

بررسی عملکرد هیدروژل نانوکامپوزیتی Co[AM-AMPS-MALIC-AAC]/PEI-MBA در کنترل تولید ماسه از مخازن نفتی

فرزین سقندلی^۱، مهسا باغبان صالحی^{۲*}، وحید تقی خانی^{۳**}

^۱دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
^۲پژوهشکده مهندسی نفت، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی، تهران، ایران

*Email: m.bsalehi@ccerci.ac.ir

**Email: taghikhani@sharif.edu

چکیده

تولید ماسه یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در تولید نفت و گاز از مخازن ماسه‌سنگی است. تولید ماسه موجب کاهش تراوایی، آسیب به سازند، خوردگی یا آسیب به تجهیزات تولیدی می‌شود. روش‌های مختلف مکانیکی و شیمیایی برای کنترل تولید ماسه استفاده می‌شوند. در بین روش‌های شیمیایی، استفاده از هیدروژل‌ها یک روش بهینه به شمار می‌رود اما به دلیل ضعف پایداری در شرایط سخت مخزن، استفاده از آن‌ها با محدودیت‌هایی روبه‌رو شده است. در همین راستا هیدروژل نانوکامپوزیتی Co[AM-AMPS-MALIC-AAC]/PEI-MBA با خواص بهبودیافته ویسکوالاستیک با اتصال دوگانه به‌منظور بهبود عملکرد کنترل تولید ماسه در شرایط مخازن ایران طراحی و ساخته شد. با استفاده از آزمون‌های تورم، رئولوژی و ریخت‌شناسی، به شناسایی ساختار و کارایی و پیش‌بینی عملکرد در محیط مخزن پرداخته شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، در دمای محیط (هنگام تزریق) و دمای مخزن (جایگیری در محیط متخلخل)، به ترتیب در آب مقطر، میزان بیشینه تورم ۸٫۵ و ۹۴ و در آب سازند، میزان بیشینه تورم ۵٫۴ و ۱۰٫۸ حاصل شد. علاوه بر آن با توجه به نتایج آزمون استحکام حرارتی، پایداری حرارتی نمونه تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تأیید شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های جاروب کرنش و جاروب فرکانس وجود ساختار مستحکم سه‌بعدی و ویسکوالاستیک تا کرنش ۱۰۰٪ و فرکانس ۱۰۰ هرتز را به‌خوبی تأیید می‌کند، که این خواص هیدروژل نانوکامپوزیتی مذکور را برای کاربرد در محیط متخلخل مناسب خواهد کرد.

واژگان کلیدی: هیدروژل، نانوکامپوزیت، کنترل تولید ماسه، استحکام ساختاری، رئولوژی.

مقدمه

بخش عمده‌ای از منابع هیدروکربنی در مخازن ماسه‌سنگی قرار گرفته‌اند، این مخازن به دلایل زمین‌شناسی استحکام کمی دارند، می‌توان گفت بیش از دو سوم منابع هیدروکربنی در مخازنی با استحکام کم قرار گرفته‌اند [۱،۲]. اکتشاف، حفاری، تولید و بهره‌برداری از این مخازن منجر به تولید ماسه می‌شود. تولید ماسه علت بروز مشکلات متعددی، از جمله خوردگی‌های سایشی شدید در تجهیزات تحت‌الارضی و سطحی، ایجاد پدیده چوک در چاه، مشکلات متعدد ایمنی همچون از دست رفتن کنترل چاه و آتش‌سوزی، تجمع ماسه در تجهیزات تفکیک‌کننده و کاهش ظرفیت آن‌ها، افزایش هزینه‌های عملیاتی، سرویس و نگهداری تجهیزات است [۳-۵]. مهم‌تر از همه تولید و مهاجرت ماسه موجب کاهش تراوایی مخزن در اطراف چاه و کاهش تولید نفت می‌شود. به دلیل مشکلات عنوان‌شده و سایر آثار مخربی که تولید و مهاجرت ماسه بر سیستم‌های بهره‌برداری، جمع‌آوری، جداسازی و خود سازند دارد شرکت‌های نفتی هزینه زیادی را صرف توسعه راهکارهای کنترل و مدیریت تولید ماسه می‌کنند [۶]. کلیه فرآیندها، فناوری‌ها و تجهیزات نصب‌شده، در مخازنی با تولید ماسه یا پتانسیل تولید ماسه باهدف پیشینه کردن تولید و کمینه کردن از هم پاشیدگی مخزن و کمینه کردن تولید و حرکت ماسه‌های درون مخزن، را کنترل ماسه می‌گویند. روش‌های کنترل ماسه به دو دسته کلی، فعال^۱ و غیرفعال^۲ تقسیم می‌شوند [۷]. روش‌های فعال روش‌های عمدتاً مکانیکی هستند که به جمع‌آوری ماسه‌های تولیدشده می‌پردازند، لذا در این روش‌ها تخریب سازند ادامه می‌یابد و صرفاً در این روش‌ها ماسه تولیدشده کنترل می‌شود [۸]، اما روش‌های غیرفعال روش‌های جدیدتری هستند که با تزریق مواد شیمیایی و تغییر در ویژگی‌های ماسه، سازند و افزایش ویژگی‌های مکانیکی سازند، مانع تولید و حرکت ماسه‌ها می‌شوند [۹،۱۰]. روش‌های مکانیکی متداول‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌های کنترل ماسه می‌باشند. مهم‌ترین معایب روش‌های مکانیکی را می‌توان، گرفتگی و

بسته شدن منافذ توری‌ها و آستری‌ها که باعث افت شدید فشار در طول توری و متعاقباً کاهش تولید می‌شود، نام برد، از دیگر مشکلات استفاده از روش‌های مکانیکی می‌توان به مشکلات ناشی از فرآیند بهره‌برداری و انتخاب مواد، مشکلات فراوان در فرآیند نصب این توری‌ها و تجهیزات بخصوص در چاه‌هایی با قطر کم، خوردگی توری‌ها و آستری‌ها به دلیل اسیدکاری و خوردگی سایشی شدید در مخازن گازی و همچنین قیمت بسیار بالای استفاده از این تجهیزات اشاره کرد، با توجه به مشکلات و محدودیت‌های ذکرشده و تداوم تخریب سازند در بسیاری از چاه‌ها امکان استفاده از روش‌های مکانیکی کنترل و مهار ماسه وجود ندارد و لذا استفاده از روش‌های شیمیایی جهت کنترل و تثبیت ماسه در این چاه‌ها موجب افزایش راندمان عملیات کنترل ماسه و کاهش هزینه‌های عملیاتی و تداوم تولید از چاه خواهد شد [۷]. در روش‌های شیمیایی، ماده شیمیایی به درون سازند تزریق می‌شود و این ماده با برهمکنش با سازند و ذرات ماسه درون آن موجب افزایش استحکام سازند شده و از تولید ماسه جلوگیری می‌کند [۱۱،۱۲]. بنابراین پیدا کردن ماده شیمیایی مناسب جهت تزریق به سازند، پتانسیل بیشتری از سایر روش‌ها در زمینه کنترل ماسه دارد. در دهه اخیر عملکرد نانو مواد در کنترل تولید ماسه مثبت ارزیابی شده است [۱۳]. نانو مواد با مکانیزم کاهش پتانسیل زتا [۱۴]، تغییر برهمکنش بین سطوح [۱۵]، و تغییر خواص سطحی ذرات ماسه مانع از تولید ماسه می‌شوند [۱۶]. تغییر در پتانسیل زتای ذرات ماسه، نیروی جاذبه بین آن‌ها را افزایش داده و موجب جلوگیری از تولید ماسه می‌شود. بدین منظور نانوذرات در اطراف ذرات ماسه تجمع پیدا می‌کنند و با تغییر نیروهای الکترواستاتیک در سطح ذرات، اختلاف پتانسیل بین ذرات و سیال تغییر می‌کند و نهایتاً این فرآیند موجب چسبیدن ذرات ماسه به همدیگر و کاهش تولید ماسه می‌شود. نانو ذرات مختلف مانند Al_2O_3 , MgO , SiO_2 , ZnO و ... به دلیل دارا بودن بار مثبت به هنگام افزوده شدن به سازند بر روی ذرات ماسه جذب می‌شوند و با کاهش بار منفی سطحی ذرات ماسه، موجب

² Passive¹ Active

هیدروژل‌ها مواد پلیمری هوشمند با ساختار سه‌بعدی هستند که عملکرد دوگانه در برابر نفت و آب دارند [۲۲] و استفاده از آن‌ها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است. هیدروژل‌ها به دو دسته درجا و از پیش تشکیل‌شده تقسیم می‌شوند. هیدروژل‌های درجا توسط باغبان صالحی و همکاران برای کنترل تولید ماسه استفاده شد [۲۳] و نتایج موفقیت‌آمیز داشت اما با توجه به اینکه در این روش فرآیند پلیمریزاسیون و تشکیل ساختار سه‌بعدی درون محیط سازند صورت می‌گیرد، لذا ایجاد ژل درجا شدیداً تحت تأثیر دما، فشار، شوری، pH و تنش‌های موجود در سازند است، عدم قطعیت در زمان ژل‌شدگی، جایگیری صحیح و میزان موفقیت در ایجاد ساختار سه‌بعدی، استفاده از روش‌های ژل‌شدگی درجا را با چالش‌های جدی روبرو می‌کند و موفقیت عملیات با ریسک بالایی مواجه است [۲۴]. راهکار ارائه‌شده برای برطرف کردن این چالش‌ها استفاده از ژل‌های از پیش‌ساخته تکه‌تکه شده است، این مواد ژل‌های کاملاً تشکیل‌شده‌ای هستند که به‌صورت پودرهای خشک‌شده، با آب مخلوط شده و درون سازند تزریق می‌شوند مهم‌ترین مزیت استفاده از این مواد سادگی فرآیند تزریق، جای‌گیری قابل‌کنترل و عدم وابستگی تشکیل ژل به شرایط مخزن است پس ژل‌های از پیش‌ساخته تکه‌تکه شده کاندیدای مناسب‌تری نسبت به ژل‌های درجا برای تزریق به مخزن نفت هستند [۲۵].

با توجه به توانمندی نانوذرات در افزایش استحکام سازند و از طرفی عملکرد هیدروژل در افزایش چسبندگی بین ذرات به علت ماهیت ساختاری، انتظار می‌رود که طراحی و ساخت نانو کامپوزیت پلیمری پیش‌ساخته شده یک جایگزین مناسب یا یک راه‌حل مناسب برای کنترل تولید ماسه باشد علاوه بر آن حضور نانو مواد در ساختار هیدروژل‌های از پیش تشکیل‌شده استحکام ساختاری و پایداری حرارتی را به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد و آن را برای استفاده در شرایط سخت مخزن مناسب می‌کند. خواص ترمودینامیکی تورمی یکی از مهم‌ترین عامل‌ها در عملکرد مناسب نانوکامپوزیت هیدروژلی در شرایط سخت مخزن (دما و شوری بالا) است، از دیدگاه ترمودینامیکی بر اساس قانون فلوری،

کاهش پتانسیل زتا شده و با تغییر دادن نیرو الکترواستاتیکی بین ذرات و سیال موجب چسبیدن آن‌ها به همدیگر شده و احتمال تولید و مهاجرت ذرات ماسه در سازند کاهش پیدا می‌کند [۱۵، ۱۷]. البته باید توجه کرد که استفاده از نانو مواد برای کنترل ماسه دارای مشکلاتی هست، مهم‌ترین چالش استفاده از نانو ذرات، کارایی آن‌ها در مخازنی با pH های مختلف و در حضور یون‌های است زیرا یون‌های باردار می‌توانند بر روی عملکرد نانو مواد اثر منفی بگذارند، از سوی دیگر باوجود اینکه نانوذرات موجب افزایش استحکام سازند بدون کاهش تراوایی می‌شوند اما میزان افزایش استحکام توسط این مواد بسیار اندک است و در تولید ماسه‌ها شدید، نانوذرات نمی‌توانند مانع تولید ماسه شوند. در نهایت می‌توان جمع‌بندی کرد که نانوذرات برای سازندهایی با تراوایی کم و تولید ماسه اندک کارایی دارند [۱۸].

دسته دیگری از مواد که در زمینه روش‌های شیمیایی کنترل ماسه کاربرد گسترده‌ای دارند، مواد پلیمری هستند. رزین‌ها اولین گروه مواد پلیمری بودند که باهدف استحکام‌بخشی به سازند از سال ۱۹۴۰ مورد استفاده قرار گرفتند. رزین‌ها جامدهای اورگانیک نرم تا سختی هستند که باهدف چسباندن ذرات ماسه به همدیگر و یا ایجاد پوشش محافظ در سازند مورد استفاده قرار می‌گیرند. رزین‌ها به دودسته گرماسخت و گرمانرم تقسیم می‌شوند، رزین‌های گرماسخت که شامل رزین‌های فنول، فوران، آمینو، اپوکسی و ... می‌شوند به هنگام قرار گرفتن در شرایط دمایی مخزن اتصالات عرضی پیدا کرده و سخت‌تر می‌شوند و با چسباندن ذرات ماسه به همدیگر مانع تولید ماسه می‌گردند [۱۹، ۲۰]. باوجود استفاده گسترده از رزین‌ها برای کنترل ماسه، کارایی آن‌ها همواره با مشکلات جدی روبرو بوده است، محدودیت رزین‌ها، کاهش شدید تراوایی مخزن و آسیب به مخزن است، علاوه بر آن مشکلات متعدد تزریق مانند تزریق چندمرحله‌ای، و نیاز به پمپ‌های ویژه به دلیل ویسکوزیته بالا، مشکلات در جای‌گیری صحیح رزین درون سازند قبل از سخت شدن، قیمت بالا و سمیت می‌توان اشاره داشت [۲۱]. با توجه به محدودیت‌های ذکر شده برای رزین‌ها، تمرکز بر روی استفاده از هیدروژل‌ها قرار گرفت.

در ساختار نانوکامپوزیت از نانو ذره Al_2O_3 ، (شرکت Neutrino) با اندازه ذرات ۱۰ الی ۲۰ نانومتر استفاده شد. مونومرهای AMPS، AM، مالئیک اسید و اکریلیک اسید به ترتیب با نسبت‌های وزنی ۱، ۰،۵، ۰،۲۵ و ۰،۲۵ به صورت جداگانه در دمای محیط در آب مقطر حل شدند. سپس درون حمام آب (دمای ۴۶ درجه سانتی‌گراد) با فاصله زمانی ۵ دقیقه به ترتیب به ظرف واکنش اضافه شد. مقدار ۱ درصد وزنی نانوذره در ۴ سی‌سی آب مقطر به مدت ۴۵ دقیقه درون دستگاه التراسونیک (Elma ultrasonic bath p300H) قرار داده شد تا محلول کاملاً همگن و دیسپرس شده از نانوسیال به دست آید. سوسپانسیون نانو سیال دیسپرس شده در دمای ۵۶ درجه سانتی‌گراد به صورت تدریجی به وسیله میکروپیپت (FOUR E'S SCIENTIFIC) با سرعت ۱ سی‌سی بر دقیقه به ظرف واکنش اضافه شد. در این مرحله دمای واکنش به تدریج به ۶۶ درجه سانتی‌گراد افزایش داده شد، سپس محلول اتصال‌دهندگان عرضی در مقدار ۱۰ درصدوزنی مونومرهای استفاده شده به صورت تدریجی و محلول در آب در دمای ۶۶ درجه سانتی‌گراد به محلول اصلی در حال هم زده شدن افزوده شد. برای شروع فرآیند پلیمریزاسون رادیکال آزاد، محلول ۵ درصد وزنی آغازگر APS، به محلول اصلی افزوده و دما تا ۷۶ درجه سانتی‌گراد افزایش داده شد. به منظور جلوگیری از حضور اکسیژن به هنگام پلیمریزاسیون کل فرآیند تحت جریان ثابتی از نیتروژن انجام شد. پس از فرآیند پلیمریزاسیون و تشکیل ژل، پس از طی Relaxation time به مدت ۲۴ ساعت نمونه ساخته شده به دفعات متعدد توسط آب شستشو شد تا از عدم حضور مونومر واکنش نداده در ساختار نانوکامپوزیت هیدروژلی، اطمینان حاصل شود. در نهایت نانوکامپوزیت ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت در آون خلا (Memmert) با دمای ۶۵ درجه قرار داده شد. قطعات نانوکامپوزیت هیدروژلی خشک شده با استفاده از آسیاب (Fritsch pellet mill) به ذراتی پودری با قطر ۱۵۰ میکرومتر آسیاب شد. شکل شماره ۱ مراحل آماده‌سازی نانوکامپوزیت هیدروژلی پیش ساخته را نمایش می‌دهد.

تورم بر اثر اختلاف فشار اسمزی بین شبکه ژلی و محلول الکترولیت بیرونی ایجاد می‌شود، افزایش نمک در حلال موجب افزایش غلظت یون‌های متحرک شده و این امر با کاهش فشار اسمزی، موجب کاهش تورم نانوکامپوزیت هیدروژلی می‌گردد [۲۶،۲۷]. دستیابی به میزان تورم مناسب در کنار حفظ استحکام ساختاری و حرارتی، قابلیت پیش‌بینی عملکرد مناسب با حداقل ریسک را فراهم می‌کند. استفاده از نانوذرات در ساختار هیدروژل‌ها موجب بهبود مشکلات مربوط به عدم پایداری هیدروژل‌ها در شرایط سخت مخزن مانند دمای و شوری بالا می‌شود [۲]. در این مقاله ذرات نانوکامپوزیت هیدروژلی از پیش ساخته شده، Co[AM- AMPS-MALIC-AAC]/PEI-MBA با نانوذرات Al طراحی شده و مورد آزمایش قرار گرفتند.

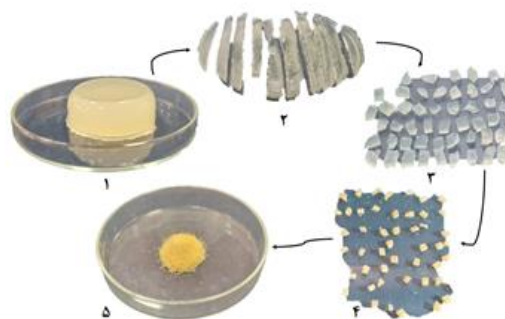
مواد و دستگاه‌ها

برای تولید نانوکامپوزیت‌های هیدروژلی، از مونومرهای اکریل آمید (Acrylamide)، ۲-اکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید (2-methylpropane-2-Acrylamido sulfonic acid (AMPS))، مالئیک اسید (Malic acid) و آکریلیک اسید (Acrylic acid) و پیونددهنده‌های عرضی (Cross linker) پلی‌اتیلن‌ایمین (Polyethylenimine (PEI)) و متیل بیس اکریل آمید (N,N'-Methylenebisacrylamide) و آغازگر آمونیوم پرسولفات (Ammonium persulfate (APS)) استفاده شد. اکریل آمید (AM)، مالیک اسید و متیل بیس اکریل آمید (MBA) مورد استفاده در این پژوهش به صورت جامد پودری و آکریلیک اسید به صورت مایع بی‌رنگ از شرکت مرک آلمان تهیه شدند. ۲-اکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید (AMPS) با درصد خلوص ۹۷ درصد، از شرکت Fisher Scientific تهیه شد. پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI) به عنوان اتصال‌دهنده عرضی دوم به صورت محلول آبی ۵۰ درصد وزنی از شرکت سیگما آلدیج خریداری شده است. آمونیوم پرسولفات (APS) از شرکت Exir Chemical تهیه شد. در تهیه همه نمونه‌ها از آب مقطر (Resistivity, 18.25 MΩcm) و آب سازند با شوری 210000 ppm استفاده شد.

به منظور مطالعه رفتار ویسکوالاستیک نمونه از تانژانت گاما مطابق رابطه ۳ استفاده شد.

$$\tan(\gamma) = \frac{G''}{G'} \quad 3$$

برای بررسی مورفولوژی و بررسی وجود ساختار متخلخل در نمونه‌ها از آزمون‌های SEM و EDS (دستگاه Tescan-VEGA, Czech) استفاده شده است.



شکل ۱- مراحل تشکیل نانوکامپوزیت هیدروژلی پیش ساخته
۱- نمونه ساخته شده ۲ و ۳- نمونه تر برش داده شده ۴- نمونه خشک شده ۵- نمونه پودر شده

برای مطالعه میزان قابلیت تورم و بررسی اثرات دما و شوری بر کارایی نمونه، از آزمون تورم تعادلی استفاده شده بدین منظور مقداری از ژل خشک وزن شده، و در کاغذ چای با توری اندازه ۱۰۰ میکرومتر ریخته و درب آن با دستگاه دوخت بسته می‌شود. بسته کاغذ چای محتوی ژل پلیمری خشک، درون آب مقطر و آب شور غوطه‌ور شده و در فواصل زمانی مشخص وزن سنجی می‌گردد، به منظور محاسبه نسبت تورم از رابطه‌ی ۱ که در آن W_0 وزن ژل پلیمری خشک پیش از تورم و W_s وزن هیدروژل پلیمری پس از تورم است، استفاده شد [۲۸].

$$ESR = \frac{W_s - W_0}{W_0} \quad 1$$

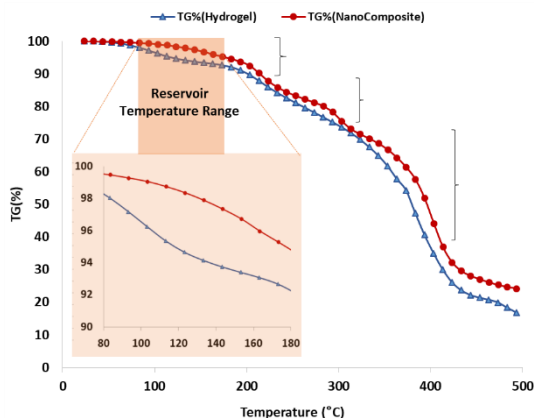
برای اندازه‌گیری پایداری حرارتی نمونه از آزمون TGA (دستگاه Netzsch-TGA 209 F1) استفاده شده است. در این پژوهش از رئومتر (Anton Paar Co. MCR301) ساخت کشور اتریش با قطر صفحات ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. در همین راستا از مدول مرکب (G^*) به عنوان نماد استحکام در برابر تنش خارجی اعمال شده استفاده شد. مدول مرکب از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود که در آن G' مدول ذخیره و G'' مدول ویسکوز می‌باشد [۲۳].

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad 2$$

نتایج و تحلیل

مطالعه تورم تعادلی

نانوکامپوزیت‌های هیدروژلی ساخته شده در این پژوهش، به دلیل دارا بودن اتصالات عرضی و ساختار سه‌بعدی، قابلیت نگهداری حلال در ساختار خود را دارند. عوامل مختلفی بر روی میزان توانایی تورمی هیدروژل اثرگذار هستند. میزان تورم هیدروژل با استفاده از نظریه شبکه‌ای فلوری محاسبه می‌شود در این نظریه با استفاده از اختلاف فشار اسمزی بین شبکه ژلی و محلول الکترولیت بیرونی مقدار تورم تخمین زده می‌شود. با افزایش غلظت نمک در حلال، میزان یون‌های موجود در محلول بیشتر شده و متعاقباً با کاهش فشار اسمزی، سرعت تورم و تورم تعادلی نانوکامپوزیت هیدروژلی کاهش پیدا می‌کند. در صورتی که نمک افزوده شده دارای یون‌های چند ظرفیتی باشد این یون‌ها جایگزین تعداد بیشتری یون تک‌ظرفیتی شده و فشار اسمزی بیشتر کاهش می‌یابد. در پژوهش پیش رو، نسبت تورم تعادلی در آب مقطر و آب شور، در دماهای محیط (۲۵) و مخزن (۹۰) برای نانوکامپوزیت‌های هیدروژلی ساخته شده بررسی شد. آزمون تورم تعادلی تا رسیدن به زمان تعادل (۴۵ روز) انجام پذیرفت. مطابق شکل ۱ افزایش دما در محیط آب مقطر و آب سازند، از دمای محیط (۲۵) درجه سانتی‌گراد) به دمای مخزن (۹۰) درجه سانتی‌گراد) موجب افزایش میزان تورم به ترتیب از ۸٫۵ به ۹۴ و از ۵٫۴ به ۱۰٫۸ شده است. مشاهده می‌شود افزایش دما



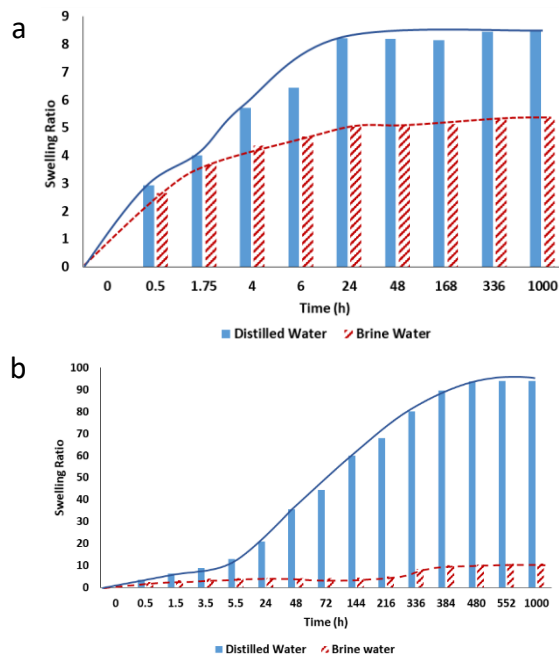
شکل ۳- نمودار توزین حرارتی (TGA) -Co[AM-AMPS- MALIC-AAC/PEI-MBA

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، کاهش وزن بین ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل از دست دادن آب جذب‌شده در سطح ذرات که به‌عنوان آب محدود نیز شناخته می‌شوند است، جرم نانوکامپوزیت پایدار خود را تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حفظ می‌کند. بین ۲۰۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد وزن کاهش زیادی پیدا می‌کند که این امر در نتیجه تجزیه حرارتی گروه آمید است. با این حال، پس از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، به دلیل تجزیه حرارتی گروه‌های کربوکسیلات و آمین به‌طور ناگهانی وزن شدیداً افت پیدا می‌کند، شایان به ذکر است بالاترین دمای تجزیه آن‌ها بین ۳۲۰ تا ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است با افزودن نانوذرات به هیدروژل، دمای تجزیه افزایش یافته، بنابراین، پایداری حرارتی نانوکامپوزیت با حضور نانومواد افزایش یافته است.

مطالعه خواص رئولوژیکی

با توجه به محیط عملکرد هیدروژل نانوکامپوزیتی ساخته شده درون مخزن نفتی و تنش‌های واردشده به آن‌ها به هنگام تزریق و عبور از خلل و فرج موجود در سازند، لازم است به‌منظور کنترل ماسه این مواد دارای استحکام ساختاری بالا بوده و خاصیت الاستیک خود را تحت دما و فشار بالای محیط عملیاتی حفظ کند. بدین منظور رفتار نانوکامپوزیت‌های هیدروژلی ساخته شده تحت کرنش و فرکانس با استفاده از

علاوه بر افزایش میزان تورم تعادلی موجب افزایش سرعت جذب نیز شده است.



شکل ۲- نمودار تورم تعادلی a- دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد b- دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد

مطالعه استحکام حرارتی

به دلیل دمای بالای مخازن نفت ایران، لازم است استحکام حرارتی نانوکامپوزیت ساخته شده مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۲ نتایج آزمون TGA را نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده سه مرحله کاهش وزن با افزایش دما دیده می‌شود، که تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد میزان کاهش وزن کمتر از ۰.۴٪ گزارش شده است. تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان کاهش وزن کمتر از ۰.۱۵٪ گزارش شده است، طبق نتایج افزودن نانوذرات به هیدروژل موجب تقویت پایداری حرارتی نانوکامپوزیت شده و موجب کارایی بهینه آن در شرایط سخت مخزن می‌شود. این موضوع نشانگر قابلیت بالای این ماده برای استفاده در مخازن نفتی با دمای بالا (۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) است.

نانوکامپوزیت طراحی و ساخته شده استحکام بالاتری از سایر هیدروژل‌های رایج دارد.

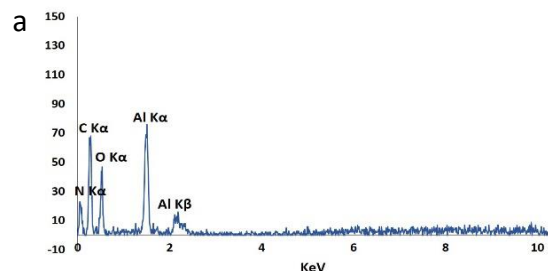
جدول ۱- مقایسه رئولوژی نانوکامپوزیت ساخته شده با هیدروژل‌های

رایج

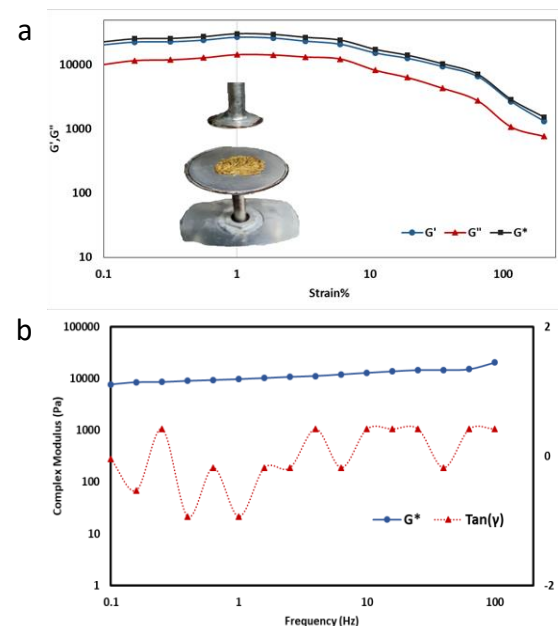
ساختار	دما (°C)	G'	رفرنس
Poly(AM-co-AA)/TEMED/CMC	۲۵	۱۲۰۰	[۲۹]
Poly(Acrylamide-co-Acrylic Acid)/Xanthan Gum (XG)	۲۵	۱۰۰۰	[۳۰]
Poly(AM-co-AMPS)/PEI	۹۰	۸۰۰۰	[۲۵]
Co[AM-AMPS-MALIC-AAC]/PEI-MBA	۹۰	۱۸۰۰۰	کار حاضر

مطالعه خواص ریخت‌شناسی

باهدف مطالعه میکروسکوپی ساختار هیدروژل نانوکامپوزیتی ساخته شده از آزمون SEM و EDS استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج EDS، نشانگر حضور کربن، اکسیژن و نیتروژن است که با توجه به ساختار هیدروژل حضور مواد نام‌برده شده توجیه‌پذیر است، همچنین حضور و پخش نانوذرات Al در ساختار نمونه تأیید شد علاوه بر آن بنا به نتایج آزمون SEM نمونه ساخته شده دارای ساختار متراکم و برگ‌گون (leaf like) است که این موضوع باعث ایجاد ساختار مستحکم و افزایش قابلیت تورم کنترل شده می‌شود.



آزمون‌های جاروب کرنش و جاروب فرکانس مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج نشان داده شده در شکل ۳، در کرنش‌های بین ۰٫۱٪ تا ۱۰۰٪ و فرکانس‌های بین ۱ تا ۱۰۰ هرتز نمونه رفتار ویسکوالاستیک خطی از خود نشان می‌دهند اما در کرنش‌های بالای ۱۰۰٪ و فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰ هرتز ساختار نانوکامپوزیت شروع به از دست دادن ساختار ویسکوالاستیک کرده و تخریب آن آغاز می‌شود و نمونه از حالت نیمه جامد به حالت مایع تبدیل می‌گردد. با توجه به اینکه نمونه ساخته شده تا مدول مرکب ۱۲ کیلوپاسکال در برابر تنش‌های وارد شده استحکام دارد، لذا در مقایسه با هیدروژل‌های سنتی استحکام ساختاری بسیار قابل قبولی دارد و این موضوع تضمین می‌کند نانوکامپوزیت Co[AM-AMPS-MALIC-AAC]/PEI-MBA استحکام کافی جهت حفظ ساختار خود داخل مخزن را دارد و تحت شرایط دمایی مخزن و تنش‌های وارد شده به آن به هنگام تزریق ساختار خود را از دست نمی‌دهد. مطابق شکل ۴-b $\tan(\gamma)$ به‌طور کلی مقادیر زیر ۲ دارد، که این موضوع نشان‌دهنده ساختار ویسکوالاستیک است، بنابراین در فرکانس‌های ۱ الی ۱۰۰ هرتز مدول الاستیک نسبت به مدول ویسکوز برتری دارد.



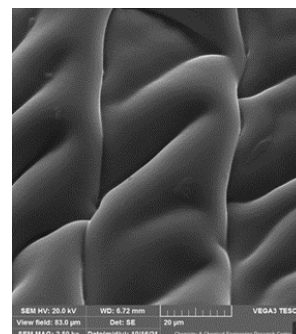
شکل ۴- a- نمودار جاروب کرنش b- نمودار جاروب فرکانس جدول شماره ۱ به مقایسه رئولوژی نانوکامپوزیت ساخته شده با هیدروژل‌های رایج پرداخته است، مشاهده می‌شود

ساختار سه‌بعدی و مستحکم در نمونه است، این موضوع موجب عدم‌تغییر شکل در فرآیند تزریق ماده شیمیایی به درون محیط متخلخل شده و از تولید ماسه جلوگیری می‌کند. هیدروژل نانوکامپوزیتی ساخته‌شده بر پایه آکریل آمید، آمونیوم پرسولفات، مالیک اسید و اکریلیک اسید با استفاده از اتصال دهندگان پلی‌اتیلن ایمین و متیل بیس اکریل آمید و نانوذرات آلومینیوم، با توجه به حفظ ساختار الاستیسیته تا کرنش ۱۲ کیلوپاسکال و پایداری حرارتی تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد پتانسیل لازم را برای کنترل ماسه در مخازن ایران دارد. به‌منظور بررسی عملکرد و اطمینان از حفظ خواص الاستیسیته در شرایط سخت مخزن درون محیط متخلخل، آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه و میکرومدل در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

منابع

- [1] Maduabuchi OF, Appah D, Okoro ES. Relative study of internal gravel packing and chemical sand consolidation: sand control techniques of Niger Delta wells. *Am J Eng Res* **2017**;6:261-8.
- [2] Saghandali F, Baghban Salehi M, Hosseinzadehsemnani R, Moghanloo RG, Taghikhani V. A Review on Chemical Sand Production Control Techniques in Oil Reservoirs. *Energy and Fuels* **2022**. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c00700>.
- [3] Miri R, Haftani M, Nouri A. A review of fines migration around Steam Assisted Gravity Drainage wellbores. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2021**;205:108868. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108868>.
- [4] Saurabh Mishra KO. Chemical Sand Consolidation: An Overview. *Journal of Petroleum Engineering & Technology* **2015**;5:21-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.37591/jo-pet.v5i2.2036>.
- [5] Kurawle IB, Mahalle NA, Kaul M, Nair AV, Kulkarni NJ. Silanol Resin

b



شکل ۵- a: EDS و تصویر میکروسکوپی نمونه ساخته‌شده با بزرگنمایی ۲۰ میکرومتر

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده نمونه ساخته‌شده استحکام ساختاری، پایداری حرارتی و ویسکوالاستیسیته بالا داشته و تورم خود را در آب مقطر و آب سازند حفظ می‌کند، لذا پتانسیل لازم جهت تزریق به سازند با هدف کنترل ماسه را دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش هیدروژل نانوکامپوزیتی Co[AM-AMPS- MALIC-AAC]/PEI-MBA با اتصال دوگانه و نانوذرات آلومینیوم جهت کنترل تولید و مهاجرت ماسه در مخازن نفتی طراحی و ساخته شد. رفتار تورمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در تضمین عملکرد هیدروژل نانوکامپوزیتی در شرایط سخت مخازن بررسی شد و با توجه به مقدار تورم ۱۰٫۸ در دمای و شوری مخزن، عملکرد مثبتی در جایگیری مناسب از خود نشان داده و ریسک تزریق ماده شیمیایی را کاهش داد. نتایج آزمون‌های ریخت‌شناسی مانند SEM، EDS نشانگر تشکیل ساختار متخلخل، سه‌بعدی، همگن و چگال در نمونه ساخته‌شده است. پایداری حرارتی نمونه تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شد، با توجه به کاهش ۴٪ وزن نمونه ساخته‌شده تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، استفاده از نمونه ساخته‌شده در شرایط دمایی مخازن نفتی امکان‌پذیر است. نتایج آزمون جاروب فرکانسی و جاروب کرنش نشانگر ایجاد

- 2020;61:239–49.
- [13] Zhao X, Qiu Z, Gao J, Ren X, Li J, Huang W. Mechanism and Effect of Nanoparticles on Controlling Fines Migration in Unconsolidated Sandstone Formations. *SPE Journal* **2021**;26:3819–31. <https://doi.org/10.2118/204474-pa>.
- [14] HASANNEJAD R, POURAFSHARY P, VATANI A, SAMENI A. Application of silica nanofluid to control initiation of fines migration. *Petroleum Exploration and Development* **2017**;44:850–9. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(17\)30096-4](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(17)30096-4).
- [15] Madadzadeh A, Sadeghein A, Riahi S. A Comparison of Different Nanoparticles' Effect on Fine Migration by Low Salinity Water Injection for Oil Recovery: Introducing an Optimum Condition. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME* **2022**;144. <https://doi.org/10.1115/1.4052415>.
- [16] Muneer R, Hashmet MR, Pourafshary P. Fine Migration Control in Sandstones: Surface Force Analysis and Application of DLVO Theory. *ACS Omega* **2020**.
- [17] Giraldo LJ, Diez R, Acevedo S, Cortés FB, Franco CA. The effects of chemical composition of fines and nanoparticles on inhibition of formation damage caused by fines migration: Insights through a simplex-centroid mixture design of experiments. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2021**;203. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108494>.
- [18] Mansouri M, Nakhaee A, Pourafshary P. Effect of SiO₂ nanoparticles on fines stabilization during low salinity water flooding in sandstones. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2019**;174:637–48. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.11.066>.
- [19] Abanum AM, Dulu A. Laboratory studies of chemicals for sand consolidation (scon) in the niger delta fields. Society of Petroleum Engineers - *37th Nigeria Annual Int Conf and Exhibition, NAICE 2013* - To Grow Africa's Oil and Gas Production: Required Policy, Funding, consolidation system for deepwater completions and production optimisation. *8th European Formation Damage Conference, Society of Petroleum Engineers*; **2009**.
- [6] Yan M, Deng J, Yu B, Li M, Zhang B, Xiao Q, et al. Comparative study on sanding characteristics between weakly consolidated sandstones and unconsolidated sandstones. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* **2020**;76. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103183>.
- [7] Oyenyin B. Integrated Sand Management for Effective Hydrocarbon Flow Assurance. Newnes; **2015**.
- [8] Yuan B, Moghanloo RG. Nanofluid pre-treatment, an effective strategy to improve the performance of low-salinity waterflooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2018**;165:978–91. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.11.032>.
- [9] Ma C, Deng J, Dong X, Sun D, Feng Z, Luo C, et al. A new laboratory protocol to study the plugging and sand control performance of sand control screens. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2020**;184. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106548>.
- [10] Wang C, Montero Pallares JD, Haftani M, Nouri A. Developing a methodology to characterize formation damage (pore plugging) due to fines migration in sand control tests. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2020**;186. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106793>.
- [11] Sun L, Li D, Pu W, Li L, Bai B, Han Q, et al. Combining preformed particle gel and curable resin-coated particles to control water production from high-temperature and high-salinity fractured producers. *SPE Journal* **2020**;25:938–50. <https://doi.org/10.2118/198887-PA>.
- [12] Wick W, Taneja S, Gupta I, Sondergeld CH, Rai CS. Chemically Induced Formation Damage in Shale. *Petrophysics*

- swelling: a review **2010**.
- [28] Zareie C, Sefti MV, Bahramian AR, Salehi MB. A polyacrylamide hydrogel for application at high temperature and salinity tolerance in temporary well plugging. *Iranian Polymer Journal* **2018**;27:577–87.
- [29] Jafarigol E, Salehi MB, Mortaheb HR. Synergetic effects of additives on structural properties of acrylamide-based hydrogel. *Journal of Dispersion Science and Technology* **2021**;42:910–9.
- [30] Jafarigol E, Afshar Ghotli R, Hajipour A, Pahlevani H, Baghban Salehi M. Tough dual-network GAMAAX hydrogel for the efficient removal of cadmium and nickel ions in wastewater treatment applications. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* **2021**;94:352–60. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.11.006>
- Technol, Techniques and Capabilities 2013;1:182–97. <https://doi.org/10.2118/167516-ms>.
- [20] Talaghat MR, Esmailzadeh F, Mowla D. Sand production control by chemical consolidation. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2009**;67:34–40. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.02.005>.
- [21] Zhang F, Ouyang J, Xintong M, Feng X. Synthesis of phenolic resin and its sand consolidation. *Advanced Materials Research* **2013**;647:774–6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.647.774>.
- [22] Luo Q, Tang K, Bai L, Li K, Sun P, Xu C, et al. Development of in-situ starch grafted copolymerized gels for conglomerate reservoir conformance control and oil recovery improvement. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2022**;210. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110005>.
- [23] Marandi SZ, Salehi MB, Moghadam AM. Sand control: Experimental performance of polyacrylamide hydrogels. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2018**;170:430–9. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.06.074>.
- [24] Aldhaheri M, Wei M, Zhang N, Bai B. Field design guidelines for gel strengths of profile-control gel treatments based on reservoir type. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2020**;194. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107482>.
- [25] Aqcheli F, Salehi MB, Pahlevani H, Taghikhani V. Rheological properties and the micromodel investigation of nanosilica gel-reinforced preformed particle gels developed for improved oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2020**;192:107258. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107258>.
- [26] Flory PJ. Principles of polymer chemistry. Cornell university press; **1953**.
- [27] Ganji F, Vasheghani FS, VASHEGHANI FE. Theoretical description of hydrogel