

## تأثیر ترکیب درصد مواد اولیه بر میزان تورم ذرات ژل از پیش تشکیل شده

حمیدرضا ثقفی<sup>۱\*</sup>، سید محمد جواد کاظمی<sup>۲</sup>

۱- تهران، پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز، دکترای مهندسی نفت

۲- تهران، پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز، کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

### چکیده

استفاده از ژل‌های پلیمری یکی از مورد اعتمادترین راه‌حل‌ها برای بهبود یکپارچگی تولید در مخازن ناهمگن به‌منظور داشتن بازده جاویدی بهتر است. در این مقاله، ذرات ژل از پیش تشکیل شده جدید برای کنترل یکپارچگی تولید در میدان نفتی بلال واقع در خلیج فارس تولید شده‌اند. در ساخت این ذرات، سه جزء مونومری شامل آکریل آمید، نمک سدیم ۲-متیل ۲-پروپان سولفونیک اسید و وینیل پیرولیدون به‌منظور سنتز به روش همبستگی رادیکال‌های آزاد در دمای اتاق و با استفاده از متیلن بیس آکریل آمید به‌عنوان عامل پیونددهنده مولکولی، به‌کار رفته است. خواص تورمی ذرات ژل از پیش تشکیل شده با افزودن نانورس مونت موریلونیت بهبود داده شد. همچنین، عامل پایدارکننده‌ی دما برای سازگار کردن ذرات ژل از پیش تشکیل شده با شرایط مخازن بلال نیز افزوده شد. در ادامه ژل‌های متورم شده به‌منظور بررسی پایداری در شرایط مخزن، در دما و شوری مخزن نگهداری شدند. بدین منظور ترکیب درصد ۵۰ نمونه ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده با انجام طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح ساخته شد و در نهایت مدل جدیدی به‌منظور پیش‌بینی میزان تورم ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده براساس درصد وزنی مواد و در شوری‌های مختلف ارائه شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که عامل اتصال‌دهنده عرضی، تأثیرگذاری بیشتری بر میزان تورم گذاشته و ژل از پیش تشکیل شده با فرمول‌بندی بهینه، قابلیت تحمل شرایط مخزنی (دمای  $82^{\circ}\text{C}$  و شوری ۲۶۰۰۰۰ قسمت در میلیون) را دارد.

### واژه‌های کلیدی

ذرات ژل از پیش تشکیل شده  
سنتز  
نسبت تورم  
آزمون برون‌تراپی

\*مسئول مکاتبات:

h.saghafi@nioc.ir

## ۱ مقدمه

در طی سال‌های گذشته، بهبود بازده جارویی سیلاب‌زنی با آب، موضوع طیف وسیعی از مطالعات پژوهشی شده است [۱-۴]. از آنجایی که بیشتر مخازن نفتی در خواص ژئولوژیکی خود همگن نیستند، تزریق آب می‌تواند منجر به مقدار زیاد جابه‌جایی غیر یکنواخت نفت درون مخزن شود. بر طبق نتایج، مقدار قابل توجهی از نفت در بیشتر مخازن بعد از بازیابی ثانویه به علت بازده جارویی ضعیف در مخزن باقی می‌ماند. اصلی‌ترین دلیل بازده جارویی ضعیف را می‌توان وجود نواحی با نفوذپذیری بالا دانست که منجر به تولید زود هنگام آب در جاهای نفت در حال تولید می‌شود. رویکردهای مختلفی (نظیر ایزوله مکانیکی، ژل‌های پلیمری و غیره) برای تحت کنترل قرار دادن تولید زود هنگام آب و کاهش نسبت آب تولیدی، پیشنهاد شده‌اند. مقدار زیاد آب تولیدی باعث افزایش هزینه‌های مرتبط با خوردگی، جدایش آب و نفت از یکدیگر و رسوب‌زدایی می‌شود و حتی گاهی اوقات باعث از دست رفتن قابلیت تولید چاه و عدم صرفه اقتصادی تولید از آن می‌شوند [۵-۶]. هزینه سالانه فراورش و جداسازی این آب حدود ۴۰ بیلیون دلار تخمین زده شده است [۵، ۷].

استفاده از ژل‌های پلیمری یکی از مهم‌ترین روش‌های تصحیح ناهمگنی مخزن است [۸-۱۳]. هرچند، برخی از روش‌های کنترل یکپارچگی تولید از طریق استفاده از ژل، معایب قابل توجهی دارند: توده‌ی ژل درجا (In-situ bulk gel) معمولاً به غلظت‌های بالایی از پلیمر و مواد پیونددهنده‌ی پلیمری برای تولید ژلی قوی نیاز دارد، پیش‌بینی زمان انعقاد و خواص فیزیکی آن دشوار است، تزریق پی در پی ژلانت (Gelant) درون مخزن احتمالاً باعث ایجاد جدایش کروماتوگرافی (Chromatography Separation) در ترکیب درصد ژلانت می‌شود و بیشتر آن‌ها در شرایط مخزن با دمای بالا (معمولاً بالاتر از ۹۰ درجه سانتی‌گراد)، پایدار نیستند [۱۴، ۱۵].

یکی از رویکردهای جدید که فاقد معایب بالا است، استفاده از ذرات ژل از پیش تشکیل شده است

که انبساط‌پذیر و آب‌دوست هستند. ذرات ژل از پیش تشکیل شده محصولاتی پودری هستند که از پیوند پلیمری تشکیل شده‌اند و بعد از شناور شدن در آب تازه یا آب نمک متورم خواهند شد. ذرات ژل از پیش تشکیل شده برای دوره‌ی زمانی خاصی به آب تزریقی اضافه می‌شوند و بعد از آن دوباره آب معمولی تزریق می‌شود. ذرات ژل از پیش تشکیل شده برای کاربرد در میدین نفتی به علت آسانی تنظیم اندازه‌ی ذرات در محدوده‌ی میکرومتر تا میلی‌متر، توانایی تورم در آب نمک، مقاومت در برابر محیط با درجه‌ی شوری متوسط، خواص مکانیکی قابل تنظیم و نسبت‌های تورم قابل تنظیم، مناسب هستند [۱۶، ۱۷]. ذرات ژل از پیش تشکیل شده در حدود ۴۰۰۰ چاه در کشور چین برای کاهش کانالیزه شدن (Channeling) سیال در سیلاب‌زنی آب و پلیمر به کار برده شده‌اند [۱۸].

سنتز این مواد، معمولاً با روش یکسانی صورت می‌گیرد؛ چرا که PPG در حالت کلی به هر ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده‌ای که از ترکیب چند مونومر، اتصال‌دهنده‌ی عرضی، آغازگر و کاتالیزور سنتز شده باشد (که بسته به شرایط متغیر است)، اطلاق می‌شود. ترکیب این مواد با هر ترکیب درصدی، سبب تشکیل PPG با خواص فیزیکی (نسبت تورم، پایداری در دما و شوری) متفاوت می‌شود. در تحقیقی پو و همکاران با استفاده از واکنش اتصال عرضی بین پلی‌آکریل‌آمید و پلی‌آکرلیک‌اسید نسبت به ساخت ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده اقدام کردند [۱۹]. در تحقیقی دیگر محمد و همکاران [۲۰] برای سنتز ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده از مونومر آکریل‌آمید، اتصال‌دهنده‌ی عرضی متیلن‌بیس‌آکریل‌آمید، آغازگر آمونیوم سولفید و از نانوذرات بتونیت برای پایداری ژل استفاده کردند. الهوریشاوی و همکاران [۲۱] نیز در ساخت این ژل از روش واکنش رادیکال آزاد آکریل‌آمید، آکرلیک‌اسید و متیلن‌بیس‌آکریل‌آمید استفاده کردند.

در کاری دیگر که توسط دوران و همکاران [۲۲] انجام شد، از مونومرهای آکریل‌آمید (AM)، وینیل پیرولیدون

آن رخ دادن پدیده انگشتی شدن (Fingering Phenomena) است. بنابراین، آب تزریقی پس از مدتی به چاه تولیدی رسیده و فرایند تزریق آب، بازده پایینی از خود نشان داده است. بر همین اساس برای اولین بار از ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده به منظور ازدیاد برداشت از میدان یاد شده استفاده شده است.

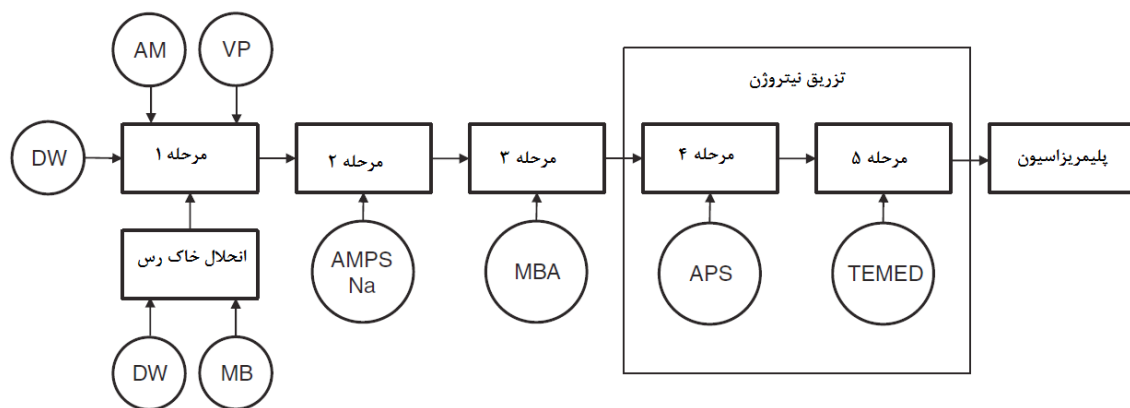
در این مقاله، ابتدا با انجام طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح، ۵۰ نمونه ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده با ترکیب درصد جدید در اجزای تشکیل دهنده ژل، طراحی شده است و اثر مولفه‌های مختلف نظیر نوع و غلظت مونومرها بر میزان تورم ذرات ژل از پیش تشکیل شده در شرایط مخزن بلال (که دما و شوری آن به ترتیب برابر با ۸۲ درجه سانتی‌گراد و ۲۶۰۰۰۰ قسمت در میلیون وزنی نمک است) مورد بررسی قرار گرفته است. سپس به منظور بررسی مقاومت ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده در دمای مخزن بلال، نمونه‌های متورم در دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۸۰ روز قرار داده شد. همچنین در این مقاله، مدل جدیدی به منظور پیش‌بینی میزان تورم ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده براساس درصد وزنی مواد و در شوری‌های مختلف ارائه شده است.

## ۲ مواد شیمیایی، دستگاه‌ها و روش آزمایش

برای تهیه ذرات ژل از پیش تشکیل شده از

۲-آکریل آمید-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید (VP) و ۲-آکریل آمید-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید (AMPSNa) برای ساخت ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده استفاده شد. همچنین از متیلن بیس آکریل آمید (MBA) به عنوان اتصال دهنده‌ی عرضی، سولفات آمونیوم (APS) به عنوان آغازگر، خاک بتونیت اصلاح شده (MB) به عنوان پایدارکننده خواص ژل و ترامتیل اتیلن دی آمین (TEMED) به عنوان کاتالیزور واکنش پلیمری شدن استفاده شد. در آن تحقیق به منظور ساخت ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده روند آزمایشگاهی مطابق با شکل ۱ انجام شد. طبق نتایج، عامل اتصال دهنده‌ی عرضی بیش-ترین تأثیر را در میزان تورم داشت.

موفقیت استفاده از هر ماده شیمیایی شدیداً به مشخصه‌های میدان نفتی بستگی دارد [۱۹]. به دلیل تفاوت در دما، ترکیبات معدنی، تخلخل، نفوذپذیری، سختی، pH و درجه شوری آب در میان میدان‌های نفتی، ممکن است نوع خاصی از این ذرات ژل به کار برده شده برای یک میدان نفتی، برای سایر مخازن مناسب نباشد. یکی از روش‌های مرسوم ازدیاد برداشت از میادین نفتی، تزریق آب بوده که در حال حاضر از این روش در شرکت نفت فلات قاره استفاده می‌شود. با این وجود پس از تزریق آب به میادین نفتی (میدان بلال) بخش عمده‌ای از هیدروکربن درجا در میدان باقی مانده است که دلیل آن وجود لایه‌های با تراوایی بالا و در نتیجه



شکل ۱ روند آزمایشگاهی ساخت PPG توسط دوران و همکاران [۲۲]

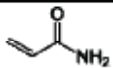
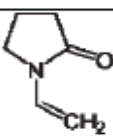
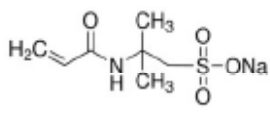
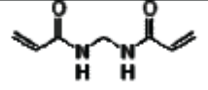
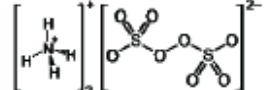
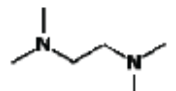
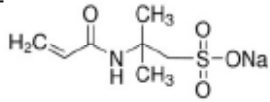
با سایز ذره ۱-۲ nm، به عنوان اصلاح کننده خواص مکانیکی استفاده شده است. ضمناً در تهیه ذرات ژل از پیش تشکیل شده شده به نیتروژن به منظور پاکسازی سامانه نیاز است. در جدول ۱ مشخصات مواد شیمیایی به کار رفته در سنتز ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده، آورده شده است.

### ۱-۲ سنتز ذرات ژل از پیش ساخته شده

در ابتدا نانورس مونت موریلونیت سدیم (MB) به مقدار لازم به آب مقطر اضافه شده، سپس این مخلوط در

سه مونومر استفاده شده است که عبارتند از: آکریل آمید (AM) (خلوص ۹۸/۵ درصد)، نمک سدیم آکریل آمید متیل پروپان سولفونیک اسید (AMPSNa) (خلوص ۹۹ درصد)، نرمال وینیل پیرولیدون (NVP) (خلوص ۹۸ درصد)، و متیلن بیس آکروامید (MBA) (خلوص ۹۹ درصد) به عنوان عامل پیونددهنده‌ی عرضی. تترامتیل اتیلن دی‌آمین (خلوص ۹۹ درصد) و سدیم پرسولفات نیز به ترتیب به عنوان کاتالیزور و آغازگر واکنش پلیمری سنتز ژل، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به علاوه از نانورس مونت موریلونیت سدیم

جدول ۱ مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده

نام ماده شیمیایی	نام اختصار تجاری	وزن مولکولی	ساختار شیمیایی	نام شرکت سازنده
آکریل آمید	AM	۷۱		مرکب (آلمان)
وینیل پیرولیدون	VP	۱۱۱		مرکب (آلمان)
۲-آکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک نمک سدیم	AMPSNa	۲۲۹		سیگما آلدیج (آمریکا)
متیلن بیس آکریل آمید	MBA	۱۵۴		مرکب (آلمان)
آمونوم پرسولفات	APS	۲۲۸		مرکب (آلمان)
تترا متیل اتیلن دی‌آمین	TEMED	۱۱۶		مرکب (آلمان)
نانورس مونت موریلونیت سدیم	MB	۱۸۰	-	سیگما آلدیج (آمریکا)
عامل پایدارکننده حرارتی (Nano) AMPSNa	TSA	۲۲۹		مرکب (آلمان)

ذره‌ای از پیش تشکیل شده بر اساس طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح و به وسیله نرم افزار دیزاین اکسپرت (Design Expert) پیش بینی شد. بر اساس این روش با توجه به تعداد مولفه‌های ورودی متغیر در آزمایش‌ها (که شامل ۵ ترکیب درصد وزنی مواد AM، NVP، AMPSNa، MBA، و نانورس بود) و تعداد پاسخ‌های موردنظر، در مجموع ۵۰ سری آزمایش حاصل شد. درصد وزنی مواد دیگر که شامل عامل پایدارکننده‌ی حرارتی، آغازگر و کاتالیزور بود، ثابت و به ترتیب برابر با ۰/۱، ۰/۱ و ۰/۰۵ درصد وزنی تعیین شد. جدول ۲ ترکیب درصد اجزای متغیر ذرات ژل از پیش تشکیل شده را نشان می‌دهد.

پس از ساخت ۵۰ نمونه ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده در ادامه به منظور انجام آزمون نسبت تورم در دما و شوری مخزن، آماده‌سازی شده‌اند. در شکل ۲ نمونه ژل ذره‌ای خشک شده نشان داده شده است.

پس از این مرحله، ژل خشک شده را به صورت پودر درآورده و به منظور داشتن سایز یکسان، پودر ژل خشک به وسیله الک‌های مخصوصی با اندازه سایز مش ۱۰۰-۱۵۰ (که به طور میانگین برابر با ۱۲۸ میکرون است) جداسازی شده تا در نهایت پودر ژل خشک شده با اندازه‌ی ذرات مشخص حاصل شود.

در حالت کلی برای اندازه‌گیری نسبت تورم ژل، دو روش حجمی و وزنی وجود دارد. با توجه به تحلیل مقایسه‌ای میزان تورم نمونه‌های ژل ساخته شده، از دو



شکل ۲ نمونه ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده خشک شده

حمام فراصوتی برای مدت ۴ ساعت تحت تابش پیوسته قرار گرفت تا زمانی که محلول یکنواخت و همگن نانورس درون آب حاصل شود. دلیل استفاده از آب مقطر در سنتز ژل، عدم واکنش مواد اضافی (نمک‌ها و سایر مواد معدنی) موجود در آب‌های دریا و تولیدی است. بعد از آن مقادیر مشخصی از مونومرهای AM و NVP، وزن شده و به آرامی و کم کم و هم‌زمان با هم‌زدن محلول به درون محلول پراکنده رس ریخته می‌شوند. سپس مونومر AMPSNa و عامل پایدارکننده‌ی دما (TSA) به مخلوط افزوده می‌شوند. سپس هم‌زدن مخلوط به مدت ۱ ساعت و به صورت پیوسته تا زمانی که مونومرها به طور کامل پراکنده شوند، ادامه خواهد داشت. در این مرحله به منظور عدم واکنش MBA با اکسیژن موجود در محیط و بروز مشکل در اتصال عرضی بین مونومرهای واکنش، با وارد کردن نیتروژن به سامانه، نسبت به عاری‌سازی محیط از اکسیژن (که به خاطر خاصیت خنثی‌سازی نیتروژن است) اقدام می‌شود. در حالی که هم‌زدن شدید و پاک‌سازی سامانه با نیتروژن انجام می‌شود، MBA‌های وزن شده به درون محلول ریخته می‌شوند. بعد از هم‌زدن به مدت ۴۰ دقیقه، مقدار مشخصی از سدیم-پرسولفات (APS) و کاتالیزور تترامتیل اتیلن دی‌آمین (TEMED) اضافه شده و بعد از آن پاک‌سازی با نیتروژن متوقف می‌شود. واکنش گرماده پلیمری شدن فوراً شروع خواهد شد و تشکیل هیدروژل در مدت ۳۰ دقیقه مشاهده خواهد شد. به منظور حصول اطمینان از کامل شدن واکنش پلیمری شدن و سنتز صحیح ژل، ژل تشکیل شده در آب به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شد [۱۶،۲۲]. در ادامه به منظور خشک شدن بهتر، ژل‌های حاصله با برش‌های مناسب دلخواه به قطعات کوچکتر تبدیل و سپس در گرمخانه با دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد و تحت شرایط خلأ به مدت ۲۴ ساعت، خشک شده‌اند [۸،۲۲].

## ۲-۲ روش آزمایشگاهی

براساس دستورالعمل ذکر شده برای ساخت ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده، ترکیب درصد وزنی ۵۰ نمونه ژل

جدول ۲ ترکیب درصد وزنی اجزای ژل های ذره ای از پیش شکل گرفته

۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره PPG نام ماده
۳/۳۸	۳/۳۶	۳/۳۴	۳/۳۲	۳/۳۰	۳/۲۸	۳/۲۶	۳/۲۴	۳/۲۲	۳/۲۰	۳/۱۸	۳/۱۶	۳/۱۴	۳/۱۲	AM
۷/۸۷	۷/۸۵	۷/۸۳	۷/۸۱	۷/۷۹	۷/۷۷	۷/۷۵	۷/۷۳	۷/۷۱	۷/۶۹	۷/۶۷	۷/۶۵	۷/۶۳	۷/۶۱	NVP
۱۶/۱۱۴	۱۶/۱۱۲	۱۶/۱۱۰	۱۶/۱۰۸	۱۶/۱۰۶	۱۶/۱۰۴	۱۶/۱۰۲	۱۶/۱۰۰	۱۶/۹۸	۱۶/۹۶	۱۶/۹۴	۱۶/۹۲	۱۶/۹۰	۱۶/۸۸	AMPENg
۰/۸۰	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۷۲	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۶۰	۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۵۴	MBA
۳/۰۷	۳/۰۵	۳/۰۳	۳/۰۱	۲/۹۹	۲/۹۷	۲/۹۵	۲/۹۳	۲/۹۱	۲/۸۹	۲/۸۷	۲/۸۵	۲/۸۳	۲/۸۱	MB
۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	شماره PPG نام ماده
۳/۳۶	۳/۳۴	۳/۳۲	۳/۳۰	۳/۲۸	۳/۲۶	۳/۲۴	۳/۲۲	۳/۲۰	۳/۱۸	۳/۱۶	۳/۱۴	۳/۱۲	۳/۱۰	AM
۷/۸۵	۷/۸۳	۷/۸۱	۷/۷۹	۷/۷۷	۷/۷۵	۷/۷۳	۷/۷۱	۷/۶۹	۷/۶۷	۷/۶۵	۷/۶۳	۷/۶۱	۷/۵۹	NVP
۱۶/۱۱۲	۱۶/۱۱۰	۱۶/۱۰۸	۱۶/۱۰۶	۱۶/۱۰۴	۱۶/۱۰۲	۱۶/۱۰۰	۱۶/۹۸	۱۶/۹۶	۱۶/۹۴	۱۶/۹۲	۱۶/۹۰	۱۶/۸۸	۱۶/۸۶	AMPENg
۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۷۲	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۶۰	۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۵۲	MBA
۳/۰۳	۳/۰۱	۲/۹۹	۲/۹۷	۲/۹۵	۲/۹۳	۲/۹۱	۲/۸۹	۲/۸۷	۲/۸۵	۲/۸۳	۲/۸۱	۲/۷۹	۲/۷۷	MB
۲۷	۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	شماره PPG نام ماده
۳/۳۴	۳/۳۲	۳/۳۰	۳/۲۸	۳/۲۶	۳/۲۴	۳/۲۲	۳/۲۰	۳/۱۸	۳/۱۶	۳/۱۴	۳/۱۲	۳/۱۰	۳/۰۸	AM
۷/۸۳	۷/۸۱	۷/۷۹	۷/۷۷	۷/۷۵	۷/۷۳	۷/۷۱	۷/۶۹	۷/۶۷	۷/۶۵	۷/۶۳	۷/۶۱	۷/۵۹	۷/۵۷	NVP
۱۶/۱۱۰	۱۶/۱۰۸	۱۶/۱۰۶	۱۶/۱۰۴	۱۶/۱۰۲	۱۶/۱۰۰	۱۶/۹۸	۱۶/۹۶	۱۶/۹۴	۱۶/۹۲	۱۶/۹۰	۱۶/۸۸	۱۶/۸۶	۱۶/۸۴	AMPENg
۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۷۲	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۶۰	۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۵۰	MBA
۳/۰۱	۲/۹۹	۲/۹۷	۲/۹۵	۲/۹۳	۲/۹۱	۲/۸۹	۲/۸۷	۲/۸۵	۲/۸۳	۲/۸۱	۲/۷۹	۲/۷۷	۲/۷۵	MB
۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	شماره PPG نام ماده
۳/۳۲	۳/۳۰	۳/۲۸	۳/۲۶	۳/۲۴	۳/۲۲	۳/۲۰	۳/۱۸	۳/۱۶	۳/۱۴	۳/۱۲	۳/۱۰	۳/۰۸	۳/۰۶	AM
۷/۸۱	۷/۷۹	۷/۷۷	۷/۷۵	۷/۷۳	۷/۷۱	۷/۶۹	۷/۶۷	۷/۶۵	۷/۶۳	۷/۶۱	۷/۵۹	۷/۵۷	۷/۵۵	NVP
۱۶/۱۰۸	۱۶/۱۰۶	۱۶/۱۰۴	۱۶/۱۰۲	۱۶/۱۰۰	۱۶/۹۸	۱۶/۹۶	۱۶/۹۴	۱۶/۹۲	۱۶/۹۰	۱۶/۸۸	۱۶/۸۶	۱۶/۸۴	۱۶/۸۲	AMPENg
۰/۷۴	۰/۷۲	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۶۰	۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۵۰	۰/۴۸	MBA
۲/۹۹	۲/۹۷	۲/۹۵	۲/۹۳	۲/۹۱	۲/۸۹	۲/۸۷	۲/۸۵	۲/۸۳	۲/۸۱	۲/۷۹	۲/۷۷	۲/۷۵	۲/۷۳	MB

جدول ۳ میزان شوری آب دریا و تولیدی در میدان بلال

آب مقطر	آب دریا	آب تولیدی
۰	۴۶۶۶۰	۲۶۰۰۰۰
میزان شوری (mg/L)		

$$\text{نسبت تورم} = \frac{w_s - w_d}{w_d}$$

که در این معادله  $W_s$  وزن ژل متورم شده و  $W_d$  وزن ژل خشک است.

در ادامه، ژل های متورم شده به منظور انجام آزمون نسبت تورم در دما و شوری مخزن آماده سازی شدند. به این آزمون که به منظور بررسی پایداری نمونه های ژل ذره ای از پیش تشکیل شده در شرایط مخزن صورت می گیرد، آزمون برون ترایی یا سینرسیس (Syneresis) اطلاق می شود. بدین منظور ژل های متورم شده در آب دریا و آب تولیدی در میدان بلال، پس از اینکه ظروف آن ها آب بندی شد، درون گرمخانه با دمای ۸۷ درجه سانتی گراد (به منظور حصول اطمینان بیشتر، بالاتر از دمای مخزن بلال که ۸۲ درجه است) قرار داده شدند. نسبت تورم، هر روز با بررسی سطح مشترک بین بخش آبی در ته که شامل ذرات ژل از پیش ساخته شده بوده و آب در بالا، تحت نظر گرفته می شد.

### ۳ بحث و نتایج

#### ۳-۱ آزمایش های نسبت تورم

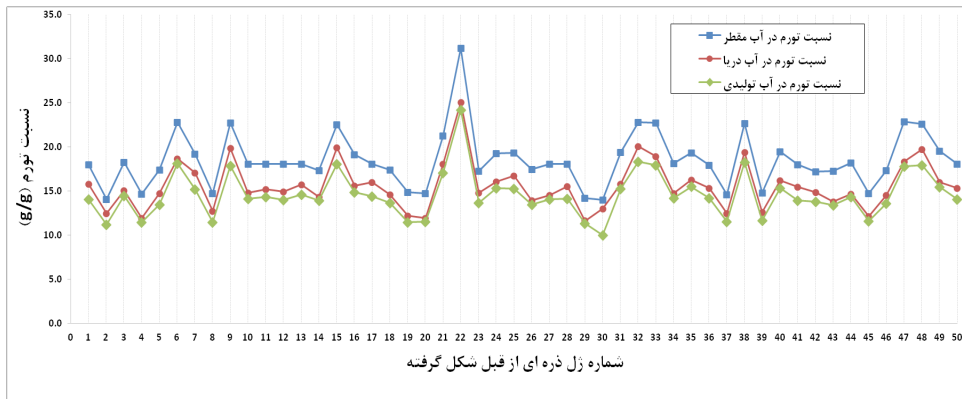
در شکل ۳ مقادیر نسبت تورم برای ۵۰ نمونه ژل ذره ای از پیش تشکیل شده در آب مقطر (DW)، آب دریا (SW) و در آب تولیدی یا آب بعد از تفکیک کننده (PW) نشان داده شده است.

پس از آن، از روش حداقل مربعات استفاده شد تا سطح پاسخی همانند چند جمله ای درجه دومی با مولفه های اصلی و برهم کنش متقابل آن ها به دست آید. روش حداقل مربعات به اندازه کافی برای ساختن توابعی مانند چند جمله ای ها، مناسب است؛ چراکه

روش ذکر شده می توان استفاده کرد. در این تحقیق از روش وزنی برای بررسی و مقایسه میزان تورم ذرات ژل از پیش تشکیل شده استفاده شد. بدین منظور برای هر نمونه یک گرم پودر ژل خشک (Wd) به آرامی و کم کم درون ۵۰ میلی لیتر لوله ای آزمایشگاهی پر شده با آب های مختلف (که شامل آب مقطر، آب تزریقی و آب دریا است و میزان شوری آن ها مطابق با جدول ۳ است) در دمای اتاق ریخته شده است. سطح مشترک بین قسمت آب نمک در ته که شامل ذرات ژل از پیش تشکیل شده بوده و آب نمک در بالا، تا نقطه ای که نرخ تورم صفر شود، دنبال شده است. در آن نقطه، هیدروژل ها از مایع خارج و توسط صافی کاغذی به منظور حذف آب اضافی، صاف شده و وزن نهایی آن ها اندازه گیری می شود. بدین منظور ابتدا صافی کاغذی را با آب مقطر و یا دیگر آب های متناظر در هر آزمایش اشباع کرده و در ادامه وزن شده و مقدار آن به عنوان وزن صافی اشباع یادداشت شده است. سپس هیدروژل مورد نظر را به آرامی بر روی صافی کاغذی قرار داده و زمان داده می شود تا آب آن خارج شود. پس از خروج کامل آب اطراف هیدروژل و اطمینان از عدم وجود آب اضافه به همراه آن، صافی کاغذی و هیدروژل قرار گرفته بر روی آن، وزن شده و به عنوان وزن صافی و هیدروژل یادداشت می شود. حال با کم کردن این دو مقدار وزن نهایی هیدروژل اندازه گیری می شود (Ws).

برای هر نمونه ژل، آزمون تورم چندین بار انجام شده تا زمانی که چهار وزن اندازه گیری شده ای متوالی در محدوده ۱ درصدی خطای آزمایش، یکسان شوند. سپس، نسبت تورم به صورت زیر محاسبه شده است:

(۱)



شکل ۳ نسبت تورم ۵۰ نمونه ذل ذره ای از پیش تشکیل شده در آب های مختلف

جدول ۴ خلاصه برازش مدل اولیه

ضریب تعیین شده	ضریب تعیین	مدل
-۰.۹۷۹	۰.۹۸۱	نسبت تورم در آب مقطر
-۰.۹۶۹	۰.۹۷۲	نسبت تورم در آب دریا
-۰.۹۸۵	۰.۹۸۶	نسبت تورم در آب تولیدی

جدول ۵ تحلیل واریانس مدل اولیه

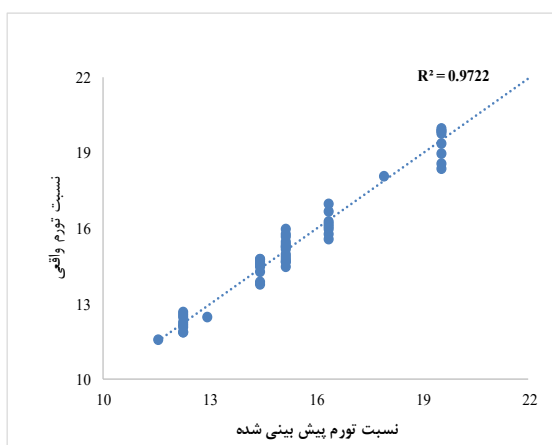
احتمال	نسبت F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	متبع	مدل
۰.۰۰۰۱	۴۵۶/۲۲۲	۹۴/۴۹۵	۳۷۲/۴۷۵	۵	مدل	نسبت تورم در آب مقطر
		-۰.۲۰۷	۹/۱۱۴	۴۴	خطا	
			۴۸۱/۵۸۹	۴۹	مجموع	
۰.۰۰۰۱	۲-۷/۳۹۳	۶۷/۹۵۲	۳۳۹/۷۶۲	۵	مدل	نسبت تورم در آب دریا
		-۰.۲۲۱	۹/۷۲۷	۴۴	خطا	
			۳۴۹/۴۸۹	۴۹	مجموع	
۰.۰۰۰۱	۷۹۱/۳۲۴	۷۵/۰۷۲	۳۰-۳۸۸	۵	مدل	نسبت تورم در آب تولیدی
		-۰.۰۹۵	۴/۲۳۹	۴۴	خطا	
			۳۰۴/۵۵۷	۴۹	مجموع	

$$\begin{aligned}
 SR_{DW} = & -0.055 \times (AMPSNa - 7)^2 + 110.684 \times (MBA - 0.3)^2 - 2.015 \\
 & \times (AMPSNa - 7)(MBA - 0.3) + 1.182 \times (AMPSNa - 7) - 34.467 \\
 & \times (MBA - 0.3) + 17.977
 \end{aligned}
 \quad (2)$$



$$SR_{SW} = -0.0460 \times (AMPSNa - 7)^2 + 88.726 \times (MBA - 0.3)^2 - 2.511 \times (AMPSNa - 7)(MBA - 0.3) + 1.0617 \times (AMPSNa - 7) - 28.820 \times (MBA - 0.3) + 15.126 \quad (3)$$

$$SR_{PW} = 86.398 \times (MBA - 0.3)^2 - 1.162 \times (AMPSNa - 7)(MBA - 0.3) + 0.960 \times (AMPSNa - 7) - 27.444 \times (MBA - 0.3) + 14.116 \quad (4)$$

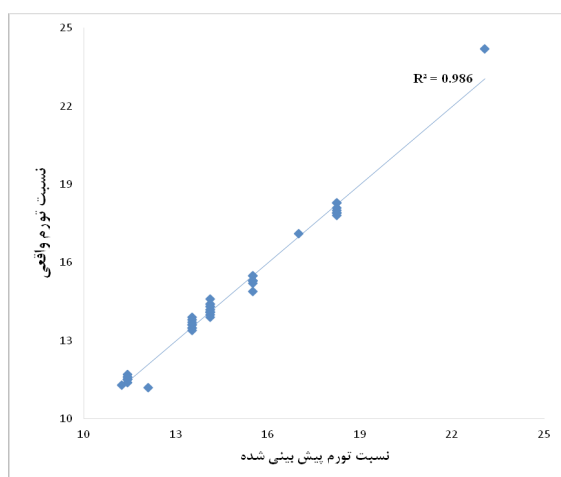


شکل ۵ نمودار مقادیر واقعی نسبت تورم در آب در برابر مقادیر پیش‌بینی شده با مدل

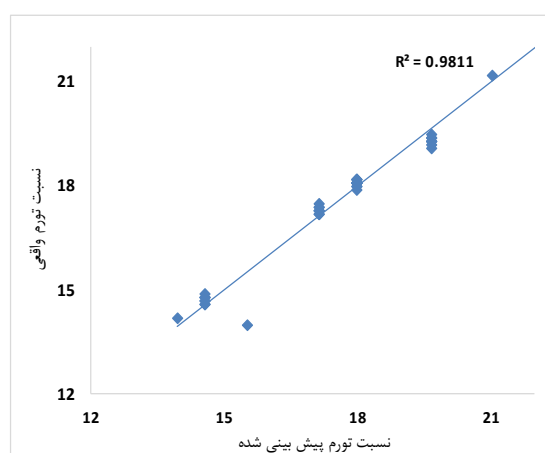
مجموع مزاد مجذور بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی را به حداقل می‌رساند. در نهایت، مدل اولیه با ویژگی‌های آماری نشان داده شده در جدول کیفیت برآزش (جدول ۴) برای نسبت تورم در آب‌های مختلف نشان داده شده است.

در ادامه مدل‌های پیش‌بینی شده برای نسبت تورم در آب‌های مختلف آورده شده است. با توجه به تأثیر ترکیب درصد همه اجزای تشکیل‌دهنده ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده بر میزان نسبت تورم، مدل‌های حاصل بر اساس ترکیب درصد تأثیرگذارترین مولفه‌ها بر نسبت تورم تنظیم شده‌اند.

در شکل‌های ۴ تا ۶ نتایج واقعی و پیش‌بینی شده نسبت تورم در هر سه آب نشان داده شده است.



شکل ۶ نمودار مقادیر واقعی نسبت تورم در آب تولیدی در برابر مقادیر پیش‌بینی شده با مدل



شکل ۴ نمودار مقادیر واقعی نسبت تورم در آب مقطر در برابر مقادیر پیش‌بینی شده با مدل

چشمگیری ارتقاء می‌بخشد. با افزایش غلظت نانورس مونت موریلونیت، ظرفیت تورم به آرامی کاهش می‌یابد، اما تغییرات نسبت تورم، قابل توجه نیست [۱۶].

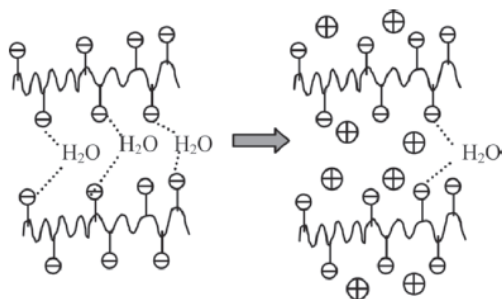
ترکیبات پراکسید می‌توانند به عنوان آغازگر واکنش پلیمری شدن و به منظور افزایش سرعت واکنش، مورد استفاده قرار گیرند؛ از کاتالیزور به منظور افزایش نرخ تفکیک (Dissociation) در دمای اتاق استفاده شد. ترکیبات پراکسید در زمان تفکیک خود و در شرایط مناسب، رادیکال‌های آزاد تولید خواهند کرد اما غلظت آغازگرهای واکنش برای ساختار و خواص ژل، زیاد مهم نیست. زمانی که غلظت آغازگر واکنش افزایش می‌یابد، ظرفیت تورم کاهش نمی‌یابد. غلظت کاتالیزور اثر چشمگیری بر ظرفیت تورم نگذاشته است. این موضوع می‌تواند مربوط به این حقیقت باشد که کاتالیزور باعث افزایش نرخ واکنش شیمیایی می‌شود، بدون آنکه خود هیچگونه تغییر شیمیایی (چه به صورت دائم و چه موقت) متحمل شود [۱۶].

با مقایسه‌ی نتایج آب مقطر با آب‌های دریا و تولیدی، (که از نمک‌های مختلف تک‌ظرفیتی و چندظرفیتی تشکیل شده‌اند) کاهش شدیدی در نسبت تورم دیده می‌شود، که احتمالاً به دلیل وجود نیمه‌ی آنیونی موجود در شبکه پلیمری، به عنوان محدودکننده پیوند یونی و در نتیجه کاهش دهنده نسبت تورم بود. به عبارت دیگر در غلظت‌های پایین نمک، نیروی دافعه الکتریکی باعث جدا شدن مولکول‌ها در ژل شده و فضای بیشتری را برای

نتایج مدل‌ها نشان می‌دهند که نسبت تورم ذرات ژل از پیش تشکیل شده به ترکیب درصد آن‌ها و همچنین به میزان شوری محیط اطراف آن‌ها وابسته است. با توجه به نتایج به دست آمده از میزان نسبت تورم ۵۰ نمونه ژل و همچنین مدل، مشاهده شد که غلظت ماده پیونددهنده پلیمری مهم‌ترین مولفه تأثیرگذار بر نسبت تورم بود. این ماده اثری مهم بر ساختار و خواص ژل دارد. به طوری که با افزایش غلظت ماده پیونددهنده پلیمری، ظرفیت تورم کاهش می‌یابد. ظرفیت تورم در آب، به گروه آب‌دوست موجود در مولکول پلیمر وابسته است. بنابراین، تعداد گروه‌های آبدوست و اندازه‌ی سه‌بعدی ساختار ژل پیوندخورده، اثرات قابل توجهی بر ظرفیت تورم دارند. با افزایش غلظت ماده‌ی پیونددهنده پلیمری، تعداد بیشتری از گروه‌های آب‌دوست در واکنش تشکیل ژل شرکت کرده، که باعث کاهش آب‌دوستی ژل می‌شود. در همان زمان، به دلیل ممانعت فضایی (Steric hindrance) مولکول‌ها، مادامی که غلظت ماده‌ی پیونددهنده‌ی پلیمری بسیار زیاد است، ظرفیت تورم کاهش خواهد یافت [۱۶].

برای سنتز ژل ذره‌ای از پیش شکل گرفته، سه نوع مونومر متفاوت استفاده شده است. از بین مونومرهای موجود، AMPSNa بعد از ماده پیونددهنده پلیمری تأثیرگذارترین ترکیب بر نسبت تورم شناخته شد. به طوری که با افزایش نسبت مولی این ماده نسبت تورم افزایش می‌یابد.

نسبت تورم ژل‌های ذره‌ای از پیش تشکیل شده با افزایش درصد وزنی رس به آرامی کاهش می‌یابد. تقویت ژل پلیمری به وسیله‌ی افزودن خاک رس از طریق تشکیل کامپوزیت لایه‌ای صورت می‌گیرد. ذرات مسطح و باریک خاک رس دو سطح متفاوت دارند. سطح بزرگ‌تر دارای بار منفی و لبه‌ی باریک‌تر دارای بار مثبت است. خواص سطح، ناخالصی به جا مانده و هندسه ذرات رس نقش بسیار مهمی در سنتز ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده ایفا می‌کنند. به طوری که افزودن رس به پلیمر همگن ذرات ژل، خواص مکانیکی آن‌ها را به‌طور



شکل ۷ توضیح شماتیکی متورم شدن ژل در محلول حاوی یون [۱۶]

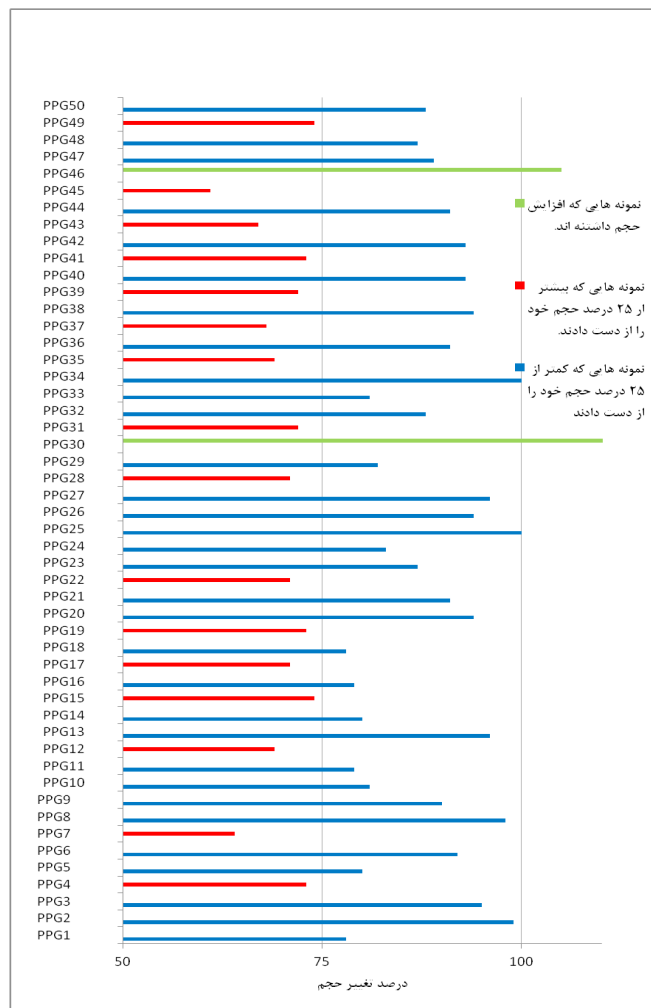
ورود آب به ژل فراهم می‌کند. با این حال هنگامی که ژل در آب با شوری بالا متورم می‌شود، گروه‌های باردار منفی با کاتیون (یون مثبت) خنثی شده و در نتیجه جذب بیشتر آب را با محدودیت مواجه می‌کند. فرایند متورم شدن در غلظت‌های مختلف نمک در شکل ۷ نشان داده شده است [۱۶].

### ۲-۳ آزمایش‌های گذر زمان (gnigA)

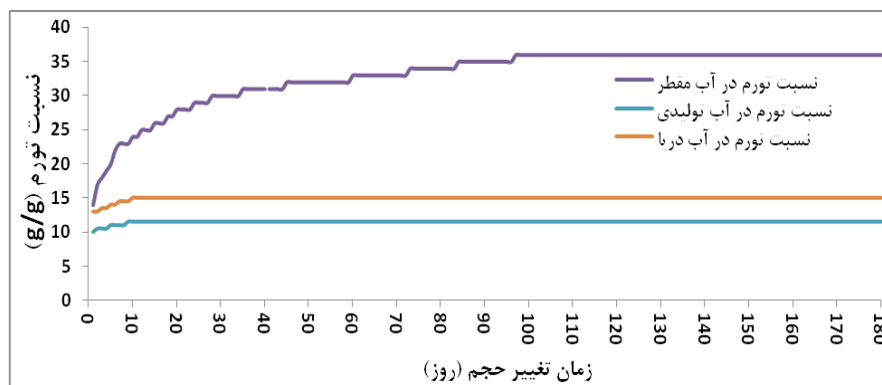
در ادامه ژل‌های متورم شده که در شرایط مخزن بلال قرار گرفتند، پس از گذشت ۱۸۰ روز از گرمخانه خارج شده‌اند. از بین نمونه‌های ژلی که مدتی در گرمخانه قرار گرفتند، نمونه‌هایی که ۲۵ درصد حجم شروع اولیه



شکل ۸ نسبت تورم ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته در آب‌های تولیدی و دریا در دمای مخزن



شکل ۹ درصد تغییر حجم نمونه‌های ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده متورم شده در آب تولیدی



شکل ۱۰ پایداری و تغییر حجم ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته شماره ۳۰ در گذر زمان

با این حال، در دماهای بالاتر، نسبت تورم با افزایش دما برعکس می‌شود. توضیحات مختلفی را برای توصیف چگونگی این رفتار می‌توان ارائه کرد؛ مانند آزاد شدن زنجیره‌های پلیمری واکنش نیافته، پیوندهای یونی با کاتیون‌های فلزی، تضعیف پیوندهای هیدروژنی و تخریب گرمایی. دو نمونه ذکر شده به دلیل ترکیب درصد مواد تشکیل دهنده آن‌ها توانستند نسبت به حدود ۷۰ درصد دیگر نمونه‌ها که کمتر از ۲۵ درصد از حجم خود را از دست داده‌اند، به عنوان نمونه‌های برتر برای عملیات تزریق در میدان بلال انتخاب شوند. در شکل ۱۰ نمودار تغییرات نسبت تورم نمونه ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته شماره ۳۰ (نمونه برتری که افزایش حجم بیشتری داشته است) طی ۱۸۰ روز در آب مقطر، آب دریا و آب تولیدی و در دمای ۸۷ درجه نشان داده شده است.

خود را از دست دادند از گرمخانه بیرون آورده شده و به عنوان ژل همفشرده (Syneresed) مد نظر قرار گرفته‌اند. از بین نمونه‌های ژل قرار گرفته در گرمخانه، حجم نمونه‌های شماره ۳۰ و ۴۶ علاوه بر مقاومت نسبت به از دست رفتن حجم خود در دما و شوری مخزن، مقداری افزایش پیدا کرد (شکل ۹). علت این پدیده را می‌توان این‌گونه بیان کرد که نسبت تورم در برابر دما، رفتاری دوگانه از خود نشان می‌دهد. همچنین دلیل دیگر، این است که نسبت تورم ژل‌ها توسط انرژی آزاد الاستیسیته در شوری ثابت کنترل می‌شود [۲۳]. در پژوهشی که توسط فراست و همکاران [۲۴] صورت گرفت به بررسی تأثیر دما بر میزان تورم پرداخته شد. در آن پژوهش مشاهده شد تا دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت تورم با افزایش دما، افزایش می‌یابد.

جدول ۶ ترکیب درصد وزنی نمونه برتر

آکریل آمید	وینیل پیرولیدون	۲-آکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک نمک سدیم	متیلن بیس آکریل آمید	تانورس مونت موریلونیت سدیم	عامل یابدارکننده حرارتی	آمونوم یرسولفات (آغازگر واکنش)	تترا متیل اتیلن دی آمین (کاتالیست)
وزن مولکولی: ۷۱	وزن مولکولی: ۱۱۱	وزن مولکولی: ۲۲۹	وزن مولکولی: ۱۵۳	وزن مولکولی: ۲۸۲/۲	وزن مولکولی: ۲۲۹	وزن مولکولی: ۲۲۸/۲	وزن مولکولی: ۱۱۶
۵/۶۶	۹	۱۳/۹	۰/۵۷	۱/۷۷	۰/۱	۰/۱	۰/۵

تشکیل شده در این تحقیق که از ترکیب درصد اجزای مناسبی برخوردار بود (نمونه ۳۰)، می‌تواند در شرایط دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد و شوری ۲۶۰۰۰۰ قسمت در میلیون نمک (شرایط میدان بلال) مقاومت کرده و علاوه بر عدم از دست دادن پایداری خود در این شرایط، توانست افزایش حجم هم داشته باشد.

### علائم و اختصارات

DW آب مقطر

PPGs ذرات ژل از پیش تشکیل شده

PW آب تولیدی

SR نسبت تورم

SW آب دریا

Wd جرم خشک پودر ذرات ژل از پیش تشکیل شده

Ws جرم بعد از تورم ذرات ژل از پیش تشکیل شده

### قدردانی

در پایان، مراتب سپاس و قدردانی را از کارشناسان فنی شرکت نفت فلات قاره ایران به خاطر حمایت‌های مادی و معنوی در راستای تدوین این مقاله، تقدیم می‌داریم.

همان‌طور که از منحنی پیداست، نسبت تورم این نمونه طی زمانی که در دمای مخزن قرار گرفته افزایش یافته است. بر اساس شکل، تورم این نمونه در آب مقطر نیز افزایش چشمگیری داشته که به دلیل تفاوت در خواص فیزیکی آب مقطر نسبت به دو آب دیگر است. در جدول ۶ ترکیب درصد نمونه برتر (ژل ذره‌ای از پیش تشکیل شده شماره ۳۰) آورده شده است.

### ۴ نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مجموعه‌ای از ذرات ژل از پیش تشکیل شده در مقیاس آزمایشگاهی و با ویژگی‌های مطلوب که مطابق با شرایط دمایی و شوری میدان نفتی بلال در خلیج فارس بوده، به صورت موفقیت‌آمیز سنتز شدند. پس از ساخت این ذرات، میزان نسبت تورم و مقامت برون‌ترایی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نسبت تورم ذرات ژل از پیش تشکیل شده با ترکیب درصد آن‌ها ارتباط دارد. بر طبق نتایج، از بین اجزای تشکیل‌دهنده ژل، ماده اتصال‌دهنده‌ی عرضی و بعد از آن مونومر AMPSNa بیشترین تأثیر را بر میزان تورم داشتند. همچنین مشاهده شد که ژل ذره‌ای از پیش

## مراجع

- 1- Bai B., Zhang H., Preformed-Particle-Gel Transport Through Open Fractures and its Effect on Water Flow, *SPE Journal*, 16, 388-400, 2011.
- 2- Imqam A., Bai B., Al Ramadan M., Wei M., Delshad M., Sepehrnoori K., Preformed-Particle-Gel Extrusion Through Open Conduits During Conformance-Control Treatments, *SPE Journal*, 20, 1083-1093, 2014.
- 3- Seright R., Use of preformed Gels for Conformance Control in Fractured Systems, *SPE Journal*, 12, 59-65, 1997.
- 4- Almohsin A.M., Bai B., Imqam A.H., Wei M., Kang W., Delshad M., Sepehrnoori K., Transport of Nanogel through Porous Media and its Resistance to Water Flow, *SPE Improved Oil Recovery Symposium*, Society of Petroleum Engineers, 2014.
- 5- Arabloo M., Ziaee H., Lee M., Bahadori A., Prediction of the Properties of Brines Using Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM) Computational Strategy, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 50, 123-130, 2015.
- 6- Dalrymple E., Water Control Treatment Design Technology, 15th World Petroleum Congress, World Petroleum Congress, 1997.
- 7- Bailey B., Crabtree M., Tyrie J., Elphick J., Kuchuk F., Romano C., Roodhart L., Water Control; Oilfield Review, *Schlumberger*, 30-51, 2000.
- 8- H. R. Saghafi, A. Naderifar, S. Gerami; Improvement in Thermo-Chemical Stability of Nanocomposite Preformed Particle Gels for Conformance Control in Harsh Oil Reservoir Conditions, *Canadian Society for Chemical Engineering*, 94, 1880-1890, 2016.
- 9- Elsharafi M.O., Bai B., Effect of Strong Preformed Particle Gel on Unswept Oil Zones/Areas during Conformance Control Treatments, *EAGE Annual Conference & Exhibition Incorporating SPE Europec*, Society of Petroleum Engineers, 2013.
- 10- H.R. Saghafi, A. Naderifar, S. Gerami, A. Farasat, Performance Evaluation of Viscosity Characteristics of Enhanced Preformed Particle Gels (PPGs) , *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 35(3), 83-92, 2016.
- 11- Chauveteau G., Tabary R., Le Bon C., Renard M., Feng Y., Omari A., In-Depth Permeability Control by Adsorption of Soft Size-Controlled Microgels, *SPE European Formation Damage Conference*, Society of Petroleum Engineers, 2003.
- 12- H. R. Saghafi, Retention Characteristics of Enhanced Preformed Particle Gels (PPGs) in Porous Media: Conformance Control Implications, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 166, 962-968, 2018.
- 13- H. R. Saghafi, M. A. Emadi, A. Farasat, M. Arabloo, A. Naderifar, Performance Evaluation of Optimized Preformed Particle Gel (PPG) in Porous Media, *Chemical Engineering Research and Design* 112, 175-189, 2016.
- 14- Imqam A., Bai B., Optimizing the Strength and Size of Preformed Particle Gels for Better Conformance Control Treatment, *Fuel*, 148, 178-185, 2015.
- 15- Goudarzi A., Zhang H., Varavei A., Taksaudom P., Hu Y., Delshad M., Bai B., Sepehrnoori K., A Laboratory and Simulation Study of Preformed Particle Gels for Water Conformance Control, *Fuel*, 140, 502-513, 2015.
- 16- Bai B., Li L., Liu Y., Liu H., Wang Z., You C., Conformance Control by Preformed Particle Gel: Factors Affecting its Properties and Applications, *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 10, 415-421, 2007.
- 17- Bai B., Huang F., Liu Y., Seright R.S., Wang Y., Case Study on Prefromed Particle Gel for In-Depth Fluid Diversion, *SPE Symposium on Improved Oil Recovery*, Society of Petroleum Engineers, 2008.
- 18- Y. Qiu, F. Wu, M. Wei, W. Kang, B. Li, Lessons Learned from Applying Particle Gels in Mature Oilfields, *Society of Petroleum Engineers*, 2016: doi:10.2118/169161-MS
- 19- J. Pu, B. Bai, A. Alhuraishawy, T. Schuman, Y. Chen, and X. Sun, A Novel Re-Crosslinkable Preformed Particle Gel for Conformance Control in Extreme Heterogeneous Reservoirs, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, Texas*, 24-26 September 2018.
- 20- Muhammad F., Bai B., Tang T., Experimental Study of the Interaction between Surfactant and Super Absorbent Polymer Gel, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 90, 159-164, 2012.
- 21- A. K. Alhuraishawy, M. Wei, A. A. Alsubaih, B. Bai, A. Almansour, Evaluation of Gel Treatment in Fractured Reservoir Using Embedded Discrete Fracture Mod-

- el: Experimental and Simulation Investigation, Society of Petroleum Engineers, 12-15 November, Abu Dhabi, UAE, 2018.
- 22- C. D. Valencia, B. Bai, H. Reyes, R. F. Lopez, F. Barragan-Aroche, S. Lopez-Ramirez, Development of Enhanced Nanocomposite Preformed Particle Gels for Conformance Control in High-Temperature and High-Salinity Oil Reservoirs, *Polymer Journal*, Volume 46, Number 5, Pages 277-284, Society of Polymer Science, May 2014.
- 23- C. Ozeroglu and A. Birdal, *eXPRESS Polymer Letter*, 3, 168, 2009.
- 24- A. Farasat, M. Vafaie Sefti, S. Sadeghnejad, H. R. Saghafi, Effects of Reservoir Temperature and Water Salinity on the Swelling Ratio Performance of Enhanced Preformed Particle Gels, *Korean J. Chem. Eng.* 34, 1509-1516, 2016.

