

# بررسی آزمایشگاهی تزریق پلیمر بر ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین و تعیین غلظت بهینه تزریق

پوریا مال میر، عبدالنبی هاشمی\* و بهرام سلطانی سولگانی

دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۹۷/۶/۱۳

## چکیده

استفاده از پلیمرها جهت کنترل تحرک پذیری آب تزریقی و ازدیاد برداشت از مخازن نفتی از سال‌ها پیش مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیلاب‌زنی پلیمر موجب بهبود بازده جاروبی حجمی، کاهش پدیده انگشتی شده و ایجاد کانال و تاخیر در زمان میان‌شکنی آب می‌شود. مجموعه این فرآیندها موجب افزایش تولید نفت و کاهش هزینه‌های تولیدی خواهد شد. جهت انجام این فرآیند، پلیمرهای مختلف به تنهایی یا همراه با سورفکتانت و آلکالین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش از یک نوع پلیمر جدید به نام FLOPPAM ۳۶۳۰ جهت بررسی ازدیاد برداشت مخازن نفت بسیار سنگین استفاده شده است. بدین منظور ۶ محلول پلیمری با غلظت‌های مختلف ساخته شده و آزمایش‌های پایداری نسبت به نرخ برشی، زمان و دما بر روی آنها انجام شد. نتایج پایداری پلیمر بیانگر پایداری آن در شرایط مختلف نرخ برشی، دما و همچنین گذشت زمان است. در نتیجه این پلیمر کاندیدای مناسبی جهت انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی در شرایط دمایی مخزن است. سپس ۳ محلول پلیمری مناسب‌تر انتخاب شده و سیلاب‌زنی پلیمر انجام شد. نتایج نشان داد که محلول با غلظت ۱۰۰۰ ppm بهترین بازدهی را با حدود ۴۰٪ دارد. علت بازدهی مناسب این غلظت جاروب سطحی و عمودی بیشتر آن نسبت به سایر غلظت‌ها است. همچنین به دلیل اختلاف بازدهی کم بین ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ppm بهتر است به دلیل صرفه اقتصادی بیشتر و تزریق پذیری راحت‌تر آن از غلظت کمتر استفاده شود. همچنین بازدهی نفت این نوع پلیمر در بستر شنی به نسبت پلیمرهای دیگر با این شرایط آزمایش بیشتر است که استفاده از آن را اقتصادی‌تر جلوه می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** پلیمر، سیلاب‌زنی، گرانیروی، تنش برشی، نفت سنگین

## مقدمه

عمده هدف از این عملیات برطرف کردن مشکلات رایج در فرآیند سیلاب‌زنی از جمله نسبت پویایی نامناسب و ناهمگنی مخزن است [۱]. پلیمرها به آب تزریقی درون سازند اضافه می‌شوند تا نسبت پویایی آب و نفت کاهش پیدا کند.

فرآیند سیلاب‌زنی پلیمری یکی از انواع روش‌های ازدیاد برداشت شیمیایی به حساب می‌آید. به‌طور

\*مسئول مکاتبات

a.hashemi@put.ac.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2019.3503.2602)

مهم‌ترین معیارهای ارزیابی یک پروژه سیلاب‌زنی است. ضریب راندمان کلی، E، به صورت کسری از کل نفت در جای اولیه در شروع فرآیند سیلاب‌زنی تعریف می‌شود که می‌تواند توسط این فرآیند جابه‌جا شود [۹ و ۱۰]. پارامترهای فراوانی بر روی فرآیندهای شیمیایی تأثیر دارند، در این میان مهم‌ترین پارامترها عبارتند از دمای مخزن، شوری سازند، محتویات رسی سازند و گرانشوری نفت. در عملیات سیلاب‌زنی پلیمری تراوایی نیز یک عامل مهم دیگر محسوب می‌شود [۱۱-۱۴]. یک پلیمر مناسب باید دارای ویژگی‌هایی از جمله: فاقد اکسیژن در ساختار (زنجیره کربنی) خود، پایداری گرمایی، حاوی گروه آبدوست یونی با بار منفی برای کاهش جذب بر روی سطح سنگ، خاصیت گرانشورکنندگی بالا، حاوی گروه آبدوست غیر یونی برای پایداری شیمیایی و تغییر تراوایی نسبی مناسب باشد. براساس این معیارها، FLOPPAM یک پلیمر مناسب است [۱۵-۱۸].

#### پیشرفت‌های اخیر در زمینه کاربرد پلیمر در نفت سنگین

مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه از سال ۱۹۷۷ توسط نایت و رودی آغاز شد. آنها در آزمایش‌های خود محلول پلیمری با غلظت‌های گوناگون را مورد استفاده قرار دادند. دو نمونه نفت سنگین توسط آنها مورد بررسی قرار گرفت. نسبت پویایی در ابتدا برای آب و نفت چیزی حدود ۳۰ گزارش شد، در حالی که بعد از تزریق پلیمر این مقدار برای دو نفت به ترتیب ۰/۳۴ و ۳/۲ شد. نتایج بازیافت نفت نیز بیانگر افزایش بازیافت بین ۱۹ تا ۳۱٪ بود [۱۹]. بررسی اثر پلی اکریل آمیدهای هیدرولیز شده بر ازدیاد برداشت نفت سنگین طرفداران زیادی در این سال‌ها داشته است. برای مثال واسموس و همکاران بر روی سه نمونه نفت با گرانشوری متفاوت تزریق پلیمر با غلظت ۱۵۰۰ ppm انجام داده و افزایش بازیابی میانگین ۲۰٪ مشاهده شد [۲۰].

1. Mobility Ratio

با این کار راندمان جاروبی بهبود یافته و همچنین جابه‌جایی نفت در ناحیه جاروب شده راحت‌تر انجام می‌شود [۲]. پس از سیلاب‌زنی همواره مقداری نفت در مخزن به جا می‌ماند که دیگر امکان تولید آن توسط تزریق آب ناست. دو دلیل برای به جا ماندن نفت وجود دارد. نفت یا به واسطه نیروهای موئینه در مخزن به دام می‌افتد (نفت باقی‌مانده) و یا در پشت جبهه آب تزریقی به جا می‌ماند. نفت باقی‌مانده درون حفرات به دلیل نیروی قوی موئینه در جای خود بی‌حرکت می‌ماند [۳]. برای به حرکت درآوردن این نفت کشش سطحی بین آب و نفت باید کاهش یابد. این کار توسط اضافه کردن مواد فعال سطحی به آب انجام می‌شود [۲]. بنابراین هدف از تزریق پلیمر تولید آن بخش از نفت درون مخزن است که پشت جبهه آب به جا مانده است [۴]. برخی از محققان بر این عقیده‌اند که پلیمرها به دلیل خاصیت الاستیک خود توانایی کاهش میزان نفت باقی‌مانده را دارند. توضیحات بیشتر در این زمینه در بخش‌های بعدی آورده شده است. به هر حال حتی با فرض اینکه سیلاب‌زنی پلیمری قادر به کاهش نفت باقی‌مانده نباشد، این روش یک راه مؤثر و اقتصادی در رسیدن به میزان اشباع نفت باقی‌مانده در زمان کوتاه‌تر است [۵]. محققان دیگری در گزارش خود دلایل بازیافت بیشتر در فرآیند سیلاب‌زنی پلیمری نسبت به سیلاب‌زنی را به علت تأثیر پلیمر بر جریان جزئی فازها، کاهش نسبت پویایی<sup>۱</sup> بین آب و نفت و جابه‌جایی بهینه‌تر نفت در ناحیه جاروب شده می‌دانند [۶ و ۷]. کومار و همکاران آزمایش‌های گوناگونی را برای بررسی نسبت‌های پویایی نامطلوب انجام داده‌اند [۸]. آنها نتیجه گرفتند که جابه‌جایی نفت به شدت تحت تأثیر پدیده انگشتی شدن قرار می‌گیرد. آنها پیشنهاد کردند که بهبود نسبت پویایی (به‌طور مثال با افزودن پلیمر) باعث بهبود در جاروب شدن و بازیافت مخزن می‌شود.

راندمان جاروبی در کنار نسبت پویایی یکی از

جهت تزریق و رسیدن به بالاترین باز یافت رسید. پلیمر مورد استفاده پایداری بسیار خوبی در برابر دما، شوری و تنش برشی داشته و توان بالا بردن گرانیروی آن نیز بالاست. به همین دلایل این پلیمر جهت انجام آزمایش‌ها انتخاب و با انجام آزمایش‌های مختلف سعی شده است میزان کارایی آن جهت ازدیاد برداشت نفت‌های سنگین مورد بررسی قرار گیرد. همچنین میزان افزایش بازیابی نهایی نفت برای این پلیمر محاسبه شده و میزان اقتصادی بودن این روش مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

### روش کار

#### مواد

به منظور انجام آزمایش‌ها از پلیمر FLOPPAM ۳۶۳۰ ساخت شرکت SNF فرانسه استفاده شد. آب مورد استفاده در آزمایش‌ها آب مقطر دی‌یونیزه شده است. تمامی نمک‌های مورد استفاده شده ساخت شرکت مرک آلمان است. تولوئن و الکل مورد استفاده جهت شست و شوی محیط متخلخل ساخت شرکت مرک آلمان با درجه خلوص ۹۹٪ هستند. شن‌های مورد استفاده جهت ساخت محیط متخلخل از جنس سیلیس ۹۹٪ است. نفت مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی نفت سنگین یکی از مخازن جنوب غرب ایران با گرانیروی محیطی cp ۲۱۰۰ و درجه API ۲۰ است.

#### آماده‌سازی محلول‌ها و محیط متخلخل

به منظور آماده‌سازی محلول پلیمری میزان وزن متناسب با غلظت مدنظر از پلیمر به آرامی به ۱۰۰ cc آب مقطر اضافه می‌شود. محلول بر روی همزن مغناطیسی بوده و پس از اضافه شدن کامل پلیمر به مدت ۲۴ hr بر روی همزن قرار می‌گیرد. علت این کار همسان شدن کلیه قسمت‌های محلول پلیمری از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی است. همچنین جهت اشباع محیط متخلخل از آب سازندی با شوری حدود ppm ۲۰۰۰۰۰ استفاده شده است.

در حالی که یک مطالعه دیگر در محفظه شنی با پلیمر HPAM بر روی نفت سنگین شاهد افزایش بازیابی ۴ تا ۲۰٪ بودند [۲۱]. تزریق پلیمر HPAM در مغزه در حضور نفت سنگین نیز توسط چند محقق بررسی شده است که در مغزه‌های ماسه سنگی نتایج بیانگر تاخیر در میان‌شکنی، جابه‌جایی جریان جزئی به سمت راست و افزایش بازدهی نفت است. همچنین تراوایی نسبی آب و نفت پس از تزریق پلیمر تغییر کرده و در برخی موارد گرانیروی بالای پلیمر موجب ایجاد مشکل حین تزریق شده و به اجبار غلظت پلیمر تزریقی را کاهش داده‌اند [۲۲-۲۴]. استفاده از پلیمرهایی به جز HPAM نیز جهت ازدیاد برداشت نفت سنگین معمول است. برای مثال آزمایش‌های سیلاب‌زنی آنها بیانگر جابه‌جایی خوب نفت به صورت پیستون‌وار، قابل استفاده در بازه وسیعی از غلظت و عدم ایجاد پدیده انگشتی شدن بودند. با اضافه کردن نانو ذرات به محلول پلیمر نیز گرانیروی محلول پلیمر و همچنین جذب پلیمر بر روی سطح کاهش می‌یابد [۲۲ و ۲۵]. به طور کلی سه پارامتر اثرگذار در ازدیاد برداشت پلیمری شمال گرانیروی، غلظت پلیمر و تراوایی است [۴، ۸، ۱۵ و ۲۴].

با توجه به کارهای انجام شده طی سال‌های گذشته می‌توان دریافت بررسی رفتار پلیمرها بر روی نفت‌های خیلی سنگین همچنان دچار خلا است. برای مثال انتخاب نوع پلیمر مناسب برای این نوع مخازن و همچنین انتخاب غلظت مناسب پلیمر برای تزریق همچنان مبهم است. همچنین از آنجا که تزریق پلیمر هزینه بالایی دارد بالا بردن هرچه بیشتر باز یافت نهایی موجب صرفه اقتصادی بیشتر در این گونه پروژه‌ها خواهد شد. به همین دلیل در این پژوهش سعی شده است امکان‌سنجی تزریق یک نوع پلیمر جدید برای این نوع مخازن انجام شده و با انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی در غلظت‌های مختلف این پلیمر به غلظت بهینه

دشواری در اندازه‌گیری خواص و عدم تزریق‌پذیری غلظت‌های بالای ۴۰۰۰ ppm از آزمایش کردن غلظت‌های بالای این مقدار صرف نظر شده است. آزمایش‌های گرانیروی محلول‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیری گرانیروی BROOKFIELD انجام پذیرفت. در بخش اول آزمایش‌های پایداری میزان تغییرات تنش برشی و گرانیروی در ۱۵ نرخ برشی مختلف اندازه‌گیری شد. در بخش دوم میزان پایداری محلول‌های پلیمری با زمان و همچنین شوری در یک نرخ برشی ثابت انجام شد و در بخش پایانی اثر تغییر دما بر روی رفتار رئولوژیک محلول‌ها مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت.

#### محیط متخلخل

برای پر کردن فضای محفظه شنی از دانه‌های شنی از جنس سیلیس با خلوص ۹۹٪ که اندازه ذرات آن بین ۰/۱ - ۰/۳ mm بوده استفاده شده است. جذب آب توسط این ذرات بسیار ناچیز بود. در ضمن تراوایی و تخلخل محیط متخلخل به ترتیب به‌طور میانگین در حدود ۳ D و ۴۰٪ اندازه‌گیری شد. شکل ۱ و ۲ محفظه شنی مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهند. بدنه محفظه شنی از جنس استیل است تا بتواند دماهای بالا را تحمل کند. ابعاد این محفظه ۱۲ cm × ۳/۶۷۵ cm است. در دو سر این محفظه شنی پخش‌کننده نصب گردید. بر روی آن‌ها نیز توری استیل با اندازه مش ۱۸۰ قرار داده شد. برای جلوگیری از اثر دیواره، روی دیواره درونی محفظه حلقه‌هایی با فاصله ۱ mm در جهت عمود بر محور محفظه تراش داده شد. با این کار از سر خوردن سیالات از روی دیواره تا حد مناسبی جلوگیری شده است. پس از آماده‌سازی محیط متخلخل تراوایی آن اندازه‌گیری شد.

ترکیب درصد نمک‌های مورد استفاده در آب سازندی مطابق ترکیب آب سازند واقعی است و در جدول ۱ آمده است. به دلیل ایجاد مقداری رسوب پس از ساخت آب سازندی آن را فیلتر کرده و از آب فیلتر شده بدون رسوب به‌عنوان آب سازندی در تمام آزمایش‌ها استفاده شده است. میزان هدایت‌پذیری آب سازندی پس از فیلتر ۲۶۵۶۰۰  $\mu\text{s/cm}$  است که با توجه به روابط موجود جهت تبدیل به مقدار غلظت جامدات (TDS) در حدود ۱۷۰۰۰۰ ppm است

جدول ۱ ترکیب درصد آب سازندی مورد استفاده در آزمایش‌ها

غلظت (ppm)	نوع نمک
۱۴۰۳۱۴	NaCl
۱۶۲۸	CaCO <sub>3</sub>
۲۸۵۴	MgCl <sub>2</sub>
۴۰۲۸۶	CaCl <sub>2</sub>
۲۵۸۶	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
۲۰۱۴	NaHCO <sub>3</sub>
۱۸۹۶۸۲	TDS (ppm)
۳/۶۷۴۷	قدرت یونی (mol/L)

#### روش و نحوه انجام آزمایش‌ها

##### آزمایش‌های پایداری پلیمر

همان‌گونه که گفته شد جهت انجام آزمایش‌ها از پلیمر FLOPPAM ۳۶۳۰ استفاده شد. جهت اطمینان از امکان انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی لازم است یکسری آزمایش پایداری در شرایط مختلف انجام شود. جهت انجام آزمایش‌های پایداری ۶ غلظت پلیمر مطابق جدول ۲ انتخاب شده است. دلیل انتخاب این غلظت‌ها بررسی گستره وسیعی از غلظت‌ها جهت بررسی امکان سنجی استفاده آنها در فرآیند تزریق پلیمر است. همچنین به دلیل

جدول ۲ غلظت‌های محلول‌های پلیمر مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها

شماره محلول	۱	۲	۳	۴	۵	۶
غلظت (ppm)	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰



شکل ۲ محفظه شنی ساخته شده از جنس استیل



شکل ۱ نمایی از درپوش‌های محفظه شنی

پس از آنکه به دلیل اختلاف چگالی نفت و آب، نفت کاملاً از آب جدا شده و در قسمت فوقانی استوانه مدرج قرار گرفت، استوانه مدرج از کوره خارج شده و پس از سرد شدن میزان حجم آب و نفت از روی درجه بندی خوانده می‌شود. در هر آزمایش به‌طور میانگین ۳ حجم خالی آب و پلیمر به محیط متخلخل تزریق شده است. در جدول ۳ زیر شرایط حاکم بر تست‌های سیلاب‌زنی این بخش آمده است. تنها عامل متغیر در این بخش غلظت پلیمر تزریقی بوده است. لازم به ذکر است که تمامی پلیمرها درون آب مقطر تهیه شده‌اند.

### نتایج و بحث

#### آزمایش‌های پایداری پلیمر

در این بخش از آزمایش‌ها با هدف ازدیاد برداشت و امکان‌سنجی انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی از پلیمر FLOPPAM استفاده شده و سری کامل آزمایش‌های پایداری آن با نرخ برشی، زمان و دما و شوری انجام شد. در بخش اول آزمایش‌ها ۶ محلول پلیمری با غلظت‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ ppm آماده شد. آزمایش پایداری پلیمر با غلظت‌های مختلف در ۱۵ نرخ برشی مختلف انجام شد. نتایج تنش برشی و گرانیروی با تغییر نرخ برشی در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است. با توجه به شکل‌ها، پلیمر مورد استفاده در نرخ‌های برشی مختلف رفتاری نیوتنی مشابه پلیمرهای دیگر نشان داده و با افزایش نرخ برشی میزان گرانیروی محلول‌ها کاهش یافته است.

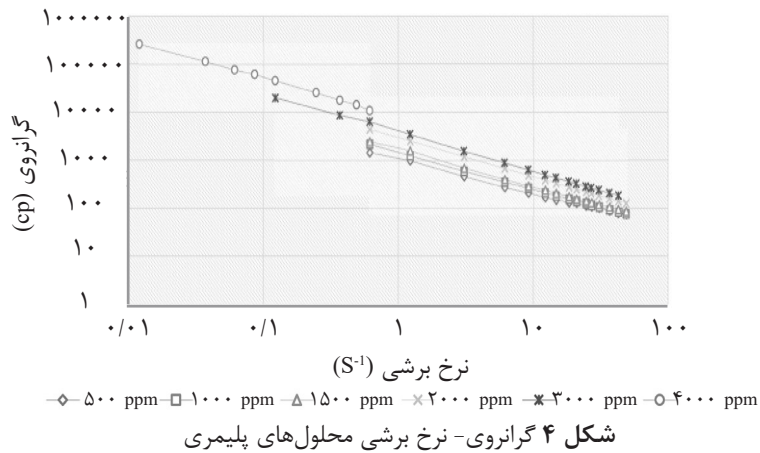
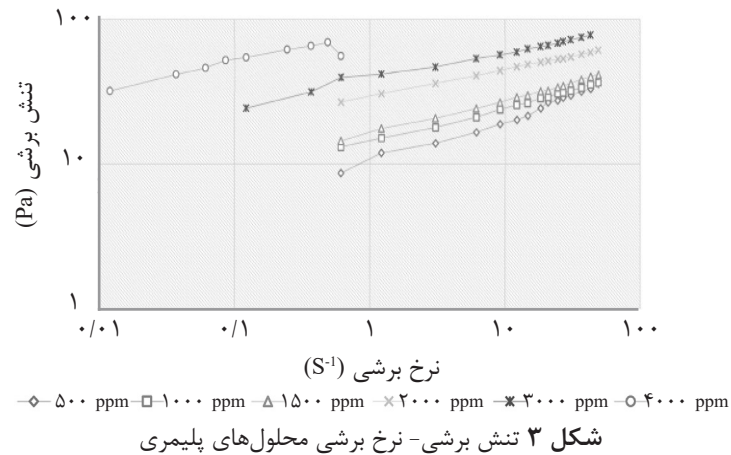
با تزریق آب مقطر در ۳ دبی ۰/۱، ۰/۵ و ۱ cc/min مقادیر افت فشار پایدار شده ثبت شده و با رسم نمودار فشار برحسب دبی تزریقی و محاسبه شیب خط راست، با استفاده از رابطه D برای جریان پایدار میزان تراوایی مطلق اندازه‌گیری شد.

#### اجرای سیلاب‌زنی

پس از قرار دادن محفظه شنی درون دستگاه سیلاب‌زنی، دستگاه روشن شده و دما روی  $40^{\circ}\text{C}$  قرار می‌گردد. به مدت ۳ h دستگاه در دمای مورد نظر قرار می‌گرفت تا سیالات به تعادل دمایی برسند. نرخ تزریق در تمامی حالات برابر  $0.5\text{ cc/min}$  در نظر گرفته شد. ابتدا محفظه از آب سازندی اشباع شده و تراوایی مطلق آن اندازه‌گیری شد. سپس نفت به درون محفظه تزریق شده و آب خروجی به دقت محاسبه می‌گردد. آنقدر تزریق نفت ادامه می‌یافت تا از عدم خروج آب اطمینان حاصل شود. به دلیل سنگین بودن نفت معمولاً پس از مشاهده  $10\text{ cc}$  نفت در خروجی دیگر آبی خارج نمی‌شد. پس از اشباع محفظه از نفت، سیلاب‌زنی صورت می‌گرفت. تزریق آب به درون محفظه تا زمانی که نفت خروجی کمتر از ۵٪ شود ادامه می‌یافت. به‌طور معمول  $1/5$  حجم خالی آب به درون محفظه تزریق شده است. پس از پایان سیلاب‌زنی آب، یک حجم خالی محلول پلیمر به‌صورت پیوسته تزریق شد. به دلیل سنگین بودن نفت و مشخص نبودن میزان دقیق آب و نفت خروجی، سیال خروجی در ظروف مدرج  $10\text{ cc}$  جدا شده و درب آن‌ها بسته و درون کوره با دمای  $60^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲ روز قرار داده می‌شد.

جدول ۳ خواص سیالات و محیط متخلخل مورد استفاده جهت سیلاب زنی

شماره تست	غلظت پلیمر (PPM)	میزان تراوایی (D)	اشباع نفت %	تخلخل %	درصد اشباع آب همزاد
۱	۵۰۰	۳/۲	۸۲/۵	۳۹/۳	۱۷/۵
۲	۱۰۰۰	۲/۸	۸۲	۳۹/۳	۱۸
۳	۲۰۰۰	۳/۱	۸۳/۱	۳۸/۵	۱۶/۹



سرعت دورانی ملاک گرانیوی در آزمایش‌ها است. حال اگر فرض شود سرعت تزریق پلیمر ۱۰۰ برابر سرعت حرکت نفت در مخزن باشد (که در واقعیت نیست) به سرعت دورانی حدود ۰/۱۴ rpm می‌رسیم که گرانیوی محلول پلیمر ۱۰۰۰ ppm در این نرخ برشی حدود ۷۰۰۰ cp خواهد بود. در نتیجه حین آزمایش‌ها پدیده انگشتی شدن رخ نخواهد داد و کنترل تحرک پذیری آب به‌طور کامل اتفاق افتاده و در نتیجه بهبود تولید خواهیم داشت.

همچنین روند کاهش گرانیوی برای تمامی غلظت‌ها کاملاً مشابه بوده و از رابطه یکسانی پیروی می‌کند. این رفتار نشانه مثبتی در جهت کاربردی بودن تزریق آن در مخزن به‌عنوان بالا برنده بازدهی سطحی نفت است. معیار گرانیوی محلول پلیمری، گرانیوی آن تحت نرخ برشی حرکت سیال در مخزن است. همان‌طور که می‌دانیم سرعت خطی حرکت نفت در مخزن حدود یک فوت در روز است اگر این سرعت خطی را به سرعت دورانی تبدیل کنیم به عدد حدود ۰/۰۱۴ rpm می‌رسیم و گرانیوی در این

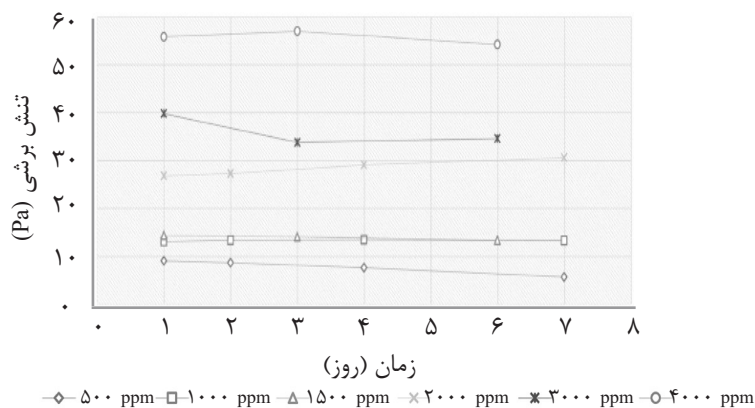
نوع پلیمر مختلف است که با بالا رفتن شوری تا نزدیکی شوری آب سازندی پلیمر تقریباً شکسته شده و خاصیت ویسکوزکنندگی خود را از دست می‌دهد [۲۵]. در بخش پایانی آزمایش‌های پایداری پلیمر اثر تغییرات دما بر روی خواص رئولوژیک پلیمر مورد استفاده مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در ۳ دمای ۲۰، ۵۰ و ۷۰ °C گرانیروی ۶ محلول پلیمری مد نظر اندازه‌گیری شده و نتایج در شکل ۶ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید این نوع پلیمر پایداری نسبتاً خوبی نسبت به دما داشته و با افزایش دما تا ۷۰ °C شاهد کاهش کمی در مقادیر گرانیروی محلول پلیمری هستیم. این رفتار نشان‌دهنده عدم شکستن زنجیره‌های پلیمری تحت دما است که همین رفتار تزریق پذیر بودن آن را جهت آزمایش‌های سیلاب‌زنی پلیمر توجیه می‌کند. از آنجا که حفظ گرانیروی با تغییر دما در این آزمایش‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بود، جهت بررسی میزان پایداری گرانیروی محلول پلیمری از این آزمایش‌ها استفاده شده است.

#### آزمایش‌های سیلاب‌زنی

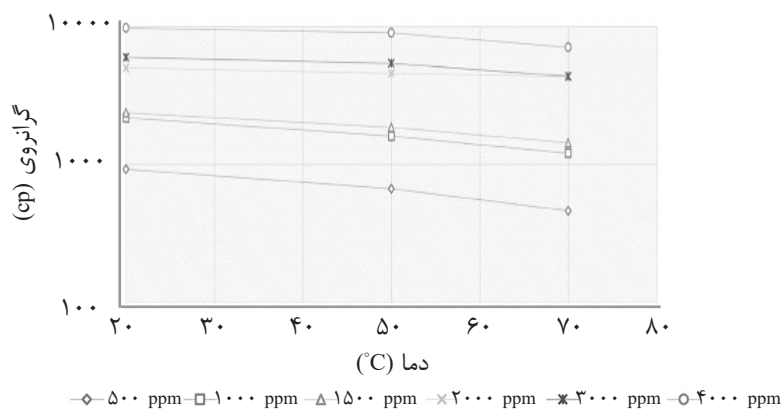
با انجام سری کامل آزمایش‌های پایداری نتیجه گرفته شد امکان استفاده از غلظت‌های بالای این نوع پلیمر جهت تزریق به مخزن وجود ندارد. علت این امر گرانیروی بالای این نوع پلیمر است که تزریق کردن آن توسط پمپ بسیار سخت و حتی ناممکن است.

در قسمت دوم آزمایش‌های پایداری، اثر زمان بر روی تغییرات تنش برشی محلول‌های پلیمری در نرخ برشی ثابت اندازه‌گیری شد. نتایج طبق شکل ۵ بیانگر ثابت ماندن تنش برشی و به تبع آن گرانیروی محلول‌ها پس از یک هفته بودند. با توجه به این نتایج، پلیمر مورد استفاده با گذشت یک هفته دچار هیچ‌گونه تغییری در خواص رئولوژیکی نشده و کاملاً پایدار باقی‌مانده است. البته این آزمایش در دمای محیطی انجام شده است و ممکن است در دمای بالا زنجیره‌های پلیمری شکسته شده و ناپایدار شوند. بدین منظور پایداری این پلیمر در دماهای مختلف هم مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در ادامه خواهد آمد.

جهت بررسی اثر شوری آب بر پایداری پلیمر دو آزمایش انجام شد. ابتدا محلول ۱۰۰۰ ppm در آب مقطر و سپس همان محلول در آب سازندی ساخته شد. سپس میزان گرانیروی این دو محلول در نرخ برشی ثابت ۶/۱۲ I/s اندازه‌گیری شد. نتایج گرانیروی آنها برای آب مقطر و آب سازندی به ترتیب میزان ۳۴۶/۹ و ۳۰۳/۸ cP را نشان داد. کاهش گرانیروی بر اثر افزایش شوری برای تمامی پلیمرها وجود دارد که در این پلیمر به نسبت کاهش شدید مشاهده نشد و می‌توان ادعا کرد که این پلیمر در شوری بالا پایدار بوده و شکسته نشده و خاصیت خود را حفظ کرده است. مصداق این موضوع تحقیقات ورمولن بر روی اثر شوری آب بر پایداری چند



شکل ۵ تغییرات تنش برشی محلول‌های پلیمری بر حسب زمان



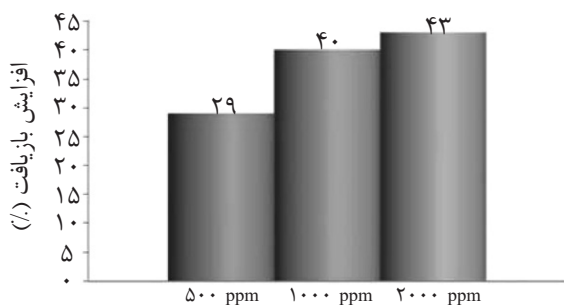
شکل ۶ تغییرات گرانیوی محلول‌های پلیمری با تغییرات دما

همان‌گونه که از شکل ۸ قابل مشاهده است افزایش میزان بازیابی به نسبت سیلاب‌زنی آب برای پلیمر با غلظت‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ppm به ترتیب برابر است با ۲۹، ۴۰ و ۴۳٪ است. مسلماً با افزایش غلظت محلول پلیمری می‌توان به بازیابی بالاتری هم رسید ولی مسئله تزریق‌پذیر بودن محلول است. در واقع پمپی با توان بسیار بالا جهت تزریق یا وجود ندارد و یا هزینه آن بسیار بالاست که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود. نکته مهم در این آزمایش‌ها سنگین بودن نفت مورد استفاده است. با وجود نفت سنگین شاهد هستیم که پلیمر مورد استفاده به خوبی توانسته است نفت را جاروب کرده و درصد بسیار خوبی از نفت در خروجی سیستم تولید شود. در واقع هر پلیمری قادر به تولید این‌گونه نفت‌ها نیست و این نتایج بیانگر کاربردی بودن این پلیمر جهت استفاده در مخازن نفت بسیار سنگین است. در ادامه توضیحات بالا، میزان افزایش بازیابی نفت در این سه آزمایش در شکل ۸ آورده شده است. با توجه به محدودیت‌های گفته شده و نتایج بسیار خوب محلول ۱۰۰۰ ppm می‌توان غلظت بهینه محلول پلیمری را جهت تزریق در مخزن ۱۰۰۰ ppm در نظر گرفت.

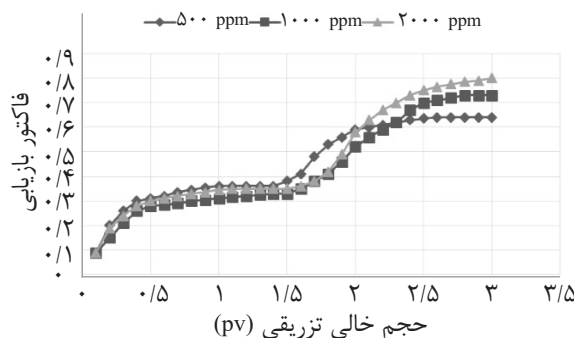
با این وجود جهت امکان‌سنجی عملی بودن این روش ۳ محلول با غلظت پایین‌تر ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ppm را کاندید سیلاب‌زنی پلیمر کرده و ازدیاد برداشت ناشی از آنها بر روی یک نمونه نفت بسیار سنگین خاص مورد بررسی قرار گرفت. نفت مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی گرانیوی ۲۱۰۰ cP و درجه API ۲۰ دارد.

نتایج سیلاب‌زنی در این سه غلظت در شکل ۷ آمده است. قسمت اول هر سه نمودار (حدود ۱/۵ حجم خالی تزریق آب) مربوط به افزایش بازیابی سیلاب‌زنی آب است. میزان این افزایش بازیابی بین ۳۰ تا ۴۰٪ نفت در جای اولیه است و بعد از آن با ادامه تزریق آب تنها شاهد خروج آب بوده و نفتی تولید نمی‌شود. پس از مرحله بازیابی ثانویه مرحله ثالثیه یا تزریق پلیمر آغاز می‌شود. همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش غلظت پلیمر تزریقی میزان بازیابی نهایی افزایش یافته است. در واقع با افزایش غلظت میزان گرانیوی افزایش یافته و توانایی جاروب محیط متخلخل توسط پلیمر افزایش یافته است و به همین دلیل نفت باقی‌مانده کمتری در پشت جبهه پلیمر باقی‌مانده و نتیجتاً میزان بازیابی نهایی نفت افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.





شکل ۸ میزان افزایش بازدهی تولید بر اثر تزریق غلظت‌های مختلف پلیمر



شکل ۷ نتایج آزمایش‌های سیلاب‌زنی پلیمر با غلظت‌های مختلف

سیلاب‌زنی همچنین غلظت ۱۰۰۰ ppm از این نوع پلیمر را به‌عنوان غلظت بهینه جهت تزریق به مخزن نشان می‌دهند. مقایسه اقتصادی نتایج آزمایش‌ها با پژوهش‌های قبلی بیانگر بازدهی بالاتر نسبت به پلیمرهای دیگر است که همین مورد موجب تولید سرمایه بیشتر شده و اجرای این پروژه را از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر خواهد نمود. دلیل اقتصادی‌تر شدن استفاده از این نوع پلیمر به‌خاطر افزایش بازدهی بیشتر با استفاده از غلظت کمتری از پلیمر است. چراکه در عملیات تزریق پلیمر هزینه خرید پلیمر بخش مهمی از هزینه‌ها را شامل می‌شود. با توجه به نتایج محققان دیگر رفتار این پلیمر از چند جهت دارای مزیت است. اولاً گراندروی این پلیمر نسبت به پلیمرهای دیگر در غلظت ثابت بالاتر است. همچنین عملکرد آن در شرایط دما و شوری بالا بهتر بوده و پایداری قابل قبولی دارد. لذا این پلیمر کاندیدای مناسبی جهت تزریق است. نتایج سیلاب‌زنی این پلیمر هم نشان داد به نسبت کارهای دیگر توانست در غلظت کمتری به بازدهی قابل توجهی رسیده و عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داد.

### نتیجه‌گیری

براساس نتایج آزمایش‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت پایداری این نوع پلیمر با تغییرات نرخ برشی و همچنین زمان نسبت به پلیمرهای دیگر مناسب‌تر است. همچنین با تغییر دما میزان گراندروی آن تغییر نکرده و این ویژگی امکان استفاده از آن را در مخازن با دماهای مختلف خواهد داد. فشار هم می‌تواند بر روی پایداری یا عدم پایداری پلیمر اثرگذار باش ولی از آنجا که اثر آن نسبت به عوامل بررسی شده بسیار ناچیز است می‌توان اثرش را نادیده گرفت. نتایج سیلاب‌زنی گویا بازدهی بسیار مناسب این نوع پلیمر است. به‌گونه‌ای که تا حدود ۴۵٪ بازدهی نفت درجا به‌دلیل سیلاب‌زنی پلیمر رخ داده است. این میزان بازدهی آن هم برای نفت بسیار سنگین استفاده شده بیانگر کارایی بالای این نوع پلیمر بر روی نفت‌های سنگین است. علت عملکرد مناسب این نوع پلیمر در وهله اول به پایداری آن در شرایط مختلف آزمایش و همچنین توانایی بالا بردن گراندروی به میزان بیشتر نسبت به پلیمرهای دیگر است. در نتیجه پدیده انگشتی شدن حذف شده و میزان جاروب سطحی پلیمر به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتایج

## مراجع

- [1]. Kharat R., Asadollahi M., and Nemani M., "Enhanced Oil Recovery," Nehare Danesh Press, 2009.
- [2]. Lake L. W., "Enhanced oil recovery," Englewood Cliffs, New Jersey: Patent Hall, 1989.
- [3]. Dullien F. A. L., "Porous media: fluid transport and pore structure," Academic Press, Washington, USA. 1979.
- [4]. Sorbie K. S. "Polymer-improved oil recovery," London: Blackie and Son Limited, 1991.
- [5]. Du Y. and Guan L., "Field-scale polymer flooding: lessons learnt and experiences gained during past 40 years," SPE 91787, International Petroleum Conference, Puebla, Mexico, 8-9 November 2004.
- [6]. Needham R. B. and Doe P. H., "Polymer flooding review," J. Pet.Tech., Vol. 39, No. 12, pp.1503-1507, 1987.
- [7]. Seright R. S., D. Wang, N. Lerner, A. Nguyen, J. Sabid, and R. Tochor. "Can 25-cp polymer solution efficiently displace 1,600-cp oil during polymer flooding?," SPE Journal, Vol. 23, Issue 06, December 2018.
- [8]. Kumar M., Hoang V., Satik C. and Rojas D., "High-mobility-ratio waterflood performance prediction: challenges and new insights," SPERE, Vol. 11, No. 1, pp. 186-196, 2008.
- [9]. Craft B. C., Hawkins M. F. and Terry R. E., "Applied petroleum reservoir engineering," 2<sup>nd</sup> Englewood Cliffs, N. J: Prentice Hall PTR 4-6., pp. 376-384, 1991.
- [10]. Neil J. D., Chang H. L. and Geffen T. M., "Waterflooding and improved waterflooding in improved oil recovery," Oklahoma City, Interstate Oil Compact Commission, pp. 1-52, 1983.
- [11]. Taber J. J., Martin F. D. and Seright R. S., "EOR screening criteria revisited – Part 1: introduction to screening criteria and enhanced recovery field projects," SPERE, Vol. 12, No. 3, pp. 189-198, 1997.
- [12]. Taber J. J., Martin F. D. and Seright R. S., "EOR screening criteria revisited – Part 2: applications and impact of oil prices," SPERE, Vol. 12, No. 3, August 1997.
- [13]. Al-Bahar M. A., Merrill R., Peake W., Jumaa M. and Oskui R., "Evaluation of IOR potential within Kuwait", Paper SPE 88716 presented at the Abu Dhabi International Conference and Exhibition, Abu Dhabi, 10–13 October 2004.
- [14]. Dickson J. L., Leahy-Dios A. and Wylie P. L., "Development of improved hydrocarbon recovery screening methodologies," Paper SPE 129768 presented at the SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, 24–28 April 2010.
- [15]. Shupe R. D., "Chemical stability of polyacrylamide polymers," J. Pet. Tech., Vol. 33, No. 8, pp. 1513-1529, 1981.
- [16]. Akstinat M. H., "Polymers for enhanced oil recovery in reservoirs of extremely high salinities and high temperatures," SPE 8979, Fifth International Symposium on Oilfield and Geothermal Chemistry, Stanford, CA, 28-30 May 1980.
- [17]. Davison P. and Mentzer E., "Polymer flooding in north sea reservoirs," SPE 9300, 55<sup>th</sup> Annual Fall Conference, Dallas, TX, 21-24 September 1980.
- [18]. Manrique E. J., Muci V. E. and Gurfinkel M. E., "EOR field experiences in carbonate reservoirs in the United States," SPEREE, Vol. 10, Issue 6, pp. 667–686, December 2007.
- [19]. Gao C H. "Advances of polymer flood in heavy oil recovery," SPE heavy oil conference and exhibition held in

Kuwait, 12-14 December 2011.

[20]. Wassmuth F., Green K., Hodgins L. and Turta A., "Polymer flood technology for heavy oil recovery," Paper 2007-182 Presented at the Canadian International Petroleum Conference, Calgary Canada, June 2007.

[21]. Wang J. and Dong M., "A laboratory study of polymer flooding for improving heavy oil recovery," Paper 2007-178 Presented at the Canadian International Petroleum Conference, Calgary Canada, June 2007.

[22]. Corredor Laura M., Maen M. Husein and Brij B. Maini., "Effect of hydrophobic and hydrophilic metal oxide nanoparticles on the performance of xanthan gum solutions for heavy oil recovery," Nanomaterials, Vol. 9, No. 1, p. 94, 2019.

[23]. Silveira B. M. O., Lopes L. F. and Moreno R. B. Z. L., "Polymer flooding in a high salinity heavy-oil reservoir," Brazilian Journal of Petroleum and Gas, Vol. 12, No. 1, pp. 35-51, 2018.

[24]. Rajiv D., Soroush M., Alexander D., Shahkarami A. R. and Boodlal D., "Polymer flooding application in trinidad heavy oil reservoirs," In SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference, Society of Petroleum Engineers, 2018.

[25]. Esther V., M. Van Haasterecht J. T., Masalmeh S. K., Faber M. J., Boersma D. M. and Gruenefelder M. A., "Pushing the envelope for polymer flooding towards high-temperature and high-salinity reservoirs with polyacrylamide based ter-polymers," In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Society of Petroleum Engineers, September, Manama, Bahrain, 2011.