر استحکام بخشی به سازند، در آزمون استحکام فشاری نشان داده شد، تزریق 0.5 PV نانوکامپوزیت موجب افزایش 73% مقاومت فشاری بستر شنی می‌شود. از آزمون سیلاب‌زنی شیمیایی برای بررسی مقدار کارایی

در این مطالعه با کولیمیرشدن مونومرهای ۲-آکریل آمید و ۲-متیل پروپان سولفونیک و آکرلیک اسید، با عامل ایجاد اتصال عرضی دوگانه پلی اتیلن ایمین و متیل بیس آکریل آمید و نانوذرات کبالت، نانوکامپوزیت هیدروژلی $\text{Co[AM-AMPS-AAC]/PEI-MBA(CO)}$ بر پایه آکریل آمید، به منظور جلوگیری و کنترل تولید ماسه در مخازن نفتی طراحی و سنتز شد. طبق نتایج پراش پرتو X نانوذرات به طور همگن درون ساختار بی شکل هیدروژل پخش شده‌اند. بنابراین با تشکیل ساختار ورقه‌ای شده، حداکثر هم‌افزایی اثر نانوذرات و هیدروژل به دست آمد. آزمون FTIR تشکیل پیوند شیمیایی بین مونومرهای مختلف و عوامل ایجاد اتصال عرضی را تأیید کرد. در تصاویر میکروسکوپی از نانوکامپوزیت در حالت خشک، ساختار چگال، همگن، لایه‌ای و غنی از چین و چروک دیده شد. پس از تورم

ماسه هنگام استفاده از نانوکامپوزیت سنتز شده با پژوهش قبلی مشابه، نانوکامپوزیت طراحی شده به هنگام تزریق، جاگیری و شرایط سخت مخزن ساختار خود را حفظ کرده و موجب افزایش استحکام آن و کاهش شدید تولید ماسه می شود. بنابراین، می توان از آن به عنوان گزینه مناسبی برای استحکام بخشی به سازند نام برد.

نانوکامپوزیت در کاهش تولید ماسه در برابر جریان سیال استفاده شد و طبق نتایج افزودن نانوکامپوزیت، مقدار تولید ماسه را بدون آسیب به سازند، به شدت کاهش داد. به عبارت دیگر، در سرعت های جریان ۱۵۰ و ۳۰۰ mL/h مقدار تولید ماسه به ترتیب به ۱۳ و ۵٪ تولید اولیه ماسه رسید. با توجه به مقایسه نتایج افزایش استحکام و کاهش تولید

مراجع

- Alvarado V. and Manrique E., Enhanced Oil Recovery: An Update Review, *Energies*, **3**, 1529-1575, 2010.
- Elsharafi M. and Bai B., Minimizing Formation Damage for Preformed Particle Gels in Mature Reservoirs, *Society of Petroleum Engineers-SPE Asia Pacific Enhanced Oil Recovery Conference, EORC 2015* 811-842, 2015.
- Khasanov M.M., Lezhnev K.E., Pashkin V.D., and Roshchektaev A.P., Application of the New Multi-Component Suspension Model for Skin-Factor Evaluating on the Wells Equipped with Gravel Packs, *Neftyanoe Khozyaystvo-Oil Industry*, **2018**, 63-67, 2018.
- Semnani R.H., Salehi M.B., Mokhtarani B., Sharifi A., Mirzaei M., and Taghikhani V., Evaluation of the Interfacial Activity of Imidazolium-Based Ionic Liquids and Their Application in Enhanced Oil Recovery Process, *J. Molecul. Liq.*, **362**, 2022.
- Madadzadeh A., Sadeghein A., and Riahi S., The Use of Nanotechnology to Prevent and Mitigate Fine Migration: A Comprehensive Review, *Rev. Chem. Eng.*, **38**, 1-16, 2022.
- Miri R., Haftani M., and Nouri A., A Review of Fines Migration Around Steam Assisted Gravity Drainage wellbores. *J. Pet. Sci. Eng.*, **205**, 108868, 2021.
- Ben Mahmud H., Leong V.H., and Lestariono Y., Sand Production: A Smart Control Framework for Risk Mitigation, *Petroleum* **6**, 1-13, 2020.
- Shahsavari M.H., Khomechi E., Fattahpour V., and Molladavoodi H., Investigation of Sand Production Prediction Shortcomings in Terms of Numerical Uncertainties and Experimental Simplifications, *J. Pet. Sci. Eng.*, **207**, 2021.
- Tahirov T., El-Wakeel W., Mohiuldin G., Whaley K., Jackson P., Olinger M., Mansour M., and Elshafaie I., Sand Control Completions for Raven Field in Egypt, *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, May 2019.
- Oyeneyin B., Sand Control Completion Strategy, *Develop. Pet. Sci.*, **63**, 191-223, 2015.
- Qi N., Li B., Cai W., Li X., and Gao C., An Optimal Degrading Agent Formulation for Detachable Packing Screens Applicable for Screenless Sand Control, *J. Pet. Sci. Eng.*, **162**, 813-821, 2018.
- Salehi M.B., Moghadam A.M., and Marandi S.Z., Polyacrylamide Hydrogel Application in Sand Control with Compressive Strength Testing, *Pet. Sci.*, **16**, 94-104, 2019.
- Wick W., Taneja S., Gupta I., Sondergeld C.H., and Rai C.S., Chemically Induced Formation Damage in Shale, *Petrophysics* **61**, 239-249, 2020.
- Song T., Feng Q., Schuman T., Cao J., and Bai B., A Novel Branched Polymer Gel System with Delayed Gelation Property for Conformance Control, *SPE J.*, **27**, 105-115, 2022.
- Talaghat M.R., Esmaeilzadeh F., and Mowla D., Sand Production Control by Chemical Consolidation, *J. Pet. Sci. Eng.*, **67**, 34-40, 2009.
- Krishnan M.R., Aldawsari Y., Michael F.M., Li W., and Alsharaeh E.H., Mechanically Reinforced Polystyrene-Polymethyl Methacrylate Copolymer-Graphene and Epoxy-Graphene Composites Dual-Coated Sand Proppants for Hydraulic Fracture Operations, *J. Pet. Sci. Eng.*, **196**, 2021.
- Zhang F., Ouyang J., Ma X., and Feng X., A New Phenolic Resin for in Sand Control Wells, *Chem. Tech. Fuels Oils*, **49**, 425-429, 2013.
- Zhao X., Qiu Z., Gao J., Ren X., Li J., and Huang W., Mechanism and Effect of Nanoparticles on Controlling Fines Migration in Unconsolidated Sandstone Formations, *SPE J.*, **26**, 3819-3831, 2021.
- Hasannejad R., Pourafshary P., Vatani A., and Sameni A., Application of Silica Nanofluid to Control Initiation of Fines Migration, *Pet. Explor. Develop.*, **44**, 850-859, 2017.

20. Khalil M., Aulia G., Budianto E., Mohamed Jan B., Habib S.H., Amir Z., and Abdul Patah M.F., Surface-Functionalized Superparamagnetic Nanoparticles SPNs for Enhanced Oil Recovery: Effects of Surface Modifiers and Their Architectures. *ACS Omega* **4**, 21477-21486, 2019.
21. Mansouri M., Nakhaee A., and Pourafshary P., Effect of SiO₂ Nanoparticles on Fines Stabilization during Low Salinity Water Flooding in Sandstones, *J. Pet. Sci. Eng.*, **174**, 637-648, 2019.
22. Al-Muntasheri G.A., Zitha P.L.J., and Nasr-El-Din H.A., A New Organic Gel System for Water Control: A Computed Tomography Study, *SPE J.*, **15**, 197-207, 2010.
23. Abedi Lenji M., Vafaie Sefti M., Baghban Salehi M., Mousavi Moghadam A., and Naderi H., Gelation Time of Hexamethylenetetramine Polymer Gels Used in Water Shutoff Treatment. *J. Pet. Sci. Technol.*, **2**, 3-11, 2012.
24. Aqcheli F., Salehi M.B., Pahlevani H., and Taghikhani V., Rheological Properties and the Micromodel Investigation of Nanosilica Gel-Reinforced Preformed Particle Gels Developed for Improved Oil Recovery, *J. Pet. Sci. Eng.*, 107258, 2020.
25. Aqcheli F., Baghban Salehi M., Taghikhani V., and Pahlevani H., Synthesis of a Custom-Made Suspension of Preformed Particle Gel with Improved Strength Properties and Its Application in the Enhancement of Oil Recovery in a Micromodel Scale, *J. Pet. Sci. Eng.*, **207**, 2021.
26. Saghandali F., Baghban Salehi M., Hosseinzadehsemnani R., Moghanloo R.G., and Taghikhani V., A Review on Chemical Sand Production Control Techniques in Oil Reservoirs, *Energy and Fuels*, 2022.
27. Aqcheli F., Salehi M.B., Pahlevani H., and Taghikhani V., Rheological Properties and the Micromodel Investigation of Nanosilica Gel-Reinforced Preformed Particle Gels Developed for Improved Oil Recovery, *J. Pet. Sci. Eng.*, **192**, 2020.
28. Abou Taleb M.F., Abou El Fadl F.I., and Albalwi H., Adsorption of Toxic Dye in Wastewater onto Magnetic NVP/CS Nanocomposite Hydrogels Synthesized Using Gamma Radiation, *Sep. Purif. Technol.*, **266**, 118551, 2021.
29. Rolo A.G., Vasilevskiy M.I., Conde O., Gomes M.J.M., Structural Properties of Ge Nano-Crystals Embedded in SiO₂ Films from X-ray Diffraction and Raman Spectroscopy, *Thin Solid Films*, **336**, 58-62, 1998.
30. Zhang F., Guo Z., Gao H., Li Y., Ren L., Shi L., and Wang L., Synthesis and Properties of Sepiolite/Polyacrylic Acid-co-Acrylamide Nanocomposites, *Polym. Bull.*, **55**, 419-428, 2005.
31. Pereira K.A.B., Oliveira P.F., Chaves I., Pedroni L.G., Oliveira L.A., and Mansur C.R.E., Rheological Properties of Nanocomposite Hydrogels Containing Aluminum and Zinc Oxides with Potential Application for Conformance Control, *Colloid. Polym. Sci.*, **300**, 609-624, 2022.
32. Meng X., Sun H., Zhu J., Bi H., Han Q., Graphene-Based Cobalt Sulfide Composite Hydrogel with Enhanced Electrochemical Properties for Supercapacitors, *New J. Chem.*, **3**, 2843-2849, 2016.
33. Salehi M.B., Moghadam A.M., and Jarraghan K., Effect of Network Parameters of Preformed Particle Gel on Structural Strength for Water Management, *SPE Prod. Oper.*, **35**, 362-372, 2020.
34. Zhao B., Jiang H., Lin Z., Xu S., Xie J., and Zhang A., Preparation of Acrylamide/Acrylic Acid Cellulose Hydrogels for the Adsorption of Heavy Metal Ions, *Carbohydr. Polym.*, **224**, 115022, 2019.
35. Kozhagulova A., Minh N.H., Zhao Y., and Fok S.C., Experimental and Analytical Investigation of Sand Production in Weak formations for Multiple Well Shut-Ins, *J. Pet. Sci. Eng.*, **195**, 107628, 2020.
36. Gomaa A.M. and Nasr-El-Din H.A., Effect of Elastic Properties on the Propagation of Gelled and In-Situ Gelled Acids in Carbonate Cores, *J. Pet. Sci. Eng.*, **127**, 101-108, 2015.
37. Ali J.A., Kolo K., Manshad A.K., and Stephen K.D., Emerging Applications of TiO₂/SiO₂/Polyacrylamide Nanocomposites within the Engineered Water EOR in Carbonate Reservoirs, *J. Molecul. Liq.*, **322**, 2021.
38. Mahmoud M., New Formulation for Sandstone Acidizing that Eliminates Sand Production Problems in Oil and Gas Sandstone Reservoirs, *J. Energy Resour. Technol.*, **139**, 042902, 2017.
39. Marandi S.Z., Salehi M.B., Moghadam A.M. Sand Control: Experimental Performance of Polyacrylamide Hydrogels, *J. Pet. Sci. Eng.*, 430-439, 2018.
40. Habibi A., Ahmadi M., Pourafshary P., Ayatollahi S., Al-Wahaibi Y., Reduction of Fines Migration by Nanofluids Injection: An Experimentol Study, *SPE J.*, **2**, 309-318, 2013.
41. Fader P.D., Surles B.W., Shotts N.J., Littlefield B.A., New Low-Cost Resin System for Sand and Water Control, *Proceedings of the 1992 Western Regional Meeting*, 259-264, 1992.
42. Pereira A.Z.I. and Delpech M.C., Thermal and Mechanical Evaluation of the Stability of Recycled Poly(ethylene terephthalate) Applied as Sand Control Agent in Petroleum

- Wells, *Polym. Degrad. Stabil.*, **7**, 1158-1163, 2012.
43. Jaimes M.G., Valencia D., Bahamon J.I., Mendoza A., and Medina C., Modifying the Zeta Potential of Formation Fines Utilizing Chemical Treatment: An Alternative to Sand Control

to Increase Productivity: A Colombian Field Application, *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference Proceedings*, 1494-1505, 2014.