

## سنتر ذرات نانو ژل از پیش تشکیل شده و بررسی تأثیر مواد تشکیل دهنده آن بر میزان نسبت تورم

حمیدرضا تقفی<sup>\*</sup>، پژوهشگر از دیاد برداشت نفت

### چکیده

استفاده از ژل‌های پلیمری یکی از مورد اعتمادترین راه‌حل‌ها برای بهبود یکپارچگی تولید در مخازن ناهمگن به منظور داشتن بازده جارویی<sup>۱</sup> بهتر است. در این مقاله، ذرات ژل از پیش تشکیل شده‌ی جدید برای کنترل یکپارچگی تولید در مخازن نفت با دما و شوری<sup>۲</sup> بالا تولید شده‌اند. در ساخت این ذرات، چهار جزء مونومری N,N-dimethyl acrylamide (DA)، 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic sodium salt (AMPSNa)، acrylamide (AM) و N-vinylpyrrolidone (NVP) به منظور سنتر به روش همبستگی رادیکال‌های آزاد<sup>۳</sup> در دمای اتاق و با استفاده از N,N-methylenebis (acrylamide) (MBA) به عنوان عامل پیونددهنده<sup>۴</sup> پلیمرها، به کار رفته است. خواص مکانیکی و تورمی ذرات ژل از پیش تشکیل شده با افزودن Nano clay Montmorillonite Na<sup>+</sup> و آمونیوم کلراید<sup>۵</sup> بهبود داده شدند. همچنین، یک عامل پایدارکننده دما برای سازگار کردن ذرات ژل از پیش تشکیل شده با شرایط مخازن دارای دما و درجه شوری بالا نیز افزوده شد. مطالعات منظمی بر روی روش تهیه ذرات ژل از پیش تشکیل شده و تأثیر ترکیب درصد آنها بر میزان نسبت تورم ذرات ژل از پیش ساخته شده انجام گرفت.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۱/۲۰  
تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۰۱/۲۲  
تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۴/۲۳

### واژگان کلیدی:

ذرات ژل از پیش تشکیل شده؛ یکپارچگی تولید، سنتر، نسبت تورم.

### مقدمه

معمولاً به غلظت‌های بالایی از پلیمر و مواد پیونددهنده پلیمری برای تولید ژلی قوی نیاز دارد. پیش‌بینی زمان انعقاد و خواص فیزیکی آن دشوار است. تزریق پی‌درپی ژلانت درون مخزن احتمالاً باعث ایجاد جدایش کروماتوگرافی در ترکیب درصد ژلانت<sup>۶</sup> می‌شود و بیشتر آنها در شرایط مخزن با دمای بالا (معمولاً بالاتر از ۹۰ درجه سانتی‌گراد)، پایدار نیستند [۹].

یکی از رویکردهای جدید که فاقد معایب ژل درجاست، استفاده از ذرات ژل از پیش ساخته شده می‌باشد که انبساط‌پذیر و آبدوست<sup>۹</sup> هستند. ذرات ژل از پیش تشکیل شده محصولاتی پودری هستند که از یک پیوند پلیمری تشکیل یافته‌اند و بعد از شناور شدن در آب تازه یا آب نمک، متورم<sup>۱۰</sup> خواهند شد. ذرات ژل از پیش تشکیل شده برای یک دوره‌ی زمانی به آب تزریقی اضافه می‌شوند و بعد از آن، دوباره آب معمولی تزریق می‌شود. ذرات ژل از پیش تشکیل شده برای کاربرد در میادین نفتی به علت آسانی تنظیم اندازه‌ی ذرات در محدوده‌ی میکرومتر تا میلی‌متر، توانایی تورم در آب نمک، مقاومت در برابر محیط با درجه شوری متوسط، خواص مکانیکی قابل تنظیم و نسبت‌های تورم قابل تنظیم، مناسب هستند [۱۰]. ذرات ژل از پیش تشکیل شده در حدود ۴۰۰۰ چاه در کشور چین برای کاهش کانالیزه شدن سیال در سیلاب‌زنی آب و پلیمر به کار برده شده‌اند [۱۱].

در طی سال‌های گذشته، بهبود بازده جارویی سیلاب زنی با آب، موضوع طیف وسیعی از مطالعات پژوهشی بوده 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. همان‌طور که میدانیم در بیشتر مخازن، مقدار قابل توجهی از نفت 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 چاه‌های 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 صرفه‌ی اقتصادی تولید از آن می‌گردد [۵-۶]. هزینه سالانه فرآورش و جداسازی این آب حدود ۴۰ بیلیون دلار<sup>۶</sup> تخمین زده شده است [۵، ۷].

استفاده از ژل‌های پلیمری یکی از مهم‌ترین روش‌های تصحیح ناهمگنی مخزن است [۸]. برخی از روش‌های کنترل یکپارچگی تولید از طریق استفاده از ژل، معایب قابل توجهی دارند: توده ژل درجا<sup>۷</sup>

\* نویسنده‌ی عهد دار مکاتبات (h.saghafi@nioc.ir)

هنگام استفاده از آب نمک با درجه شوری بالا برای تولید PPG ها، آب نمک منجر به نسبت تورم کمتر، مقاومت بیشتر ذره متورم شده و افزایش مقاومت ژل به وسیله از دست دادن آب ذرات متورم شده، می‌شود. در نتیجه، باعث کاهش پی‌آمدهای تزریق و کاهش بیشتر در نفوذپذیری آب می‌شود. همچنین PPG های کاملاً متورم شده یک رفتار نازک‌شدگی<sup>۱۱</sup> یا رفتار شبه پلاستیک<sup>۱۲</sup> از خود نشان می‌دهند و از یک مدل توانی تبعیت می‌کنند [۱۲]. فاکتور مقاومت با افزایش غلظت آب نمک و عرض شکاف افزایش ولی با افزایش شدت جریان کاهش می‌یابد [۱]. نتایج تعدادی از مطالعات نشان می‌دهند که ذرات ژل از پیش تشکیل شده به‌طور موفق به درون مخازن بدون شکاف<sup>۱۳</sup> و شکافدار تزریق شده‌اند و زمان واقعی پاسخ فشاری تزریق می‌تواند برای تنظیم غلظت و اندازه‌ی ذرات ژل از پیش تشکیل شده به‌منظور تناسب بهتر با مخزن، مورد استفاده قرار گیرد [۱۲].

موفقیت استفاده از هر ماده شیمیایی شدیداً به مشخصه‌های میدان نفتی بستگی دارد. به دلیل تفاوت در دما، ترکیبات معدنی، تخلخل، نفوذپذیری، سختی<sup>۱۴</sup>، pH و درجه شوری آب در میان میدان‌های نفتی، ممکن است یک نوع خاص از این ذرات مشخص به‌کار برده شده برای یک میدان نفتی، برای سایر مخازن مناسب نباشد. ذرات ژل از پیش تشکیل شده به‌صورت موفقیت‌آمیز در میدان‌های بالغ<sup>۱۵</sup> به‌کار برده شده‌اند، اما تعداد بسیار کمی گزارش آزمایشگاهی در ارتباط با بررسی اثر گروه‌های عاملی بر میزان نسبت تورم ذرات ژل از پیش ساخته شده وجود دارد [۱۰]. در این مقاله اثر پارامترهای مختلفی نظیر نوع و غلظت مونومرها بر میزان تورم ذرات ژل از قبل شکل گرفته انجام شد.

#### ۱- رویکرد آزمایشگاهی

##### ۱-۱- مواد شیمیایی

مونومرهای استفاده شده برای تهیه ذرات ژل از پیش ساخته شده عبارتند از: acrylamide AM (خلوص ۹۸/۵ درصد)، N,N-dimethyl acrylamide DA (خلوص ۹۸/۵ درصد)، 2-methylpropane sulfonic sodium salt AMPSNa (خلوص ۹۹ درصد)، N-vinylpyrrolidone NVP (خلوص ۹۸ درصد)، و N,N'-methylenebis (acrylamide) MBA (خلوص ۹۹ درصد) به عنوان عامل پیوند دهنده پلیمری. آمونیوم کلراید<sup>۱۶</sup>، N,N',N',N'-tetramethylethylenediamine (خلوص ۹۹ درصد) و سدیم پرسولفات<sup>۱۷</sup> نیز به ترتیب به‌عنوان عامل تورم، کاتالیست، و آغازگر<sup>۱۸</sup> واکنش پلیمری سنتز ژل مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی مواد شیمیایی ذکر شده از شرکت شیمیایی بیجینگ<sup>۱۹</sup> چین خریداری

شده بودند.

از  $\text{Na}^+$  Nano clay Montmorillonite به عنوان اصلاح کننده خواص مکانیکی استفاده شد. این ذرات خاک رس با اندازه نانو از شرکت آلدریج<sup>۲۰</sup> تهیه شد. ضمناً از نیتروژن تولیدی گروه صنعتی دلوار افزار با خلوص ۹۹/۹۹۵ درصد در تهیه ذرات ژل از پیش تشکیل شده، استفاده گردید.

#### ۱-۲- سنتز ذرات ژل از پیش ساخته شده

ذرات ژل از پیش ساخته شده از طریق پلیمریزاسیون مونومرها به روش رادیکال‌های آزاد در دمای اتاق (۲۷ درجه سانتی‌گراد) درون آب مقطر و با استفاده از N,N-methylenebis (acrylamide) MBA به عنوان عامل پیوند دهنده پلیمری و سدیم پرسولفات به عنوان آغازگر واکنش، تهیه شدند. برخی افزودنی‌ها نظیر آمونیوم کلراید، N,N',N',N'-tetramethylethylenediamine (خلوص ۹۹ درصد) و Nano clay Montmorillonite Na به ترتیب به عنوان عامل تورم، کاتالیست و اصلاح‌کننده‌ی خواص مکانیکی مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی سنتزها در آب مقطر و در درصد جرمی‌های مختلف از N,N-dimethyl acrylamide (AM) ، 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic sodium (DA) ، N-vinylpyrrolidone NVP (salt AMPSNa) ، و دست‌ورالعمل میزان مصرف هر یک از این مواد در جدول ۱ آورده شده‌اند. فرایند ساخت به قرار زیر است:

Nano clay Montmorillonite  $\text{Na}^+$  به مقدار لازم به آب مقطر اضافه شد. بعد از آن، میکسر به مدت ۴ ساعت در حمام فراصوتی<sup>۲۱</sup> تحت تابش پیوسته اشعه قرار گرفت. سپس، مقدار مشخصی از مونومرهای AM و NVP وزن شده به‌آرامی به محلول پراکنده‌ی خاک رس اضافه شدند. در حین هم‌زدن محلول، مونومرهای DA و AMPSNa به‌همراه عامل پایدارکننده دما اضافه شدند. هم‌زدن به مدت یک ساعت ادامه داشت تا زمانی که تمامی مونومرها به‌طور کامل پراکنده شدند. در ادامه، MBA به درون محلول ریخته شد. سپس آمونیوم کلراید اضافه و در عین حال هم‌زدن سیستم و پاکسازی توسط نیتروژن<sup>۲۲</sup> ادامه داشت. بعد از هم‌زدن به مدت ۴۰ دقیقه، مقدار مشخصی از سدیم پرسولفات و کاتالیست N,N',N',N'-tetramethylethylenediamine اضافه شدند و پاکسازی به وسیله‌ی نیتروژن متوقف شد. سپس، واکنش گرماده پلیمریزاسیون فوراً شروع شد و هیدروژل‌های تشکیل شده در مدت ۲۰ دقیقه مشاهده شدند. با برش ژل‌های به‌دست آمده به تکه‌های کوچک و سپس، خشک کردن آنها در اجاق در دمای ۵۵

۱ | ترکیبات شیمیایی ذرات ژل از پیش تشکیل شده و رفتار تورمی آنها در آب مقطر (DW)، آب تزریقی (IW)، آب تولید (PW) و آب همزاد (CW)

نسبت تورم (آب همزاد)	نسبت تورم (آب تولید)	نسبت تورم (آب تزریقی)	نسبت تورم (آب مقطر)	TEMED	APS	MB	MBA	NH <sub>4</sub> Cl	AMPSNa	NVP		DA		AM		PPG	
										وزنی %	ن.م. %	وزنی %	ن.م. %	وزنی %	ن.م. %		
۲۰/۰	۲۰/۰	۲۱/۰	۲۳/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG1
۲۲/۰	۲۲/۰	۲۳/۰	۲۷/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱۵	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG2
۲۳/۰	۲۴/۰	۲۵/۰	۲۹/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG3
۲۵/۰	۲۵/۰	۲۶/۰	۳۱/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۵	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG4
۱۹/۰	۲۰/۰	۲۱/۰	۲۳/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG5
۲۰/۰	۲۰/۰	۲۱/۰	۲۳/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۵	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG6
۱۷/۰	۱۷/۰	۱۸/۰	۲۰/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۷۵	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG7
۱۸/۰	۱۹/۰	۲۰/۰	۲۲/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۵	۰/۵	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG8
۱۸/۰	۱۸/۰	۱۹/۰	۲۱/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۱	۰/۵	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG9
۱۸/۰	۱۹/۰	۱۹/۰	۲۰/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۱/۵	۰/۵	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG10
۱۸/۰	۱۸/۰	۱۸/۰	۱۹/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۲	۰/۵	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG11
۱۸/۰	۱۸/۵	۱۸/۰	۱۹/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۲/۵	۰/۵	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG12
۱۷/۵	۱۷/۵	۱۸/۰	۱۹/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۳	۰/۵	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG13
۲۵/۰	۲۷/۰	۲۸/۰	۶۵/۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۲/۵	۰/۱	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG14
۲۶/۰	۲۷/۰	۲۷/۰	۶۳/۰	۰/۰۵	۰/۱	۲/۵	۰/۱	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG15
۲۵/۵	۲۶/۰	۲۸/۰	۶۴/۰	۰/۰۵	۰/۲	۲/۵	۰/۱	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG16
۲۵/۰	۲۶/۰	۲۷/۰	۶۴/۰	۰/۱	۰/۲	۲/۵	۰/۱	۰	۲/۶۸	۱	۱/۳۰	۱	۱/۱۶	۱	۲۴/۸۷	۳۰	PPG17
۲۳/۰	۲۳/۰	۲۵/۰	۵۳/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰	۳/۲۱	۱	۱/۵۵	۱	۱/۳۹	۱	۲۳/۸۵	۲۴	PPG18
۲۶/۰	۲۷/۰	۲۹/۰	۱۰۲/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰	۴/۵۷	۱	۲/۲۱	۱	۱/۹۷	۱	۲۱/۲۴	۱۵	PPG19
۲۷/۰	۲۸/۰	۲۹/۰	۱۱۴/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰	۶/۸۳	۱	۳/۳۱	۱	۲/۹۵	۱	۱۶/۹۲	۸	PPG20
۲۶/۰	۲۷/۰	۲۸/۰	۱۱۵/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰	۸/۶۶	۱	۴/۱۹	۱	۳/۷۴	۱	۱۳/۴۱	۵	PPG21
۲۵/۰	۲۷/۰	۲۸/۰	۱۱۶/۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰	۱۰/۵۴	۱	۵/۱۱	۱	۴/۵۵	۱	۹/۸۰	۳	PPG22
۱۸/۰	۱۸/۵	۲۰/۰	۵۷/۰	۰/۰۵	۰/۱	۲/۵	۰/۳	۰	۱۶/۹۷	۲	۴/۱۱	۱	۳/۶۶	۱	۵/۲۶	۲	PPG23
۱۶/۰	۱۷/۰	۱۶/۶	۲۸/۰	۰/۰۵	۰/۱	۲/۵	۰/۵۵	۰	۱۶/۹۷	۲	۴/۱۱	۱	۳/۶۶	۱	۵/۲۶	۲	PPG24
۱۴/۵	۱۵/۰	۱۴/۵	۲۷/۰	۰/۰۵	۰/۱	۲/۵	۰/۶۵	۰	۱۶/۹۷	۲	۴/۱۱	۱	۳/۶۶	۱	۵/۲۶	۲	PPG25
۱۴/۰	۱۵/۰	۱۵/۵	۲۶/۰	۰/۰۵	۰/۱	۲/۵	۰/۸	۰	۱۶/۹۷	۲	۴/۱۱	۱	۳/۶۶	۱	۵/۲۶	۲	PPG26

ظرفیت تورم در آب، به گروه آبدوست موجود در مولکول پلیمر وابسته است. بنابراین، تعداد گروه‌های آبدوست و اندازه‌ی سه بعدی ساختار ژل پیوند خورده، اثرات قابل توجهی بر ظرفیت تورم دارند. با افزایش غلظت ماده‌ی پیونددهنده پلیمری، تعداد بیشتری از گروه‌های آبدوست در واکنش تشکیل ژل شرکت می‌کنند، که باعث کاهش آبدوستی می‌شود. در همان زمان، به دلیل مقاومت فضایی<sup>۳۳</sup> مولکول‌ها، مادامی‌که غلظت ماده‌ی پیونددهنده پلیمری بسیار زیاد است، ظرفیت تورم کاهش خواهد یافت.

جدول ۱- نشان می‌دهد که نسبت تورم ژل‌های نانوکامپوزیتی با افزایش درصد وزنی رس به آرامی کاهش می‌یابد (ترکیب درصد PPG8 تا PPG13). تقویت ژل پلیمری به وسیله‌ی رس از طریق تشکیل یک کامپوزیت لایه‌ای<sup>۳۴</sup>، برای مدت تقریباً ۳۰ سال مورد

درجه سانتی‌گراد، تحت شرایط خلاء به مدت ۲۴ ساعت ژل‌های ذره‌ای از قبل شکل گرفته به دست می‌آید.

### ۳-۱- روش آزمایشگاهی

ترکیب درصد شیمیایی آب‌های اصلی مورد استفاده در تست‌ها در جدول ۲- گزارش شده‌اند. بر اساس دستورالعمل آورده شده در جدول ۱-، ۲۶ عدد نمونه از ذرات ژل از پیش تشکیل شده سنتز شدند. برای هر نمونه یک مقدار وزن شده پودر ژل خشک ( $W_d$ ) به آرامی و کم‌کم درون ۵۰ میلی‌لیتر لوله‌ی آزمایشگاهی پر شده با آب‌های مختلف در دمای اتاق ریخته شد. سطح مشترک بین قسمت آب نمک در ته که شامل ذرات ژل از پیش تشکیل شده بوده و آب نمک در بالا، تا نقطه‌ای که نرخ تورم صفر می‌شد، دنبال شد. در آن نقطه، هیدروژل‌ها از مایع خارج و توسط یک فیلتر کاغذی به منظور حذف آب اضافی فیلتر شدند و وزن نهایی آنها اندازه‌گیری شد ( $W_s$ ). همه‌ی آزمایش‌ها چندین بار انجام شدند تا زمانی که چهار وزن اندازه‌گیری شده‌ی متوالی در محدوده‌ی یک درصدی خطای آزمایش، یکسان شدند. سپس، نسبت تورم بر صورت زیر محاسبه شد:

$$\text{Swelling ratio} = \frac{W_s - W_d}{W_d} \quad (1)$$

نتایج تست‌های نسبت تورم برای تمامی ۲۶ نمونه در شکل‌های ۱- و ۲ نشان داده شده‌اند.

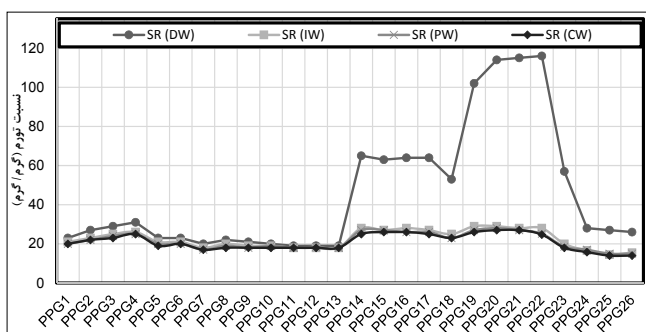
### ۲- نتایج و بحث

جدول ۱- نسبت تورم را برای نمونه‌های سنتز شده در آب مقطر، تزریقی، تولیدی و همزاد ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که نسبت تورم ذرات ژل از پیش تشکیل شده به ترکیب درصد آنها و همچنین به شرایط محیط اطراف آنها وابسته است.

همان‌طور که در جدول ۱- مشخص شده است، با افزایش درصد وزنی  $\text{NH}_4\text{Cl}$  تا ۲ درصد وزنی، نسبت تورم افزایش یافته است (ترکیب درصد PPG1 تا PPG3) و افزایش درصد وزنی  $\text{NH}_4\text{Cl}$  بیش از ۲ درصد وزنی اثر خاصی بر نسبت تورم ندارد (ترکیب درصد PPG3 تا PPG4). غلظت  $\text{NH}_4\text{Cl}$  می‌تواند به عنوان کنترل‌کننده ظرفیت تورم از طریق اثر بر هیدرولیز گروه عاملی  $-\text{CONH}_2$  عمل کند. غلظت عامل پیوند دهنده پلیمری اثری مهم بر ساختار و خواص ژل دارد. ترکیب درصد شیمیایی PPG5 تا PPG7 ارتباط بین ظرفیت تورم و غلظت ماده‌ی پیوند دهنده پلیمری را نشان می‌دهد؛ با افزایش غلظت ماده پیوند دهنده پلیمری، ظرفیت تورم کاهش می‌یابد.

۲ ترکیب شیمیایی آب تزریقی (IW)، آب تولید (PW) و آب

عنوان	آب تزریقی	آب تولید	آب همزاد
سازند	-	-	یاماها
وزن مخصوص در دمای ۶۰ درجه فارنهایت	۱/۰۳	۱/۰۸۷	۱/۱۵۷۵
غلظت	گرم بر لیتر	گرم بر لیتر	گرم بر لیتر
K	۰/۲۳۰	۰/۰۲۵	۰/۰۵۱
Na	۱۲/۶۹۵	۲۰/۴۵	۶۶/۲۸۹
$\text{Ca}^{2+}$	۰/۸	۱۵/۱۴۵	۱۷/۰۴۶
$\text{Mg}^{2+}$	۱/۳۷۳	۱/۸۴۴	۲/۲
$\text{Fe}^{2+}$	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱
$\text{Cl}^-$	۲۱/۹۱	۴۷/۲۴	۱۳۸/۳۹۴
$\text{SO}_4^{2-}$	۲/۹۵	۰/۴۸	۰/۴۴
$\text{HCO}_3^-$	۰/۱۸	۰/۳۲	۰/۳۵۵
مجموع (گرم بر لیتر)	۴۰/۱۳۹۴	۸۵/۵۰۵۲	۲۲۴/۷۷۶

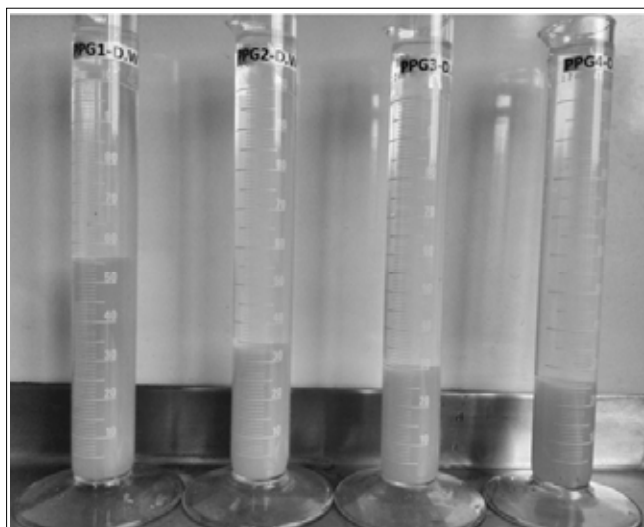


۱ رفتار تورمی نمونه‌های ذرات ژل از پیش تشکیل شده در آب مقطر (DW)، آب تزریقی (IW)، آب تولید (PW) و آب همزاد (CW).

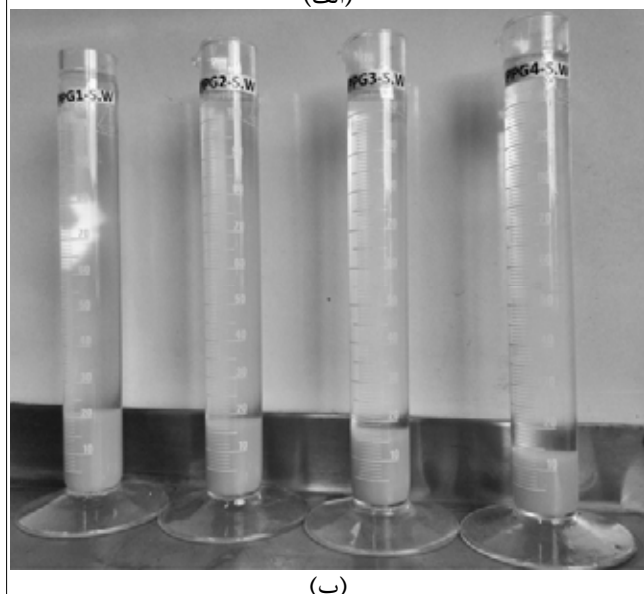
کاتیونی منجر به پیوند یونی عرضی شده و حجم هیدروژل را کاهش می‌دهد [۱۳]. با مقایسه‌ی نتایج آب مقطر با آب نمک‌های با درجه شوری بالاتر - که شامل آب‌های تزریقی، تولیدی، و آب همزاد می‌شود - کاهش شدیدی در نسبت تورم دیده می‌شود (شکل-۱)، که این، به دلیل وجود نیمه‌ی آنیونی در شبکه پلیمری است (شکل-۲).

#### علائم و اختصارات

CW	آب همزاد مخزن
DW	آب مقطر
IW	آب تزریقی



(الف)



(ب)

۲ ظرفیت تورم ذرات ژل از قبل تشکیل شده ۱ تا ۴ (الف) در آب مقطر (ب) در آب تزریقی



مطالعه قرار گرفته است [۱۱]. شی و همکاران [۱۲] اثرات بین‌سطحی را بر روی استحکام نانوکامپوزیت‌ها با این فرض که پلیمرها به‌طور مستقیم روی سطح ذرات رس در حال اتصال هستند، مطالعه کردند. ذرات مسطح و باریک خاک رس دو سطح متفاوت داشتند. سطح مسطح‌تر به‌صورت منفی و لبه‌ی باریک‌تر به‌صورت مثبت شارژ شده است. خواص سطح، ناخالصی به‌جامانده<sup>۲۵</sup>، و هندسه ذرات رس نقش بسیار مهمی در سنتز مواد کامپوزیتی ایفا می‌کنند. سایر گزارش‌ها نشان داده‌اند که افزودن رس به پلیمر همگن<sup>۲۶</sup> ذرات ژل، خواص مکانیکی آنها را به‌طور چشمگیری ارتقاء می‌بخشد. با افزایش غلظت Nano clay Montmorillonite، ظرفیت تورم به‌آرامی کاهش می‌یابد، اما تغییرات نسبت تورم قابل توجه نبودند. این روند، در شکل-۱ قابل مشاهده است. ترکیبات پراکسید<sup>۲۷</sup> می‌توانند به‌عنوان آغازگر واکنش پلیمریزاسیون و به‌منظور افزایش سرعت واکنش مورد استفاده قرار گیرند؛ یک کاتالیست به‌منظور افزایش نرخ تفکیک<sup>۲۸</sup> 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. ترکیب شیمیایی PPG14 تا PPG16 رابطه‌ی بین ظرفیت تورم در برابر غلظت آغازگرهای واکنش را نشان می‌دهد. زمانی که غلظت آغازگر واکنش افزایش می‌یابد، ظرفیت تورم کاهش نمی‌یابد. شکل-۱ اثر ترکیبات پراکسید را بر نسبت تورم نشان می‌دهد. با مقایسه ظرفیت تورم PPG16 و PPG17 می‌توان مشاهده کرد که غلظت کاتالیست اثر چشمگیری بر ظرفیت تورم نگذاشته است. این موضوع می‌تواند مربوط به این حقیقت باشد که کاتالیست باعث افزایش نرخ واکنش شیمیایی می‌شود، بدون آنکه خودش هیچگونه تغییر شیمیایی (چه به صورت دائم و چه موقت) متحمل شود.

برای سنتز PPG، چهار نوع مونومر متفاوت استفاده شده است. با کاهش نسبت مولی AM/(DA+NVP+AMPSNa)، نسبت تورم و مقاومت برون‌ترایی افزایش یافتند (ترکیب شیمیایی PPG18 تا PPG22 در جدول-۱ مشاهده شود). به‌علاوه، برای داشتن یک نتیجه‌گیری بر مبنای شکل-۱، می‌توان بیان کرد که در این نقطه که آب با درجه شوری بالا منجر به نسبت تورم کمتر می‌شود، هیدروژل‌ها مقادیر بالایی از نسبت تورم در آب مقطر از خود نشان می‌دهند؛ این رفتار با در نظر گرفتن برهم‌کنش دفعی بین گروه‌های با بار منفی در زنجیرهای پلیمری پلی‌الکترولیت<sup>۲۹</sup> و وابستگی شدید آنها به آب در نبود یون‌های فلزی توجیه‌پذیر است. با افزایش غلظت نمک، برهم‌کنش بین زنجیرهای پلیمری با بار منفی با فلزات دوترکیبی<sup>۳۰</sup>

۲. نسبت جرم مولکولی ۲:۱:۱ در مونومرهای AM، DA، NVP و AMPSNa به همراه ۰/۶۵ درصد وزنی N,N-methylenebis acrylamide و ۲/۵ درصد وزنی Nano clay Montmorillonite Na<sup>+</sup> پایدارترین حالت را در بین نمونه ژل های ساخته شده (برای مخازن با درجه شوری و دمای بالا) از خود نشان می‌دهد.

۳. بر طبق نتایج، از بین اجزای تشکیل دهنده ژل، ماده اتصال دهنده عرضی و بعد از آن مونومر AMPSNa بیشترین تأثیر را بر میزان تورم داشتند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد وزنی اتصال دهنده عرضی و خاک رس، درجه‌ی تورم به کاهش یافت.

۴. همچنین بر طبق نتایج، آغاز گر واکنش و کاتالیست، تأثیر آن چنانی بر میزان تورم نمی‌گذارند. ■

PPGs ذرات ژل از پیش تشکیل شده  
PW آب تولیدی  
SR نسبت تورم  
Wd جرم خشک پودر ذرات ژل از پیش تشکیل شده  
Ws جرم بعد از تورم ذرات ژل از پیش تشکیل شده

### نتیجه‌گیری

۱. یک سری ذرات ژل از پیش تشکیل شده در مقیاس آزمایشگاهی با ویژگی‌های مطلوب به صورت موفقیت‌آمیز سنتز شدند. نتایج نشان داد که نسبت تورم ذرات ژل از پیش ساخته شده بهبود یافته با ترکیب درصد آنها و شرایط محیط اطراف آنها مانند غلظت آب نمک مشخص گردید.

### پانویس‌ها

- Sweep efficiency
- Salinity
- Free radical cross linking
- Cross-linker
- Ammonium chloride
- USD
- In-situ bulk gel
- Gelant
- Hydrophilic
- Swell
- Shear thinning.
- Pseudo plastic
- Fracture
- Hardness
- Mature fields
- Ammonium chloride
- Sodium persulfate
- Initiator
- Beijing Chemical
- Aldrich, St Louis, MO, USA
- Ultrasonic
- Nitrogen purging
- Steric hindrance
- Intercalated composite
- Trace impurity
- Homopolymer
- Peroxide compounds
- Dissociation
- Polyelectrolyte polymeric chains
- Divalent

### منابع

- [1] Bai B., Zhang H., Preformed-particle-gel transport through open fractures and its effect on water flow, SPE Journal, 16, 3882011, 400-.
- [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, 10832014, 1093-.
- [3] Seright R., Use of preformed gels for conformance control in fractured systems, SPE Journal, 12, 591997, 65-.
- [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, 1232015, 130-.
- [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, 30-2000, 51.
- [8] Elsharafi M.O., Bai B., Effect of Weak Preformed Particle Gel on Unswept Oil Zones/Areas during Conformance Control Treatments, Industrial & Engineering Chemistry Research, 51, 11547,11554-2012.
- [9] 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, 5022015, 513-.
- [10] Bai B., Huang F., Liu Y., Seright R.S., Wang Y., Case study on preformed particle gel for in-depth fluid diversion, SPE Symposium on Improved Oil Recovery, Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [11] Theng B.K.G., Formation and properties of clay-polymer complexes, Elsevier, 2012.
- [12] Shi H., Lan T., Pinnavaia T.J., Interfacial effects on the reinforcement properties of polymer-organoclay nanocomposites, Chemistry of materials, 8, 15841996, 1587-.
- [13] Vasheghani-Farahani E., Vera J.H., Cooper D.G., Weber M.E., Swelling of ionic gels in electrolyte solutions, Industrial & Engineering Chemistry Research, 29, 5541990, 560-.