

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای اندازه و غلظت ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته و تراوایی محیط متخلخل بر میزان فاکتور مقاومت و مقاومت پسماند

پوریا مال میر، شیما ابراهیم زاده، سید مجید هاشمی و حمیدرضا ثقفی*

پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز، پردیس توسعه صنایع بالادستی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

چکیده

تولید آب ناخواسته یکی از مهمترین چالش‌های تولید از مخازن نفت و گاز می‌باشد. تولید آب می‌تواند موجب خوردگی تأسیسات و همچنین کاهش تراوایی نسبی نفت شود. تزریق ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته به عنوان روشی جهت کنترل تولید آب و بهبود بازده جاروبی از سال ۲۰۰۷ در دنیا معرفی گردید. پارامترهای مختلفی بر عملکرد ژل‌های ذره‌ای از قبل شکل گرفته مؤثرند که از جمله آنها می‌توان به پایداری در شرایط دما و فشار مخزن، شوری آبی که سوسپانسیون ژل در آن ساخته می‌شود و همچنین اندازه و غلظت ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته اشاره نمود. آزمایش لوله قلمی به عنوان یک روش مرسوم می‌تواند به شبیه سازی و شناخت سازوکارهای موثر تزریق ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته در مخزن مورد استفاده قرار بگیرد. در این پژوهش به بررسی پارامترهای کلیدی تزریق ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته به مخزن به وسیله آزمایش لوله قلمی پرداخته شده است. بدین منظور اثر اندازه ژل ۴۱، ۶۸/۵، ۹۰ μm ، غلظت ژل ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰ ppm، تراوایی لوله قلمی ۵۷، ۶۳/۵، ۷۴، ۲۰۵ و دبی تزریقی ۰/۰۱۶، ۰/۰۳۲، ۰/۰۴۸ cc/min دیده شده است. نتایج نشان داده است که میزان اثر اندازه ژل وابسته به میزان نگهداشت آن در محیط متخلخل بوده و با افزایش غلظت ژل فشار آستانه افزایش یافته و در نتیجه فاکتور مقاومت پسماند افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش تراوایی فشار تزریق افزایش می‌یابد. به‌طور کلی این پژوهش نشان داد که سازوکار اصلی تزریق ژل در محیط متخلخل شکستن ذرات ژل می‌باشد

کلمات کلیدی: ژل از قبل شکل گرفته؛ کنترل آب؛ فاکتور مقاومت؛ فاکتور مقاومت پسماند؛ کاهش

مقدمه

به اتفاق چاه‌ها در پایان عمر تولید نفت خود، تولید آب خواهند داشت [۳]. علاوه بر این، تولید آب می‌تواند موجب خوردگی تجهیزات، تشکیل رسوب و همچنین هزینه‌های بالای جداسازی آب و نفت شوند [۴] به‌طوری‌که هزینه سالانه جداسازی و بهبود آب اضافی در دنیا در حدود ۴۰ میلیارد دلار

تولید آب ناخواسته در مخازن نفتی و گازی یکی از مهمترین چالش‌های تولید از آنها می‌باشد [۱ و ۲]. طبق بررسی‌های ویل و همکاران اکثر قریب

است. همچنین جهت بهینه‌سازی تزریق اثر توزیع تراوایی محیط متخلخل و دبی تزریقی نیز بر عملکرد ژل سنتز شده مورد بررسی قرار گرفت.

تجهیزات، مواد شیمیایی و روش‌ها تجهیزات آزمایشگاهی

جهت انجام آزمایش‌های طراحی شده در این پژوهش یکسری دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده قرار گرفته است که در ذیل به آنها اشاره می‌گردد:

- دستگاه سیلاب‌زنی مغزه که در آن به جای نگهدارنده مغزه از لوله قلمی استفاده شده است.
- ظرف ترکیب مجدد^۲: جهت مخلوط کردن کامل سوسپانسیون حین آزمایش
- لوله قلمی^۳ با طول ۵۱ cm، شعاع داخلی ۳/۵ mm و حجم داخلی ۱۹/۶۳ cm^۳
- پمپ جابجایی مثبت فشار بالا جهت تزریق سیالات به درون لوله قلمی
- فشارسنج دیجیتالی جهت ثبت داده‌های فشار حین تزریق سیالات
- دیتالاگر و کامپیوتر جهت ثبت داده‌های فشار در طول آزمایش

مواد شیمیایی

ذرات ژل از قبل شکل گرفته

ژل از پیش ساخته شده قبل از انجام آزمایش‌های تزریق سنتز شده و پس از خشک کردن و مش‌بندی جهت استفاده در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت سنتز ژل از سه مونومر آکریل آمید (AM)، نمک سدیم آکریل آمید متیل پروپان سولفونیک اسید (AMPSNa)، نرمال وینیل پیرولیدون (NVP) استفاده شد. همچنین از متیلن بیس آکروامید (MBA) به عنوان عامل پیونددهنده عرضی، تترا متیل اتیلن دی‌آمید (TMED) و سدیم پرسولفات (APS) به ترتیب به عنوان کاتالیست و آغازگر واکنش سنتز ژل استفاده شد. جهت اصلاح

تخمین زده می‌شود [۵]. بنابراین کنترل تولید آب و بستن مسیرهای آبی مسئله‌ای مهم در صنعت نفت می‌باشد [۶ و ۷]. برای کنترل آب در مخازن و چاه‌ها از دو روش مکانیکی و شیمیایی استفاده می‌شود [۸]. در روش مکانیکی معمولاً عملیات در نزدیکی دهانه چاه^۱ انجام می‌گیرد، در حالی که هدف روش‌های شیمیایی کل مخزن می‌باشد.

تزریق ژل از قبل شکل گرفته به عنوان یک روش شیمیایی از سال ۲۰۰۷ آغاز شده است [۹]. روش تزریق ژل از قبل شکل گرفته روشی مقرون بصرفه جهت بستن نواحی تولید آب، افزایش بازده جارویی و بازیافت بالاتر نفت درجا می‌باشد [۱۰]. ژل‌های از قبل شکل گرفته در مقایسه با ژل‌های درجا مشکلات کنترل زمان ژلی شدن و تغییر ترکیب ژل را نداشته و جایگزین بسیار خوبی برای این دسته از ژل‌ها می‌باشند [۱۱]. ژل‌های از قبل شکل گرفته با پایداری بسیار خوب در شرایط دما، فشار و شوری مخزن می‌توانند بازدهی جارویی بسیار خوبی را ایجاد کنند [۱۲]. بزرگترین مزیت ژل‌های از قبل شکل گرفته آماده‌سازی آنها در سطح زمین می‌باشد که حین تزریق آن می‌توان اندازه ذرات و غلظت سوسپانسیون تزریقی را اصلاح نمود [۱۳]. با این وجود، انتخاب نامناسب اندازه ذرات ژل و غلظت آن می‌تواند موجب اختلال در تزریق‌پذیری و آسیب سازندی شود. بنابراین انتخاب صحیح خواص فیزیکی ژل از قبل شکل گرفته مانند سایز ذرات و غلظت سوسپانسیون آن می‌تواند در موفقیت عملیات تزریق بسیار مهم باشد. بدین صورت که با توجه به سایز حفرات سازند، سایز بهینه ژل باید تزریق شده و با افزایش غلظت گرانیروی محلول ژل بیشتر شده و از یک طرف می‌تواند باعث کنترل بهتر تولید آب ناخواسته شده ولی از طرف دیگر می‌تواند موجب آسیب سازندی شود [۱۴]. به همین دلیل در این پژوهش ژل از قبل شکل گرفته را سنتز کرده و در چند سایز و چند غلظت مختلف در لوله قلمی تزریق شده و اثر این پارامترها برروی مقادیر فاکتور مقاومت و فاکتور مقاومت پسماند مشاهده شده

1. Near Wellbore
2. Recombine Cell
3. Slim Tube

خواص مکانیکی ژل نیز از نانورس مونت موریلونیت سدیم استفاده گردید.

سنتز ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته

نانورس مونت موریلونیت سدیم (MB) به میزان لازم به آب مقطر اضافه شده، سپس در حمام فراصوتی برای مدتی تحت تابش پیوسته قرار می‌گیرد. بعد از آن مقادیر مشخصی از مونومرهای AM و NVP وزن شده و به آرامی و همزمان با همزدن محلول به درون محلول ریخته می‌شوند. سپس مونومر، AMPSNa و یک عامل پایدارکننده دما (TSA) به مخلوط افزوده شده و همزدن مخلوط تا زمانی که مونومرها به طور کامل پراکنده شوند، ادامه خواهد داشت. در حالی که همزدن شدید و پاکسازی سیستم با نیتروژن انجام می‌شود، MBA های وزن شده به درون محلول ریخته شدند. بعد از همزدن، مقدار مشخصی از سدیم پرسولفات (APS) (و یا آمونیوم پرسولفات APS) و کاتالیست تترامیتیل اتیلن دی‌امید (TMED) اضافه شده و بعد از آن پاکسازی با نیتروژن متوقف گردید. واکنش گرمای پلیمریزاسیون بلافاصله شروع شده و تشکیل هیدروژل مشاهده خواهد شد. ترکیب درصد مواد استفاده شده در **جدول ۱** نشان داده شده است. ژل‌های حاصله با برش‌های مناسب به قطعات کوچک تبدیل و سپس در آون با دمای °C ۵۵ و تحت شرایط خلاء به مدت ۲۴ h، خشک شدند.

روش انجام آزمایشات

نمونه ژل‌های ذره‌ای از قبل شکل گرفته پس از تورم در آب‌های موردنظر، به منظور تزریق در لوله‌های قلمی جهت محاسبه فاکتورهای مقاومت و مقاومت پسماند تهیه می‌شوند.

مراحل محاسبه فاکتور مقاومت و فاکتور مقاومت پسماند

فاکتور مقاومت یک نوع گرانیروی مؤثر ذرات ژل از قبل شکل گرفته در محیط‌های متخلخل است که به صورت نسبت افت فشار تزریق ذرات ژل از قبل شکل گرفته به افت فشار تزریق آب در دبی‌های یکسان تعریف می‌شود. فاکتور مقاومت پسماند پارامتر مهم دیگری است که به نگهداشت (مجموع

جذب سطحی و به دام افتادن) ذرات ژل از قبل شکل گرفته مرتبط می‌باشد. این پارامتر به صورت نسبت افت فشار تزریق ثانویه آب به افت فشار تزریق اولیه آب در دبی‌های یکسان تعریف می‌شود. فاکتور مقاومت به صورت نسبت اختلاف فشار دیفرانسیلی ذرات ژل از قبل شکل گرفته تزریق شده به اختلاف فشار آب اولیه تزریق شده محاسبه می‌شود:

$$RF = \frac{\Delta P_{PPG}}{\Delta P_{BaseWater}} \quad (1)$$

فاکتور مقاومت پسماند به صورت نسبت افت فشار در تزریق ثانویه آب به افت فشار تزریق اولیه آب تعیین می‌شود:

$$RRF = \frac{\Delta P_{PostWater}}{\Delta P_{BaseWater}} \quad (2)$$

در این پژوهش با توجه به ثابت بودن دما، اثر پارامترهای غلظت، اندازه ذرات ژل از قبل شکل گرفته و سرعت جریان تزریقی در تراوایی‌های مختلف بر فاکتورهای مقاومت و مقاومت پسماند ذرات ژل از قبل شکل گرفته بررسی می‌شود.

مغزه‌های خرد شده^۱

نمونه‌های خرد شده در اندازه‌های مختلف و در مقیاس میکرومتر به منظور دستیابی به اندازه یکنواخت برای آزمایشات، غربال شدند. نمونه سنگ‌های مورد استفاده از مخزن بلال از نوع کربناته می‌باشد. سایز مش‌ها و مشخصات اندازه ذرات مورد استفاده در **جدول ۲** آورده شده‌اند.

لوله‌های قلمی

سنگ‌های خرد شده مطلوب برای پرکردن یک مجموعه لوله‌های قلمی فولادی ضد زنگ به کار برده می‌شوند. از یک توری مناسب در هر دو سمت لوله‌های قلمی برای جلوگیری از خروج پودرهای ریزتر سنگ استفاده می‌شود. لوله‌های قلمی با تراوایی‌های مختلف با استفاده از سنگ خرد شده ساخته می‌شوند. یک طرف لوله را به یک فشارسنج متصل کرده و تراوایی لوله با استفاده از قانون دارسی (با مشخص بودن طول لوله، سطح مقطع لوله، گرانیروی آب و اختلاف فشار حاصله) محاسبه می‌شود. مشخصات لوله‌های قلمی در **جدول ۳** و مشخصات آب‌های مورد استفاده در **جدول ۴** نشان داده شده است.

جدول ۱ ترکیب درصد اجزای تشکیل دهنده ژل ساخته شده

اکریل آمید	وینیل پیرولیدون	۱۲ اکریل آمیدو متیل پروپان سولفونیک نمک سدیم	متیلن بیس اکریل آمید	نانو رس مونت موریلونیت سدیم	عامل پایدار کننده حرارتی	آمونو پیرسولفات (آغاز گر واکنش)	تترامتیل اتیلن دیامید (کاتالیست)
AM	VP	AMPSNa	MBA	MB	TSA	APS	TEMED
وزن مولکولی	وزن مولکولی	وزن مولکولی	وزن مولکولی	وزن مولکولی	وزن مولکولی	وزن مولکولی	وزن مولکولی
۷۱	۱۱۱	۲۲۹	۱۵۴	۲۸۲/۲	-	۲۲۸/۲	۱۱۶
۵/۶۶	۹	۱۲/۹	۰/۵۷	۱/۷۷	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵

جدول ۲ سائز ذرات غربال شده از سنگ مخزن

سایز ذرات ژل از قبل شکل گرفته (mm)	سایز مش برای ذرات ژل از قبل شکل گرفته
۴۴-۶۳	۲۳۰-۳۲۵

جدول ۳ مشخصات لوله‌های قلمی

قطر خارجی لوله (mm)	طول (m)	حجم درونی (cm ³)	شعاع داخلی (mm)	ضخامت (mm)
۹/۵۲۵	۰/۵۱	۱۹/۲۳	۳/۴۶	۱/۲۹۸

جدول ۴ مشخصات آب مورد استفاده

نمونه آب	آب دریا	قبل از فیلتر شنی	ورودی فیلتر شنی	خروجی فیلتر شنی	خروجی اکسیژن زدا	چاه تزریقی	چاه تولیدی	پساب صنعتی	پارامتر
									دما
	۲۲	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳	۲۷	۴۴	۵۸	pH
	۸/۲	۸/۱	۸/۱	۸/۲	۸/۱	۸/۱	۶/۲	۵/۴	کدورت
	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۳/۵	۷	هدایت الکتریکی
	۷۵۹۱۹	۷۴۳۵۸	۷۴۳۵۸	۷۴۹۵۸	۷۵۹۱۹	۸۰۷۸۴	۴۲۷۶۴۵	۴۲۷۶۴۵	TDS
	۴۲۶۶۰	۴۳۳۰۴	۴۳۹۵۲	۴۳۱۰۰	۴۳۹۵۶	۴۳۷۷۸	۲۶۹۱۲۴	۲۶۵۳۴۸	TSS
	۴	۱۲	۱۲	۸	۱۲	۲۸	۲۶۰	۱۰۸	سولفات
	۳۱۲۰	۳۱۰۷	۳۱۳۲	۳۱۶۵	۳۱۱۴	۳۲۰۰	۴۷۴	۵۵۷	کلراید
	۲۳۳۹۷	۲۳۰۴۲	۲۳۳۹۷	۲۳۳۹۷	۲۳۰۴۲	۲۳۰۴۲	۱۶۱۲۹۷	۱۵۹۵۲۵	بی کربنات
	۸۷	۹۷	۹۰	۸۵	۹۰	۹۲	۱۲۶	۹۷	قلیائیت
	۸۰	۹۰	۸۸	۸۲	۱۰۴	۸۰	۱۰۴	۸۰	کلسیم
	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۹۳۰۰	۱۸۰۰	منیزیم
	۱۶۴۲	۱۶۴۲	۱۶۴۲	۱۶۴۲	۱۶۴۲	۱۶۴۲	۲۷۳۷	۳۵۸۸	سدیم
	۱۳۰۰۰	۱۳۰۰۰	۱۲۷۵۰	۱۲۷۵۰	۱۲۷۵۰	۱۲۷۰۰	۱۲۶۵۰	۶۵۸۰۰	پتاسیم
	۴۷۰	۵۲۵	۴۷۰	۴۶۰	۴۳۵	۴۶۰	۳۶۴۰	۲۶۴۰	لیتیوم
	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۱۸	استرانسیوم
	۴/۸	۴/۹	۴/۹	۴/۷	۴/۸	۴/۷	۱۰۱۸	۹۲۰	باریم
	≤۰/۱	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۶	۱	۸	روغن و گریس
	-	-	-	-	-	۰/۵	-	۶۴/۵	وزن مخصوص
	-	-	-	-	-	۱/۰۳	۱/۱۷۳۵	-	

دستگاه آزمایشگاهی

دستگاه شامل پمپ جابجایی مثبت، ظرف انتقال ترکیبی^۱ برای سوسپانسیون ذرات ژل از قبل تشکیل شده، ظرف انتقال آب نمک، فشارسنج، سیستم داده‌گیری و کامپیوتر می‌باشد (شکل ۱).

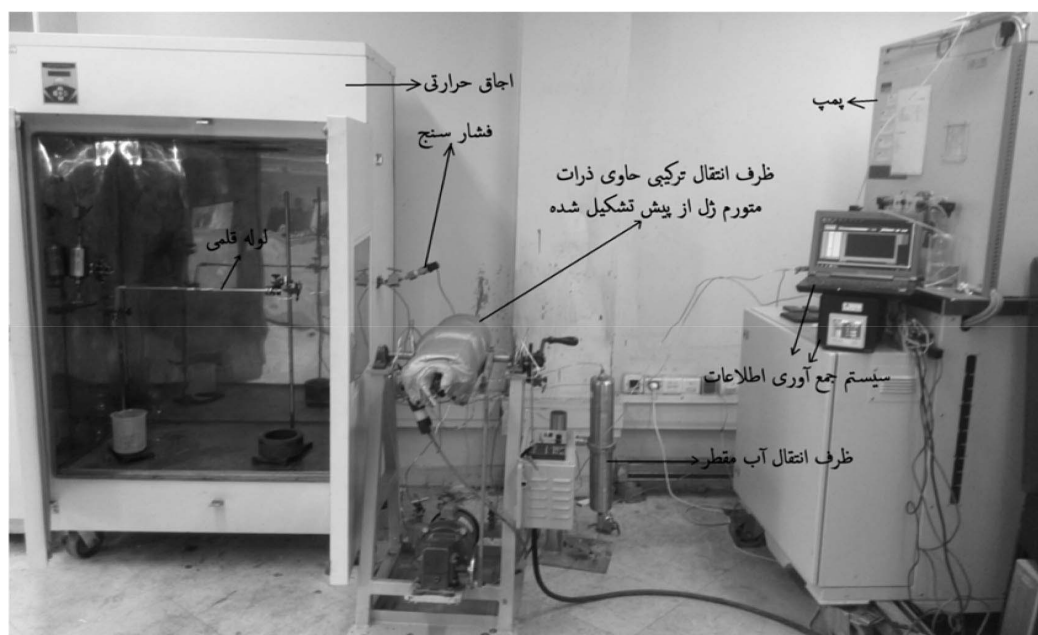
روش آزمایشگاهی محاسبه فاکتور مقاومت و فاکتور مقاومت پسماند

یک سری آزمایش‌های جریان لوله قلمی به منظور ارزیابی عملکرد ذرات ژل از قبل شکل گرفته در محیط‌های متخلخل بر حسب فاکتور مقاومت و فاکتور مقاومت پسماند انجام می‌شود. بعد از آنکه یک لوله قلمی ساخته می‌شود، گام‌های زیر باید در راستای ارزیابی عملکرد ذرات ژل از قبل شکل گرفته برداشته شوند [۲]:

- ۱- لوله قلمی خلاء شده و سپس با آب مقطر اشباع گردد (حجم منافذ و تخلخل محاسبه می‌شوند).
- ۲- لوله قلمی با آب دریا در دبی‌های مختلف، سیلاب‌زنی شده و سپس تراوایی لوله قلمی محاسبه می‌شود.
- ۳- ثبت افت فشار ابتدایی تزریق آب دریا در لوله

قلمی به علت دبی کم تزریق آب همراه نفت، محدودیت شهودی تجهیزات آزمایشگاهی، طول کم و تراوایی زیاد لوله قلمی، مشکل است. از اینرو، برای محاسبه آن با داشتن دبی مطلوب جریان، مشخصات فیزیکی آب‌نمک تزریقی (آب دریا) و پارامترهای لوله قلمی، از قانون دارسی استفاده می‌شود.

۴- پس از اشباع لوله‌های قلمی با آب دریا، چند حجم خالی ژل متورم شده در حضور آب دریا تا پایدار شدن افت فشار دو سر لوله قلمی تزریق شد. فشار تزریق ممکن است که به راحتی در اولین تزریق سوسپانسیون PV افزایش نیابد. اما زمانی که حجم ذرات سوسپانسیون تزریق شده به مقدار معینی در لوله‌های قلمی برسد (بسته به دبی جریان، تراوایی، اندازه و غلظت ذرات ژل از قبل شکل گرفته)، فشار تزریق شروع به افزایش کرده و به حالت تثبیت می‌رسد، که این فشار باید به عنوان افت فشار تزریق ذرات ژل از قبل شکل گرفته ثبت شود. اندازه ذرات قبل از تزریق و پس از خروج از لوله قلمی در فشار پایدار ثبت و اندازه‌گیری می‌شوند.



شکل ۱ شماتیک دستگاه آزمایشگاهی - آزمایش‌های نگهداشت، RF و RRF ذرات ژل از قبل شکل گرفته

ذرات ژل به شرطی می‌توانند در محیط متخلخل حرکت کنند، که گرادیان فشار محرک بیشتر از گرادیان فشار آستانه باشد. بزرگی فشار آستانه به اندازه ذرات، مقاومت، ساختار گلوگاه منافذ و نسبت قطر ذرات به قطر گلوگاه منافذ بستگی دارد. از آنجا که مقاومت ذرات ژل از قبل شکل گرفته و ساختار گلوگاه منافذ محیط متخلخل در این بخش از مطالعه ثابت هستند (یک نوع از ذرات ژل و تراوایی ثابت لوله قلمی) بزرگی فشار آستانه به اندازه ذره و نسبت قطر ذرات به قطر گلوگاه منافذ، بستگی دارد که با افزایش اندازه ذرات خشک افزایش یافته است. در این آزمایش‌ها مقدار نسبت قطر ذره متورم شده به قطر دهانه حفره با استفاده از رابطه ریاضی زیر بین ۴۱ تا ۹۰ محاسبه شده و در **جدول ۵** آمده است.

$$D_{th} = 2.3 \sqrt{\frac{8k}{\phi}} \rightarrow D_{th} = 2.3 \sqrt{\frac{8 \times 0.0635}{0.399}} = 2.59 \quad (2)$$

با توجه به مقادیر بالای نسبت ذره متورم شده ژل به دهانه حفره در هر سه آزمایش، سازوکار عبور PPG از محیط متخلخل بر اساس شکستگی و به دام افتادگی می‌باشد.

پس از تزریق ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته و ثبت افت فشار دو سر لوله قلمی، آب دریا با دبی یکسان نسبت به حالت قبل (۰/۰۳۲ mL/min) تزریق شد تا به مقدار فاکتور مقاومت پسماند اندازه‌گیری شود (**جدول ۶**).

۵- بعد از آنکه ژل در محل قرار گرفت، جریان نهایی و پر فشار آب‌نمک تزریقی به اندازه چندین PV با دبی جریان مطلوب تزریق می‌شود و افت فشار ثانویه تزریق آب نمک به منظور محاسبه فاکتور مقاومت پسماند در زمانی که افت فشار تزریق ثانویه به مقدار تثبیت خود رسید، ثبت خواهد شد. تمامی آزمایشات چندین بار تکرار می‌شوند تا زمانی که چهار نتیجه متوالی در محدوده ۱٪ خطای آزمایش یکسان باشند.

بحث و نتایج

بررسی پارامترهای مختلف بر فاکتور مقاومت و مقاومت پسماند ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته

آزمایش‌های زیر برای بررسی اثرات پارامترهای مختلف بر فاکتور مقاومت و مقاومت پسماند ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته منتخب در لوله‌های قلمی پر شده با خرده سنگ‌های مخزن مورد نظر تحت شرایط مختلف انجام شد. پارامترها شامل اندازه ذرات ژل از قبل شکل گرفته، دبی تزریقی، غلظت PPG و توزیع تراوایی محیط بر نگه‌داشت ذرات ژل از قبل شکل گرفته می‌باشد.

بررسی اثر اندازه ذره ژل از قبل شکل گرفته

در این آزمایش‌ها، ذرات PPG در سه سایز متفاوت ۴۱، ۶۸/۵ و ۹۰ μm و در غلظت ۳۰۰۰ ppm (متورم شده در آب)، به درون لوله قلمی (با سایز سنگ ۳۲۵-۲۳۰)، تزریق شده‌اند. نرخ تزریق ۰/۰۳۲ mL/min و دمای آزمایش ۸۲ °C بوده است.

جدول ۵ مشخصات لوله‌های قلمی آزمایش‌های RF و RRF

میانگین نسبت قطر ذرات ژل متورم به قطر گلوگاه منافذ	میانگین قطر ذرات بعد از تورم (mm)	میانگین قطر ذرات ژل قبل از تورم (mm)	قطر معادل منافذ هیدرودینامیکی (mm)	تخلخل (%)	نفوذپذیری (D)	سایز خرده سنگ (مش)	شماره لوله قلمی
۴۱/۵	۱۰۸	۴۱	۲/۶	۳۹/۹	۶۳/۵	۲۳۰-۳۲۵	۱
۶۹/۲	۱۸۰	۶۸/۵					۲
۹۱/۱	۲۳۷	۹۰					۳

جدول ۶ نتایج آزمایش‌های تاثیر اندازه ذره PPG بر RF و RRF

متوسط نسبت ذرات PPG به حفرات	متوسط اندازه قطر PPG ها بعد از تورم (mm)	فاکتور مقاومت پسماند	فاکتور مقاومت	افت فشار ثانویه تزریق آب دریا (psi)	افت فشار PPG تزریق (psi)	افت فشار اولیه تزریق آب دریا (پام نسبی)	اندازه خشک PPG (mm)
۴۱/۵	۱۰۸	۱۱/۲۸	۹۴/۶	۲۳۷	۱۹۸۸	۲۱	۴۱
۶۹/۲	۱۸۰	۱۲/۴۲	۹۵/۶	۲۶۱	۲۰۰۹		۶۸/۵
۹۱/۱	۲۳۷	۱۳/۴۲	۹۶/۲	۲۸۲	۲۰۲۱		۹۰

با اندازه بزرگتر، بیشتر هستند، زیرا نگهداشت بیشتری از ذرات خشک با اندازه کوچکتر دارند. درواقع تعداد حفره‌هایی که به وسیله ذرات ژل مسدود می‌شوند، با افزایش اندازه ذرات افزایش می‌یابند.

بررسی اثر غلظت ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته

بدین منظور از ۳ عدد لوله قلمی با سایز مش سنگ ۲۳۰-۳۲۵ μm استفاده شد (جدول ۷). پس از اندازه‌گیری تراوایی و تخلخل لوله‌های قلمی، ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته با سایز ۴۱ mm (متورم شده در آب دریا) تزریق گردید. تزریق در غلظت‌های ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ ppm ژل انجام گرفته و در هر مرحله سایز ذرات قبل و بعد از تزریق بررسی شده است (جدول ۸). پس از آن آب دریا را به عنوان تزریق ثانویه تزریق کرده و افت فشار در هر سه غلظت سوسپانسیون ژل اندازه‌گیری گردید.

بررسی قطر ذرات ژل در ورودی و خروجی لوله‌های قلمی نشان داد که ذرات ژل با نسبت ذره-دهانه حفره بالا، از میان محیط متخلخل، با سازوکار شکستن و به دام افتادن عبور کردند. نتایج در جدول ۶ نشان می‌دهند که فشار تزریق با افزایش متوسط نسبت سایز ذره به روزنه افزایش یافت. افزایش در فشار تزریق نشان می‌دهد که سازوکار شکست به گرا دیان فشار آستانه زیادی نیاز دارد. ذرات ژل از قبل شکل گرفته مواد با خاصیت نازک‌شدگی برشی هستند و گرانروی آنها تابعی از تنش برشی است. بنابراین، گرانروی ذرات ژل از قبل شکل گرفته با افزایش تنش برشی یا فشار تزریق، کاهش خواهد یافت.

مقایسه نتایج داده‌های فاکتور مقاومت پسماند نشان می‌دهد که ژل قابلیت کاهش تراوایی لوله قلمی را دارد. مقادیر فاکتور مقاومت پسماند در ذرات ژل خشک

جدول ۶ نتایج آزمایش‌های تاثیر اندازه ذره PPG بر RF و RRF

متوسط نسبت ذرات PPG به حفرات	متوسط اندازه قطر PPG ها بعد از تورم (mm)	فاکتور مقاومت پسماند	فاکتور مقاومت	افت فشار ثانویه تزریق آب دریا (psi)	افت فشار PPG تزریق (psi)	افت فشار اولیه تزریق آب دریا (پام نسبی)	اندازه خشک PPG (mm)
۴۱/۵	۱۰۸	۱۱/۲۸	۹۴/۶	۲۳۷	۱۹۸۸	۲۱	۴۱
۶۹/۲	۱۸۰	۱۲/۴۲	۹۵/۶	۲۶۱	۲۰۰۹		۶۸/۵
۹۱/۱	۲۳۷	۱۳/۴۲	۹۶/۲	۲۸۲	۲۰۲۱		۹۰

جدول ۷ مشخصات لوله‌های قلمی آزمایش‌های RF و RRF اثر غلظت

شماره لوله قلمی	غلظت سوسپانسیون ژل (ppm)	سایز خرده سنگ (مش)	نفوذپذیری (D)	تخلخل (%)	قطر معادل منافذ هیدرودینامیکی (mm)	میانگین قطر ذرات ژل قبل از تورم (mm)	میانگین قطر ذرات بعد از تورم (mm)	میانگین نسبت قطر ذرات ژل متورم به قطر گلوگاه منافذ
۱	۱۰۰۰							
۲	۳۰۰۰	۲۳۰-۳۲۵	۶۳/۵	۳۹/۹	۲/۶	۴۱	۱۰۸	۴۱/۵
۳	۵۰۰۰							

جدول ۸ نتایج آزمایش تأثیر غلظت PPG بر RF و RRF

شماره لوله قلمی	غلظت سوسپانسیون ژل (ppm)	اندازه PPG خشک (mμ)	افت فشار اولیه تزریق آب دریا (psi)	افت فشار تزریق PPG (psi)	افت فشار ثانویه تزریق آب دریا (psi)	فاکتور مقاومت	فاکتور مقاومت پسماند	متوسط اندازه قطر PPG ها بعد از تورم (mμ)	متوسط نسبت ذرات PPG به حفرات
۱	۱۰۰۰	۴۱	۲۱	۱۸۴۱	۲۱۲	۸۷/۶	۱۰/۱	۱۰۸	۴۱/۵
۲	۳۰۰۰			۱۹۸۸	۲۳۷	۹۴/۶	۱۱/۲۸		
۳	۵۰۰۰			۲۰۲۱	۲۴۹	۹۶/۲	۱۱/۸۵		

آزمایش‌ها و مقادیر تراوایی و تخلخل لوله‌های قلمی پر شده با آنها در **جدول ۹** آمده است.

ذرات ژل از پیش تشکیل شده با سایز ۴۱ μm در غلظت ۳۰۰۰ ppm و در دمای ۸۲ °C و با دبی cc/min ۰/۳۲ در لوله‌های قلمی تزریق شدند. همان‌طور که از نسبت بالای قطر ذره متورم شده به قطر دهانه حفره در هر سه لوله قلمی مشخص است، PPG از درون محیط متخلخل همراه با شکستگی به دام افتادگی عبور کرده و از آن خارج شده است. سپس با همان نرخ دبی آب دریا به عنوان عملیات تزریق ثانویه، تزریق شده است. در **جدول ۱۰** مقادیر RF و RRF آورده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت سوسپانسیون ژل، میزان فشار آستانه ژل برای عبور از دهانه حفرات افزایش یافته و این موضوع سبب افزایش مقدار فاکتور مقاومت خواهد شد. همچنین افزایش غلظت موجب افزایش نگهداشت شده که این امر نشانگر بهبود عملکرد PPG در محیط متخلخل می‌باشد. در نتیجه با افزایش نگهداشت ژل در محیط متخلخل فاکتور مقاومت پسماند نیز افزایش خواهد یافت.

بررسی اثر توزیع تراوایی

برای بررسی این فاکتور، از چهار لوله قلمی پر شده با اندازه‌های مختلف از خرده سنگ استفاده شده است. سایز ذرات سنگ استفاده شده در این

جدول ۹ مشخصات لوله‌های قلمی آزمایش‌های RF و RRF اثر توزیع تراوایی

قطر معادل منافذ هیدرودینامیکی (mμ)	تراوایی (mD)	تخلخل (%)	میانگین سایز ذره سنگ (mμ)	سایز قطر ذره (mμ)	شماره مش	شماره لوله قلمی
۲/۴۸	۵۷	۳۹	۴۱	۳۸	۴۰۰	۱
				۴۴	۳۲۵	
۲/۶	۶۳/۵	۳۹/۹	۶۸/۵	۴۴	۳۲۵	۲
				۶۳	۲۳۰	
۲/۸	۷۴	۳۹/۵	۹۰	۷۴	۲۰۰	۳
				۱۰۶	۱۵۰	
۴/۵۵	۲۰۵	۴۱	۱۲۷/۵	۱۰۶	۱۵۰	۴
				۱۴۹	۱۰۰	

جدول ۱۰. یاسخ آزمایش تاثیر توزیع تراوایی بر RF و RRF

متوسط نسبت ذرات PPG به حفرات	متوسط اندازه قطر PPG ها بعد از تورم (mm)	فاکتور مقاومت پسماند	فاکتور مقاومت	افت فشار ثانویه تزریق آب (psi) دریا	افت فشار PPG تزریق (psi)	افت فشار اولیه تزریق آب (psi) دریا	اندازه PPG خشک (mm)	تراوایی (mD)
۴۳/۵	۱۰۸	۱۳/۹	۸۸/۹	۳۶۲	۲۳۱۲	۲۶	۴۱	۵۷
۴۱/۵		۱۱/۲۸	۹۴/۶	۲۳۷	۱۹۸۸	۲۱		۶۳/۵
۳۸/۵		۱۰/۶	۹۵/۱	۱۹۱	۱۷۱۲	۱۸		۷۴
۲۳/۷		۹/۲۵	۱۲۵/۳	۱۱۱	۱۵۰۴	۱۲		۲۰۵

۳۰۰۰ ppm انجام شد. در این آزمایش‌ها، از ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته با سایز $41\text{ }\mu\text{m}$ جهت تزریق لوله قلمی با سایز سنگ $230\text{--}325\text{ }\mu\text{m}$ استفاده شد (جدول ۱۱). نتایج نشان داد مشابه آزمایش‌های قبل با توجه به نسبت بالای قطر ژل متورم شده به دهانه حفره، مکانیسم عبور، شکستگی و به دام افتادگی، در محیط متخلخل، م‌باشد.

پس از تزریق ژل و ثبت افت فشار ناشی از آن، آب دریا برای اندازه‌گیری افت فشار ثانویه، تزریق گردید. در جدول ۱۲ مقادیر فشارهای اندازه‌گیری شده و پارامترهای فاکتور مقاومت و مقاومت پسماند آورده شده است.

نتایج گزارش شده در **جدول ۱۲**، افزایش فشار تزریق ذرات ژل و آب دریا را با افزایش دبی تزریقی نمایان می‌کند. افزایش افت فشار می‌تواند با افزایش سرعت ذرات متورم شده در لوله قلمی توجیه شود. افت فشار کلی در یک سیستم متخلخل مانند لوله قلمی برابر است

با مقایسه نتایج، قابل مشاهده است که فشار تزریق با کاهش تراوایی لوله قلمی در دبی و غلظت آب‌نمک مشابه، افزایش می‌یابد. از آنجا که گرانیروی با افزایش تنش برشی کاهش می‌یابد، در نتیجه کاهش فاکتور مقاومت در لوله‌های قلمی با تراوایی کم در حالی که نسبت دهانه حفره افزایش یافته را قابل توجه می‌کند.

فاکتور مقاومت پسماند به نگهداشت مربوط است و نگهداشت اندازه گیری شده می تواند به دلیل جذب سطحی، به دام افتادن، یا ترکیبی از هر دو باشد. با کاهش تراوایی لوله قلمی و افزایش نسبت دهانه حفره، مقادیر فاکتور مقاومت پسماند به تدریج افزایش یافت. این موضوع می تواند با توجه به مقادیر بیشتر نگهداشت ذرات ژل در لوله های قلمی با تراوایی کم باشد که در نتیجه منجر به مقادیر بیشتر فاکتور مقاومت پسماند می شود.

بررسی اثر دبی تزریق ژل ذره‌ای از قبل شکل گرفته

آزمایش‌های بررسی اثر دبی تزریقی بر میزان RF و RRF در سه دبی مختلف و در دمای 82°C و در غلظت

جدول ۱۱ پارامترهای اساسی لوله‌های قلمی آزمایش‌های RF و RRF (اثر دبی تزریق PPG)

شماره لوله قلمی	دبی (cc/min)	نفوذپذیری (mD)	تخلخل (%)	قطر معادل منافذ هیدرودینامیکی (μm)	میانگین قطر ذرات ژل قبل از تورم (μm)	میانگین قطر ذرات بعد از تورم (μm)	میانگین نسبت قطر ذرات ژل متورم به قطر گلوله منافذ (μm)
۱	۰/۰۱۶	۶۳/۵	۳۹/۹	۲/۶	۴۱	۱۰۸	۴۱/۵
۲	۰/۰۳۲						
۳	۰/۰۴۸						

جدول ۱۲ پاسخ آزمایش تاثیر دبی تزریق PPG بر RF و RRF

دبی (cc/min)	افت فشار اولیه تزریق آب دریا (پام نسبی)	افت فشار تزریق PPG (پام نسبی)	افت فشار ثانویه تزریق آب دریا (پام نسبی)	فاکتور مقاومت	فاکتور مقاومت پس ماند	متوسط اندازه قطر PPG ها بعد از تورم (μ)	متوسط نسبت ذرات PPG به حفرات
۰/۱۶	۱۰	۱۷۱۶	۲۰۴	۱۷۱/۶	۲۰/۴	۱۰۸	۴۱/۵
۰/۳۲	۲۱	۱۹۸۸	۲۳۷	۹۴/۶	۱۱/۲۸		
۰/۴۸	۳۱	۲۱۲۸	۲۶۹	۶۸/۶	۸/۶۷		

با مجموع افت فشار ناشی از گرانیروی و افت اینرسی، که هر دوی آنها روابط مستقیم با دبی جریان دارند. به بیان دیگر، در نتیجه افزایش دبی جریان، افت فشار کل سیستم افزایش می یابد. همچنین، مشاهده شده است که نرخ تزریق افزایش یافته در لوله قلمی، فشار تزریق ذرات ژل را به طور قابل توجه افزایش نمی دهد.

ذرات ژل از قبل شکل گرفته ی کاملاً متورم شده یک رفتار نازک شدگی برشی از خود نشان می دهند. گرانیروی به علت افزایش دبی جریان کاهش می یابد که این موضوع خود علت کاهش در فاکتور مقاومت را توضیح می دهد.

همچنین به دلیل افزایش دبی جریان و به تبع آن کاهش میزان نگهداشت (که توضیحات آن در بخش قبل داده شد)، ماندگاری PPG را در محیط متخلخل کمتر می کند که این پدیده سبب می شود که آب ثانویه راحت تر در محیط متخلخل جریان پیدا کند. با این تفاسیر، فشار تزریق آب ثانویه کمتر خواهد شد که به تبع آن باعث کاهش فاکتور مقاومت پسماند می شود.

نتیجه گیری

در این پژوهش آزمایشگاهی به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی مقادیر فاکتور مقاومت و مقاومت

پسماند برای ژل از قبل شکل گرفته با استفاده از آزمایش لوله قلمی پرداخته شد و در زیر به مهم ترین نتایج آن اشاره شده است:

- تاثیر اندازه ذره ژل از قبل شکل گرفته بر فاکتور مقاومت و مقاومت پسماند وابسته به تاثیر آن بر میزان نگهداشت PPG در محیط متخلخل است.

- نتایج آزمایش اثر سایز ذرات نشان داد که سازوکار اصلی در عبور ذرات ژل با نسبت ذره-دهانه حفره بالا در محیط متخلخل، شکستن و به دام افتادن می باشد.

- فاکتور مقاومت پسماند در ذرات ژل خشک بزرگتر، به دلیل نگهداشت بیشتر، بالاتر از ذرات کوچکتر می باشد.

- با افزایش غلظت سوسپانسیون ژل، فشار آستانه بدلیل حجم بیشتر ژل موجود در محیط متخلخل افزایش یافته و در نتیجه میزان فاکتور مقاومت پسماند نیز افزایش می یابد.

- فشار تزریق آب با حضور ژل در محیط متخلخل، با کاهش تراوایی افزایش می یابد.

- با بررسی شکل ذرات ژل قبل و بعد از تزریق در لوله قلمی که نشان دهنده کوچکتر بودن قطر ذرات ژل بعد از تزریق نسبت به شرایط قبل از تزریق می باشد می توان نتیجه گرفت که سازوکار اصلی، شکستن ذرات ژل از قبل شکل گرفته می باشد.

مراجع

- [1]. Passey, Q. R., Bohacs, K. M., Esch, W. L., Klimentidis, R., & Sinha, S. (2010, June). From oil-prone source rock to gas-producing shale reservoir—geologic and petrophysical characterization of unconventional shale-gas reservoirs. In SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China (pp. SPE-131350). SPE. doi.org/10.2118/131350-MS.
- [2]. Bahraminejad, H., Khaksar Manshad, A., Riazi, M., Ali, J. A., Sajadi, S. M., & Keshavarz, A. (2019). CuO/TiO₂/PAM as a novel introduced hybrid agent for water—oil interfacial tension and wettability optimization in chemical enhanced oil recovery. *Energy & Fuels*, 33(11), 10547-10560. doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02109.
- [3]. Veil, J. A., Puder, M. G., & Elcock, D. (2004). A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane (No. ANL/EA/RP-112631). Argonne National Lab., IL (US).
- [4]. McNaughtan, D., Winning, I. G., & Sim, M. (2004, September). The evaluation of a new environmentally friendly combined product for application in the North Sea for effective scale and corrosion control. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition? (pp. SPE-90444). SPE. doi.org/10.2118/90444-MS.
- [5]. Gleick, P. H. (2003). Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century. *Science*, 302(5650), 1524-1528.
- [6]. Gollapudi, U. K., Knutson, C. L., Bang, S. S., & Islam, M. R. (1995). A new method for controlling leaching through permeable channels. *Chemosphere*, 30(4), 695-705. doi.org/10.1016/0045-6535(94)00435-W.
- [7]. Kim, H. N., Walker, S. L., & Bradford, S. A. (2010). Coupled factors influencing the transport and retention of *Cryptosporidium parvum* oocysts in saturated porous media. *water research*, 44(4), 1213-1223. doi.org/10.1016/j.watres.2009.09.041.
- [8]. Marrone, P. A., & Hong, G. T. (2008). Corrosion control methods in supercritical water oxidation and gasification processes. *NACE CORROSION*, NACE-08422.
- [9]. Bai, B., Liu, Y., Coste, J. P., & Li, L. (2007). Preformed particle gel for conformance control: transport mechanism through porous media. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 10(02), 176-184. doi.org/10.2118/89468-PA.
- [10]. Sandiford, B. B., & Knight, R. K. (1977). U.S. Patent No. 4,031,958. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [11]. Zhang, H., & Bai, B. (2011). Preformed-particle-gel transport through open fractures and its effect on water flow. *SPE Journal*, 16(02), 388-400. doi.org/10.2118/129908-PA.
- [12]. Alhuraishawy, A. K., Bai, B., Imqam, A., & Wei, M. (2018). Experimental study of combining low salinity water flooding and preformed particle gel to enhance oil recovery for fractured carbonate reservoirs. *Fuel*, 214, 342-350. doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.060.
- [13]. Sun, L., Li, D., Pu, W., Li, L., Bai, B., Han, Q., Zhang, Y. and Tang, X., 2020. Combining preformed particle gel and curable resin-coated particles to control water production from high-temperature and high-salinity fractured producers. *SPE Journal*, 25(02), 938-950. doi.org/10.2118/198887-PA.
- [14]. Imqam, A., Bai, B., Ramadan, M. A., Wei, M., Delshad, M., & Sepehrnoori, K. (2015). Preformed-particle-gel extrusion through open conduits during conformance-control treatments. *SPE Journal*, 20(05), 1083-1093. doi.org/10.2118/169107-PA.



Experimental Investigation of the Effect of Preformed Particle Gel Size and Concentration and Permeability of Porous Medium on Residual Factor and Residual Resistance Factor

Pourya Malmir, Shima Ebrahimzadeh, Hamidreza Saghafi * and Majid Hashemi

1EOR Research Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

saghafi.saghafi@gmail.com

DOI: 10.22078/pr.2024.5112.3267

Received: May 10, 2023

Accepted: August 31, 2024

Introduction

Water production in oil reservoirs poses significant challenges, including reduced oil recovery and increased operational costs. PPG injection has gained prominence as a cost-effective method to mitigate these issues by sealing high-permeability zones and improving sweep efficiency [1]. Unlike in-situ gels, PPGs offer advantages such as controllable particle size and concentration, eliminating gelation time uncertainties [2].

This study focuses on evaluating the effects of PPG size, concentration, porous medium permeability, and injection rate on RF and RRF. Understanding these parameters is critical for designing effective gel treatments that balance injectability and formation protection [3].

Materials and Methods

Gel Synthesis: PPG was synthesized using AM, AMPSNa, and NVP monomers, with MBA as a crosslinker. The gel was dried, meshed, and swollen in seawater before injection.

Slim Tube Experiments

1. Saturation: Slim tubes were evacuated and saturated with distilled water to determine pore volume and porosity.
2. Permeability Measurement: Seawater was injected at varying flow rates to calculate permeability using

Darcy's law.

3. Gel Injection: Swollen PPG was injected until pressure stabilization, followed by secondary brine injection to measure RRF.

4. Parameter Variation: Experiments were conducted with three gel sizes (41–100 μm), three concentrations (1000–5000 ppm), four permeabilities (50–500 mD), and three flow rates (0.01–0.1 cc/min).

Results and Discussion

Gel Size Effect: Larger particles (100 μm) exhibited higher retention and RRF due to increased pore blockage. Particle breakage was the dominant transport mechanism for swollen gels exceeding pore throat sizes.

Concentration Effect: Higher concentrations (5000 ppm) elevated threshold pressure and RRF, attributed to greater gel volume occupying pore spaces.

Permeability Effect: Lower permeability (50 mD) slim tubes showed higher injection pressures and RRF, as gel retention increased in tighter pores.

Flow Rate Effect: Increased flow rates raised pressure drops but had minimal impact on gel injectability, as viscous and inertial forces dominated.

Conclusions

This study highlights the critical role of PPG size, concentration, and porous medium permeability in determining RF and RRF. Key findings include:

- Larger gel particles and higher concentrations enhance RRF but require careful optimization to avoid injectivity issues.
- Reduced permeability increases gel retention and injection pressure, emphasizing the need for tailored gel designs.
- Particle breakage is the primary transport mechanism for PPGs in porous media.

These insights provide a foundation for optimizing PPG applications in field-scale water control projects.

References

1. Bai, B., Li, L., Liu, Y., Liu, H., Wang, Z., & You, C. (2007). Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and applications. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 10(04), 415-42. doi.org/10.2118/89389-PA.
2. Seright, R. S. (1995). Gel placement in fractured systems. *SPE Production & Facilities*, 10(04), 241-248. doi.org/10.2118/27740-PA.
3. Imqam, A., Bai, B., Ramadan, M. A., Wei, M., Delshad, M., & Sepehrnoori, K. (2015). Preformed-particle-gel extrusion through open conduits during conformance-control treatments. *SPE Journal*, 20(05), 1083-1093. doi.org/10.2118/169107-PA.