

# طراحی میکرومدل‌های جدید سه‌بعدی برای بررسی عملکرد نانوذرات سیلیکا در افزایش اثربخشی تزریق آب

سعید گل شکوه<sup>۱</sup>، مهناز حکمت‌زاده<sup>۲\*</sup> و رضا خرمیان<sup>۳</sup>

۱- شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، اهواز، ایران

۲- دانشکده مهندسی نفت و گاز، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۳۰

## چکیده

در این تحقیق از میکرومدل‌های نوینی جهت بررسی فرآیند ازدیاد برداشت شیمیایی با استفاده از نانوذرات سیلیکا استفاده شده است. طراحی میکرومدل‌های جدید به صورت سه بعدی و ساخت آنها با استفاده از دانه‌های شیشه‌ای و کانی‌های معدنی نظیر ماسه سنگ با شکل هندسی کروی و غیرکروی انجام شده است. بدین منظور این دانه‌ها با روشی خاص بین دو صفحه شیشه‌ای تعبیه می‌شوند و بعد از قرارگیری درون کوره و رسیدن به دمای نرمینگی، محیط متخلخل مخزنی ایجاد می‌شود. این میکرومدل‌ها در مقایسه با نمونه‌های قبلی از مزیت‌های فراوانی برخوردار هستند و می‌توانند خصوصیات ناهمگنی یک مخزن واقعی را منعکس نمایند. آزمایش‌های زاویه تماس، کشش بین سطحی، ویسکوزیته ذاتی و سیلاب‌زنی میکرومدل به منظور بررسی اثر مواد تزریقی بر افزایش اثربخشی تزریق آب و بالا بردن بازیافت نفت انجام شده است. در آزمایش زاویه تماس، تغییر ترشوندگی از نفت دوست به آب دوست بر روی لایه‌ای نازک از سنگ مخزن در اثر جذب و رسوب نانوذرات سیلیکا مشاهده گردید. با بررسی سیلاب‌زنی ترکیب هیبریدی پلیمر و نانو در میکرومدل، افزایش بازیافت نفت و تشکیل امولسیون نفت در آب در مقایسه با تزریق پلیمر به تنهایی مشاهده گردید. میکرومدل‌های جدید طراحی شده وسیله مناسبی را برای مشاهده جریان سیال در سه بعد فراهم می‌نمایند.

**کلمات کلیدی:** میکرومدل، نانوذرات سیلیکا، افزایش اثربخشی سیلاب‌زنی، پلیمر.

## مقدمه

را نداشته باشد. این مرحله اواخر نیمه دوم عمر مخزن یا شروع مرحله سوم تولید از مخزن است که نیازمند اعمال روش‌های ازدیاد برداشت نفت به منظور بهبود تولید است. سیلاب‌زنی با استفاده از مواد شیمیایی به عنوان یکی از روش‌های ازدیاد برداشت شناخته شده است.

فشار مخازن نفتی با تولید کاهش می‌یابد تا جایی که سیال مخزنی توانایی بالا آمدن تا سطح زمین

مخزنی می‌باشد. در این تحقیق، با به‌کار بردن ایده‌ای نو ساخت محیط متخلخلی با خصوصیات مخزنی قابل کنترل انجام شده است. سپس مطالعه افزایش برداشت ناشی از تزریق نانوذرات سیلیکا در این میکرومدل جدید انجام شده است. روش‌های ازدیاد برداشت نفت به دو دسته کلی روش‌های تزریق پایه آبی و پایه گازی تقسیم‌بندی می‌شوند. شرایط مخزن و مسائل اقتصادی تعیین‌کننده روش ازدیاد برداشت موثر می‌باشند. رسوب آسفالتین و به‌وجود آمدن پدیده انگشتی شدن از معایب تزریق روش‌های پایه گازی هستند. در میان روش‌های پایه آبی، از پلیمر به‌صورت گسترده و میدانی استفاده شده است [۵].

اما بیشتر میادین نفتی با شرایط سخت و پیچیده‌ای مانند دما و شوری بالا مواجه هستند که منجر به تخریب پلیمرهای معمولی می‌شود. به منظور غلبه بر این مشکل می‌توان از دو راهکار استفاده کرد. روش اول، سنتز پلیمرهای جدید است. اخیراً، شعبان و همکاران [۶]، تمثیلیان و همکاران [۷] و تمثیلیان و رضانی [۸] پلیمرهای هوشمندی را اختراع کردند که نسبت به شرایط دما و شوری بالا واکنش نشان داده و سبب افزایش ویسکوزیته می‌شوند. روش دوم استفاده از پلیمرهای رایج با اضافه نمودن افزودنی‌هایی مانند نانوذرات است که سبب بهبود خواص پلیمر می‌شود. این امر علاوه بر بحث هزینه، منجر به صرفه‌جویی در زمان خواهد شد. در آزمایش زو و همکاران از ترکیب نانوذرات سیلیکا در آزمایش سیلاب‌زنی مغزه برای بهبود عملکرد پلیمر آگریز هیدولیز شده در شرایط دما و شوری بالا استفاده شد [۹]. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از افزودنی نانوذرات به پلیمر سبب بهبود خواص حرارتی، مغناطیسی و الکتریکی پلیمرها می‌شود [۹]. هندرانینگات و تورسیتر نشان دادند که استفاده از پلی وینیل پیرولیدن به‌عنوان یک پایدارکننده منجر به پایداری نانوذرات و عدم تجمع آن‌ها خواهد شد [۱۰].

در این راستا به منظور غلبه بر پیچیدگی‌های مخزنی و شناسایی مکانیزم‌های جابه‌جایی سیالات مواد شیمیایی و ابزارهای جدیدی مورد نیاز است. یکی از روش‌های شناخت مکانیزم‌های حرکت چندفازی سیالات در مخزن، استفاده از محیط‌های متخلخل مصنوعی می‌باشد. اخیراً گل شکوه و همکاران [۱] ایده‌ای نو در زمینه طراحی و ساخت محیط متخلخل با خصوصیات قابل کنترل مطرح نمودند. ساخت میکرومدل‌های سه بعدی، نمونه‌ای از این نوع محیط‌های متخلخل با خصوصیات قابل کنترل است.

محیط متخلخل در بسیاری از زمینه‌ها از جمله مهندسی نفت، شیمی و مطالعه آلودگی آب و خاک کاربرد دارد. میکرومدل محیط متخلخل شفاف است که می‌تواند برای شناسایی مکانیزم‌های تولید و بررسی اثربخشی تزریق مواد شیمیایی جدید در ازدیاد برداشت نفت همانند نانوذرات و پلیمرها مورد استفاده قرار گیرد. دو روش متداول برای ساخت میکرومدل روش‌های شیمیایی و لیزری می‌باشند. در روش لیزری، از دستگاه لیزر دی‌اکسیدکربن به منظور ساخت و حکاکی محیط متخلخل بر روی یک صفحه شیشه‌ای استفاده می‌شود که این روش به‌صورت جامع توسط محمدی و همکاران [۲] مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین حکمت زاده و همکاران نیز نتایجی ارائه کرده‌اند [۳ و ۴].

در مطالعه مخازن گازی تحت رانش آب از میکرومدل لیزری استفاده نمودند. ساخت میکرومدل لیزری راحت و دارای هزینه تمام شده پایینی است. میکرومدل شیمیایی به دلیل استفاده از اسیدهای خطرناکی مانند سولفوریک اسید نسبت به روش لیزری دارای مراحل ساخت پیچیده‌تری است.

شکل هندسی حفره و گلوگاه‌ها در میکرومدل‌های حاصل از هر دو روش از یکنواختی منظمی تبعیت نمی‌کند. همچنین، تخلخل و تراوایی محیط متخلخل حاصل در این دو روش بسیار بالا و دور از واقعیت

سیلیکا، پلیمر، هیبرید نانو ذرات و پلیمر، نفت خام و محلول آب شور می‌باشند. نانوذرات سیلیکای آب‌دوست با متوسط اندازه ذرات ۱۲ nm استفاده شده است. این نانوذرات از شرکت صنعتی اونیک<sup>۲</sup> تهیه شده‌اند. نانوذرات سیلیکای آب‌دوست توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۳</sup> مشخصه‌یابی شده است. اطلاعات این نانوذرات در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ ویژگی نانوذرات سیلیکا

ویژگی	مقدار
اندازه متوسط ذرات	۱۲ nm
مساحت سطح ویژه	۲۰۰ m <sup>2</sup> /g
pH	۳/۷ - ۴/۷
SiO <sub>2</sub>	۹۹ %wt
دانسیته توده	۰/۰۵ g/cc

پلیمر مورد استفاده در این آزمایش از شرکت اس ان اف<sup>۴</sup> تهیه شده است. جدول ۲ برخی از ویژگی‌های این نوع پلیمر را گزارش می‌دهد. براساس نوع پلیمر استفاده شده در ترکیب با نانوذرات سیلیکا نوع ترکیب حاصل شامل کامپوزیت یا هیبریدی بودن تشخیص داده می‌شود. ترکیب پلیمرهای معمولی با نانوذرات سیلیکا منجر به تشکیل کامپوزیت می‌شوند. در صورتی که پلیمرهایی که دارای زنجیره فعال جانبی هستند منجر به تشکیل هیبریداسیون می‌شوند. در حالتی که ترکیب از نوع کامپوزیت باشد، محصول نهایی دارای مجموعه ویژگی‌های نانو ذرات و پلیمر خواهد بود اما زمانی که اختلاط پلیمر و نانو از نوع هیبرید باشد، محصول حاصله دارای ویژگی‌های منحصر به فردی خواهد بود که در هیچ‌یک از مواد اولیه به تنهایی یافت نمی‌شود [۱۵].

مغزی و همکاران اثر ترکیب نانوذرات سیلیکا و پلی اکریل آمید بر ازدیاد برداشت نفت را با استفاده از میکرومدل‌های شیمیایی و لیزری مورد بررسی قرار دادند [۱۱ و ۱۲]. در مطالعه یوسفوند و جعفری نشان داده شد که جذب نانوذرات سیلیکا بر روی دیواره حفره و گلوگاه‌ها منجر به آب‌دوستی شدید میکرومدل شده و باعث می‌شود هیدرولیز پلی اکریل آمید عملکرد بهتری بر بازیافت نفت داشته باشد [۱۳ و ۱۴]. در این تحقیق، اثر ترکیب نانوذرات سیلیکا به همراه پلی اکریل آمید<sup>۱</sup> جهت ازدیاد برداشت در میکرومدلی جدید مطابق با شرایط مخزنی از منظر اندازه حفرات و گلوگاه‌ها در محیط متخلخل بررسی شده است. در این مطالعه، اثر اضافه شدن نانوذرات فیوم سیلیکا در بهبود شرایط تزریق آب و پلیمر به تنهایی با تزریق در میکرومدل ارزیابی شده است. میکرومدل جدید امکان مشاهده تغییرات نفت باقی مانده به صورت کیفی در محیط ناهمگن و سه بعدی را فراهم می‌نماید.

در این تحقیق ابتدا مواد مورد استفاده در انجام آزمایش شامل سیالات توصیف شده است. سپس، روش طراحی و ساخت میکرومدل جدید بیان شده است. بهترین روش تشکیل هیبریداسیون بین نانوذرات و پلیمر بیان می‌شود. پس از آن، مراحل تزریق مواد درون میکرومدل تحت سه سناریوی تزریق آب شور، پلیمر و هیبرید پلیمر با نانوذرات سیلیکا توضیح داده می‌شود. در انتها نتایج آزمایشات بررسی شده‌اند.

## مواد

در این بخش، مواد مورد استفاده در این مطالعه شرح داده شده است. در قسمت اول، سیالات مورد استفاده و در قسمت دوم، روش طراحی و ساخت میکرومدل آورده می‌شود.

## سیالات

سیالات مورد استفاده در این تحقیق شامل نانوذرات

1. Sulfonated Copolymer  
2. Evonik Industry  
3. TEM  
4. SNF Company

جدول ۲ ویژگی‌های پلیمر.

پلیمر	وزن مولکولی (دالتون)	درجه سولفونه
Acrylamide/AMPS based copolymer (AN132)	$8 \times 10^6$	۳۲

محلول آب شور نیز توسط آب دیونیزه و نمک سدیم کلراید با شوری معادل با شوری آب خلیج فارس ( $50000 \text{ ppm}$ ) سنتز گردید.

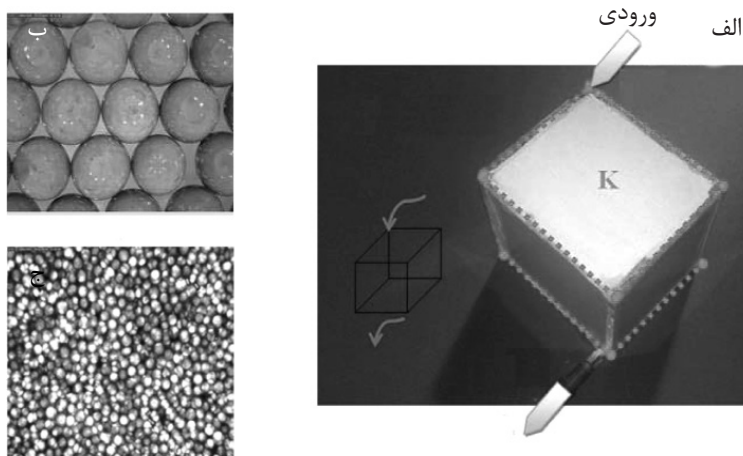
جدول ۳ خواص نفت خام.

خواص نفت خام در شرایط استاندارد	مقدار (درصد مولی)
اتان	۰/۲
پروپان	۱/۵
ایزو بوتان	۱
نرمال بوتان	۴
ایزو پنتان	۳
نرمال پنتان	۳/۶
هگزان	۶/۴
هپتان و سنگین تر	۸۰/۱
گوگرد	۰/۲

### میکرومدل

برای ساختن میکرومدل جدید، نیاز به مقداری دانه‌های شیشه‌ای و معدنی به منظور تشکیل محیط متخلخل می باشد. در ابتدا یک صفحه شیشه‌ای صاف با ضخامت  $4 \text{ mm}$  برای قسمت زیرین میکرومدل انتخاب می‌گردد. سپس ۴ عدد نوار شیشه‌ای با ضخامت مدنظر در چهار لبه صفحه شیشه‌ای زیرین به‌نحوی چسبانده می‌شوند تا محفظه‌ای برای ریختن مواد تشکیل دهنده محیط متخلخل و تعبیه ورودی و خروجی فراهم گردد. بعد از آن صفحه شیشه‌ای دیگری با ضخامت  $2 \text{ mm}$  بر روی نوارهای شیشه‌ای قرار داده می‌شود تا اینکه محیط متخلخل بسته‌ای را تشکیل دهد (شکل ۱). در انتها میکرومدل به مدت نیم ساعت در دمای  $700^\circ \text{C}$  درون کوره قرار می‌گیرد.

علاوه بر پلیمریزاسیون یک مونومر درون سوسپانسیون ذرات غیرآلی مانند نانوذرات سیلیکا، هیبریداسیون می‌تواند به علت تورم و اختلاط آرام یک کوپولیمر درون سوسپانسیونی از نانوذرات حاصل شود [۹]. به منظور بررسی هیبریداسیون، دو حالت ترکیب محلول پلیمر با سوسپانسیون نانوذرات سیلیکا و ترکیب پلیمر پودری با سوسپانسیون نانوذرات با درصد وزنی برابر انجام گردید. پس از همزدن آرام برای مدت  $24 \text{ hr}$  و اندازه‌گیری ویسکوزیته ذاتی محلول‌ها؛ این نتیجه حاصل شد که ترکیب پلیمر پودری با سوسپانسیون نانوذرات سیلیکا و همزدن آرام منجر به تشکیل پیوند بهتری بین زنجیره پلیمر و نانوذرات و افزایش ویسکوزیته محصول نهایی خواهد شد. لذا به منظور تشکیل هیبریداسیون بین پلیمر با نانوذرات سیلیکا، غلظت‌های  $200 \text{ ppm}$  از نانوذرات سیلیکا و کوپلیمر پودری انتخاب شد. برای آماده سازی سوسپانسیون نانوذرات سیلیکا از دستگاه آلتراسونیک پروبی (دامنه  $60\%$  و سیکل  $0/5$ ) استفاده شد. با هدف ایجاد تورم کوپلیمر درون سوسپانسیون نانوذرات سیلیکا و تشکیل یک شبکه بین نانوذرات سیلیکا و کوپلیمر، این ترکیب به مدت یک روز در یک مکان آرام قرار داده شد. به منظور داشتن یک هیبریداسیون همگن، ترکیب نانوذرات سیلیکا و کوپلیمر به مدت یک روز دیگر با استفاده از یک همزن مغناطیسی به آرامی مخلوط شد. ویسکوزیته سینماتیک هیبرید پلیمر به همراه نانوذرات سیلیکا برابر  $3/3 \text{ cSt}$  اندازه‌گیری شد. بالاتر بودن ویسکوزیته محصول نهایی نسبت به مواد اولیه نشان‌دهنده تشکیل هیبرید همگن می باشد. نفت خام استفاده شده در تمام آزمایشات از یکی از میدین جنوب غربی ایران تهیه گردید. خواص نفت مورد نظر در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۱ الف) میکرومدل سه بعدی، ب) دانه‌های تشکیل‌دهنده میکرومدل، ج) میکرومدل اشباع شده با نفت.

در این طراحی محدودیت مدل‌های قبلی حذف گردیده است و بسیاری مزیت‌ها شامل امکان طراحی انعطاف‌پذیر میکرومدل بدون محدودیت در طول، عرض و ضخامت آن و تعبیه چندین پورت در مکان‌های مختلف میکرومدل به‌عنوان ورودی و خروجی فراهم گردیده است (شکل ۲). ویژگی‌های میکرومدل سه بعدی استفاده شده در این تحقیق در جدول ۴ ذکر گردیده است. با توجه به دانه‌های شیشه‌ای یکسان، کروی و هم‌جنس استفاده شده در ساخت میکرومدل سه بعدی، توزیع اندازه حفرات یکسانی نیز به‌دست می‌آید. براساس آنالیز تصاویر صورت گرفته شعاع متوسط حفرات ایجاد شده  $50 \mu\text{m}$  برآورد گردید. برای برقراری تعادل نیروهای بین نیروهای موئینگی و ویسکوز در میکرومدل متناسب با شرایط مخزنی عدد موئینگی متوسط  $10^{-8}$  در نظر گرفته شده است. بنابراین با توجه به سرعت متوسط سیال در مخزن ( $1 \text{ ft/day}$ ) و میانگین سطح مقطع عبوری جریان در میکرومدل دبی تزریق برابر  $0.5 \text{ cc}$  بر ساعت برای سیلاب‌زنی استفاده شد.

### بحث و نتایج

در این بخش، ابتدا ویسکوزیته ذاتی هیبرید نانوذرات سیلیکا و پلیمر در مقایسه با پلیمر به‌تنهایی در دو دمای مختلف بررسی می‌شود.

این امر منجر به ساخت محیط متخلخلی صلب و بدون حرکت در اثر سیلاب‌زنی می‌شود. اندازه و نوع ذرات تشکیل‌دهنده و دمای کوره در تخلخل و نفوذپذیری میکرومدل تاثیرگذار است.

از مزیت‌های ساخت این میکرومدل‌ها نسبت به مدل‌های پیشین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- امکان استفاده از دانه‌ها و کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ مخزن به منظور ساخت محیط متخلخل
- طراحی و ساخت آسان بدون نیاز به دستگاه لیزر و مواد اسیدی

- امکان ساخت میکرومدل‌های سه بعدی مشابه با میکرومدل‌های دو بعدی از نظر خواص و ویژگی

- امکان ساخت محیط متخلخلی با خصوصیات دلخواه از نظر تخلخل و تراوایی با تنظیم اندازه و

- نوع ذرات تشکیل‌دهنده و دمای کوره
- شستشوی آسان و بدون پدیده مهاجرت دانه‌های

- تشکیل‌دهنده محیط متخلخل
- توانایی ساخت دستگاه سیلاب‌زنی مغزه مسطح جهت تصویرسازی، مطالعه و شناسایی مکانیزم‌های

تولید

- امکان ساخت محیط‌های متخلخل ناهمگن با استفاده از دانه‌های شیشه‌ای و کانی‌های مختلف بعد از ساخت این میکرومدل جدید، نیاز به ساخت نگهدارنده‌ای جدید برای این نوع میکرومدل‌ها نیز می‌باشد تا شرایط تزریق در فشار بالا فراهم شود.

چهار غلظت متفاوت کوپلیمر (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ ppm) به همراه ۵۰۰ ppm از نانوذرات سیلیکا برای ایجاد ترکیب هیبریدی با غلظت‌های متفاوت استفاده شد. شکل ۲ ویسکوزیته ذاتی پلیمر در دو دمای ۳۵ و ۶۰ °C را نشان می‌دهد. همانگونه که از این شکل مشخص است پلیمر به تنهایی در دماهای بالاتر دارای ویسکوزیته کمتری است که نشان‌دهنده عدم پایداری پلیمر مذکور در دماهای بالا است. شکل ۳، ویسکوزیته ذاتی محلول‌های هیبریدی حاصل از اضافه شدن ۵۰۰ ppm نانوذرات سیلیکا به چهار غلظت متفاوت پلیمر را در دو دمای ۳۵ و ۶۰ °C نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ویسکوزیته هیبرید پلیمر و نانو ذرات بالاتر از ویسکوزیته پلیمر به تنهایی است. ترکیب هیبرید نسبت به پلیمر به تنهایی در دماهای بالاتر پایداری بهتری دارد و ویسکوزیته با تغییر دما کاهش اندکی یافته است. لذا ترکیب هیبرید به علت تشکیل یک شبکه بین نانوذرات سیلیکا و پلیمر دارای ویسکوزیته بالاتر و پایداری حرارتی بهتری نسبت به پلیمر به تنهایی است.

#### اندازه‌گیری زاویه تماس

ترشوندگی در یک سیستم مخزنی سنگ- سیال عبارت است از توانایی پخش شدن یک سیال بر روی سطح سنگ در حضور سیال دیگر. ترشوندگی نقش به‌سزایی در تولید نفت ایفا می‌کند. درجه ترشوندگی یک سطح توسط سیال را معمولاً با استفاده از آزمایش اندازه‌گیری زاویه تماس به دست می‌آورند. در این تحقیق، از لایه نازکی از سنگ مخزن مورد مطالعه به منظور بررسی ترشوندگی استفاده شده است. در این راستا یک قطره نفت با حجم ۱۰  $\mu\text{L}$  بر روی لایه نازک مدنظر، که از قبل در سیال تزریقی غوطه‌ور شده، تزریق می‌شود. زاویه تماس قطره نفت بر روی اسلایس سنگ برش خورده را در حضور آب هم‌زاد برابر ۳۱/۹ اندازه‌گیری شد.



شکل ۲ میکرومدل، نگهدارنده و پورت‌های تزریق.

جدول ۴ ویژگی‌های میکرومدل سه بعدی.

مقادیر	پارامترها
۴۵/۴۴	تخلخل (/.)
۲	تراوایی (داری)
۵	طول (cm)
۵	عرض (cm)
۰/۱	ضخامت (cm)
۲۵۰	اندازه دانه‌ها ( $\mu\text{m}$ )

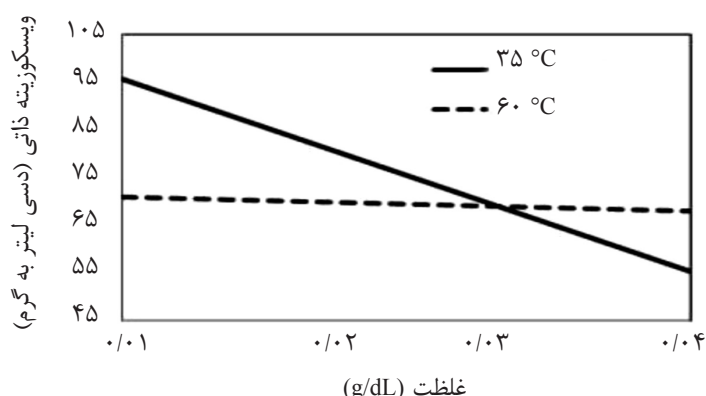
پس از آن آزمایش زاویه تماس هیبرید با نفت خام در حداکثر شوری انجام می‌شود.

#### اندازه‌گیری ویسکوزیته ذاتی

ویسکوزیته ذاتی پلیمر، نانوذرات سیلیکا و هیبرید آن‌ها توسط ویسکومتر موپینه آبلهود<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شد. ویسکوزیته ذاتی با استفاده از عرض از مبدا نمودار ویسکوزیته بر حسب غلظت به دست می‌آید. نتایج ویسکوزیته ذاتی در دو دمای ۳۵ و ۶۰ °C در جدول ۵ گزارش شده است.

جدول ۵ ویسکوزیته ذاتی در دو دمای ۳۵ و ۶۰ °C.

ویسکوزیته ذاتی (دسی لیتر به گرم)		نمونه‌ها
۶۰ °C	۳۵ °C	
۱	۱	آب دیونیزه
۱	۱	نانوذرات سیلیکا
۵۹	۷۷	پلیمر
۱۱۱	۱۱۳	هیبرید



شکل ۳ ویسکوزیته ذاتی هیبرید پلیمر و نانوذرات سیلیکا در دو دمای ۳۵ و ۶۰°C.

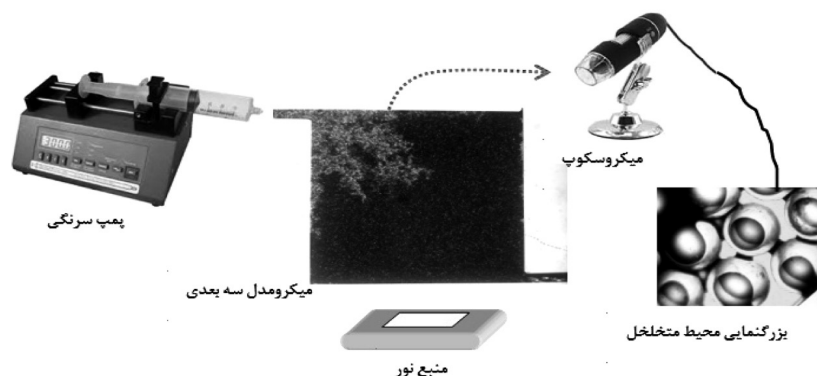
به منظور بررسی تغییرات ترشوندگی، لایه نازک سنگ مدنظر درون هیبرید نانوذرات سیلیکا و پلیمر با شوری آب همزاد غوطه‌ور شد. بعد از ۳۰ min مشاهده گردید که نانوذرات سیلیکا بر روی لایه نازک سنگ رسوب کردند و رنگ آن از تیرگی به سفیدی تبدیل شد. این پدیده به این دلیل رخ داده است که در زمان برخورد سیال تزریقی با آب همزاد مخزن، به دلیل شوری بسیار بالا شبکه ایجاد شده بین نانوذرات و پلیمر تخریب شده و نانوذرات سیلیکا بر روی سنگ نشست می‌کنند. سپس به منظور بررسی تغییرات ترشوندگی، زاویه تماس لایه نازک سنگی پوشیده شده با نانوذرات سیلیکا برابر با ۱۴۲°C اندازه‌گیری شد. این نتایج نشان‌دهنده تغییر ترشوندگی سنگ از نفت دوست به آب‌دوست می‌باشد که سبب کاهش اشباع نفت باقی‌مانده درون مخزن می‌شود.

بر اساس محاسبات انجام شده زمان تزریق برای یک حجم فضای خالی از محیط متخلخل برابر ۱۴۷ min می‌باشد. شکل ۴ تجهیزات استفاده شده برای سیلاب‌زنی میکرومدل را نشان می‌دهد که شامل پمپ سرنگی، میکروسکوپ، میکرومدل، منبع نور و نگهدارنده میکرومدل می‌باشد. سه مرحله سیلاب‌زنی با حجم سیال تزریقی ۱ PV در میکرومدل به ترتیب به صورت زیر انجام پذیرفت؛ الف- ۵۰۰۰۰ ppm آب شور؛ ب- ۱۰۰۰ ppm پلیمر به‌تنهایی؛ ج- هیبرید نانوذرات سیلیکا (۲۰۰۰ ppm) و پلیمر (۱۰۰۰ ppm). لازم به ذکر است که ترکیبات هیبرید و پلیمر در حین تزریق و نیز ۴ روز پس از تزریق پایدار بوده و هیچ‌گونه تغییر فازی مشاهده نگردید. نمودار ضریب بازیافت بر حسب زمان پس از تزریق یک حجم فضای خالی از سیال تزریقی در شکل ۵ نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در سناریوهای تزریق به مانند شرایط تزریق درون یک مخزن نفتی عمل شده است. بدین صورت که ابتدا یک حجم فضای خالی از محیط متخلخل توسط آب شور تزریق شده است سپس برای اعمال سناریوی تزریق بعدی بدون شستشوی میکرومدل مقدار یک حجم فضای خالی از کوپلیمر در میکرومدل تزریق شده است تا مقدار بازیافت اضافی توسط سیلاب‌زنی کوپلیمر حاصل گردد. این امر برای هیبرید نیز اعمال شده است.

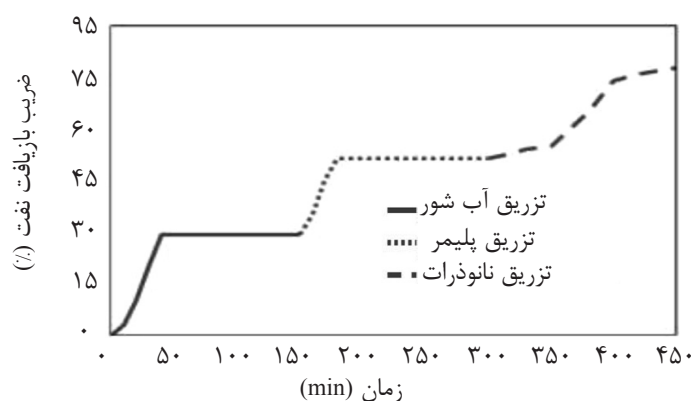
به منظور بررسی تغییرات ترشوندگی، لایه نازک سنگ مدنظر درون هیبرید نانوذرات سیلیکا و پلیمر با شوری آب همزاد غوطه‌ور شد. بعد از ۳۰ min مشاهده گردید که نانوذرات سیلیکا بر روی لایه نازک سنگ رسوب کردند و رنگ آن از تیرگی به سفیدی تبدیل شد. این پدیده به این دلیل رخ داده است که در زمان برخورد سیال تزریقی با آب همزاد مخزن، به دلیل شوری بسیار بالا شبکه ایجاد شده بین نانوذرات و پلیمر تخریب شده و نانوذرات سیلیکا بر روی سنگ نشست می‌کنند. سپس به منظور بررسی تغییرات ترشوندگی، زاویه تماس لایه نازک سنگی پوشیده شده با نانوذرات سیلیکا برابر با ۱۴۲°C اندازه‌گیری شد. این نتایج نشان‌دهنده تغییر ترشوندگی سنگ از نفت دوست به آب‌دوست می‌باشد که سبب کاهش اشباع نفت باقی‌مانده درون مخزن می‌شود.

### سیلاب‌زنی میکرومدل

به منظور بررسی سیلاب‌زنی، ابتدا بایستی میکرومدل توسط نفت کاملاً اشباع شود. از اشباع آب همزاد به دلیل حجم پایین میکرومدل صرف‌نظر شده است. سپس حجم فضای خالی میکرومدل با اندازه‌گیری اختلاف وزن میکرومدل خالی و اشباع‌شده با نفت خام و همچنین مشخص بودن دانسیته نفت خام محاسبه شده است (۱/۱۳۶ cc). دبی تزریق درون محیط متخلخل با لحاظ سرعت متوسط مخزن



شکل ۴ تجهیزات مورد استفاده برای سیلاب‌زنی هیبرید پلیمر و نانوذرات در میکرومدل.



شکل ۵ بازیافت نفت برای سه سناریوی مختلف تزریق.

محیط ناهمگن و سه بعدی به‌عنوان محیط متخلخل نماینده مخزن ایجاد می‌کند. براساس نتایج بدست آمده، هیبرید نانوذرات سیلیکا با پلیمر ترکیب ثمر بخشی برای افزایش اثربخشی سیلاب‌زنی می‌باشد. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده عبارتند از: روش آماده‌سازی هیبرید نانوذرات سیلیکا و پلیمر بر روی ویسکوزیته موثر است و بهترین روش آماده‌سازی هیبرید اضافه کردن پلیمر به‌صورت پودر به سوسپانسیون نانوذرات سیلیکا می‌باشد. هیبرید نانوذرات سیلیکا و پلیمر نه تنها منجر به افزایش ویسکوزیته در غلظت‌های کم پلیمر می‌شود بلکه پایداری پلیمر در شوری و دماهای بالاتر را در پی دارد.

نانوذرات سیلیکا پتانسیل بالایی در اعمال تغییر ترشوندگی و تاثیر مثبت بر روی تراوایی‌های پایین و بسیار پایین را دارند. به هر حال بایستی دقت داشت که سوسپانسیون نانوذرات به اندازه کافی

بازیافت نفت بعد از تزریق آب شور، کوپلیمر و هیبرید به ترتیب  $29/3\%$ ،  $22\%$  و  $26/4\%$  محاسبه گردیدند. همچنین مجموع بازیافت نهایی مربوط به سه سناریوی تزریق  $77/7\%$  به‌دست آمد. در سناریوی سوم، تزریق نانوذرات سیلیکا و پلیمر، نه تنها افزایش ویسکوزیته بلکه کاهش کشش بین سطحی و تشکیل امولسیون نفت در آب منجر به افزایش عدد موینگی و بازیافت نفت شد.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، توانایی هیبرید نانوذرات سیلیکا به منظور کاهش اشباع نفت باقی‌مانده با استفاده از طراحی میکرومدل‌های جدیدی مورد بررسی واقع شد. بدین منظور آزمایش‌های ویسکوزیته، تشکیل امولسیون، زاویه تماس و سیلاب‌زنی میکرومدل انجام شد. گردید. میکرومدل‌های جدید طراحی شده وسیله مناسبی را برای مشاهده جریان سیال در



بازیافت میکروسکوپیک را بهبود دهد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب و شرکت دانه‌های شیشه‌ای پانا بدلیل حمایت مالی و اطلاعاتی تشکر به عمل می‌آورند.

پایدار باشد تا اثربخشی خود را اعمال کند. استفاده از پلیمر به‌همراه نانوذرات به پایداری نانوذرات سیلیکا کمک می‌کند.

تزریق هیبرید درون میکرومدل منجر به بهبود بازیافت نفت نسبت به تزریق آب شور یا پلیمر به‌تنهایی می‌شود. پلیمر به نانوذرات سیلیکا کمک می‌کند تا به مناطق دست نخورده نفوذ کند و

### مراجع

- [1]. Golshokoh S., Khoramian R. and Ramazani S. A. A., "Methods for fabricating porous media with controllable characteristics," Under Support of INSF at the U.S. Patent and Trademark Office Publication No. US20160341477A1, 2016.
- [2]. Mohammadi S., Maghzi A., Ghazanfari M. H., Masihi M., Mohebbi M. and Kharrat R. "On the control of glass micro-model characteristics developed by laser technology," Journal of Energy Sources, Part A, Vol. 35, No. 3, pp. 193-201, 2013.
- [3]. Hekmatzadeh M., Mitra D. and Emadi M.A., "Experimental and numerical pore scale study of residual gas saturation in water/gas imbibition phenomena," Iran. J. Chem. Chem. Eng., Vol. 34, No. 3, pp. 109-120, 2015.
- [4]. Hekmatzadeh M., Dadvar M., and Emadi M. A., "Visual investigation of residual gas saturation in porous media," International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, Vol. 10, No. 2, pp. 161-178, 2015.
- [5]. Wassmuth F. R., Green K., Arnold W., and cameron N. "Polymer flood application to improve heavy oil recovery at east bodo," Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 48, No. 2, pp. 55-61, 2009.
- [6]. Shaban M., Ramazani S. A. A., Ahadian M. M., Tamsilian Y. and Weber A. P., "Facile synthesis of cauliflower-like hydrophobically modified polyacrylamide nanospheres by aerosol-photopolymerization," European Polymer Journal, Vol. 83, pp. 323-336, 2016.
- [7]. Tamsilian Y., Ramazani S. A. A., Shaban M., Ayatollahi S., de la Cal J. C., Sheng J. J. and Tomovska R., "Nanostructured particles for controlled polymer release in enhanced oil recovery," Energy Technology Journal, Vol. 4, No. 9, pp. 1035-1046, 2016.
- [8]. Tamsilian Y. and Ramazani S. A. A., "Enhanced oil recovery performance and time-dependant role of polymer-ic core-shell nanoemulsion," Scientia Iranica, Transaction F, Nanotechnology, Vol. 21, No. 3, pp. 1724-1728, 2014.
- [9]. Zhu D., Wei L., Wang B. and Feng Y., "Aqueous hybrids of silica nanoparticles and hydrophobically associating hydrolyzed polyacrylamide used for eor in high-temperature and high-salinity reservoirs," Energies, Vol. 7, No. 6, pp. 3858-3871, 2014.
- [10]. Hendraningrat L. and Torsaeter O., "Understanding fluid-fluid and fluid-rock interaction in the presence of hydrophilic nanoparticles at various conditions," in SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2014.

- [11]. Maghzi A., Kharrat R., Mohebbi A. and Ghazanfari M.H., "The impact of silica nanoparticles on the performance of polymer solution in presence of salts in polymer flooding for heavy oil recovery," Fuel, Vol. 123, pp. 123-132, 2014.
- [12]. Maghzi A., Mohebbi A., Kharrat R. and Ghazanfari M.H., "Pore-scale monitoring of wettability alteration by silica nanoparticles during polymer flooding to heavy oil in a five-spot glass micromodel," Transport in porous Media, Vol. 87, No. 3, pp. 653-664, 2011.
- [13]. Yousefvand H. and Jafari A., "Enhanced oil recovery using polymer/nanosilica," Procedia Materials Science, Vol. 11, pp. 565-570, 2015.
- [14]. Guo H., Dou M., Hanqing W., Wang F., Yuanyuan G., Yu Z., Yansheng W. and Li Y., "Review of capillary number in chemical enhanced oil recovery," In SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference. Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [15]. Zou H., Wu S. and Shen J., "Polymer/silica nanocomposites: preparation, characterization, properties, and applications," Chem. Rev., Vol. 108, No. 9, pp. 3893-3957, 2008, .
- [16]. Torsæter O. and Abtahi M., "Experimental reservoir engineering laboratory workbook," Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology [NTNU], Trondheim ,2003.
- [17]. Buckley J. S. and Fan T., "Crude oil/brine interfacial tensions," Petrophysics, Vol. 48, NO. 3, pp. 175-185, 2007.
- [18]. Kumar B., "Effect of salinity on the interfacial tension of model and crude oil systems," MSc. Dissertation, Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary, Alberta, 2012.
- [19]. ShamsiJazeyi H., Miller C. A., Wong M. S., Tour J. M., and Verduzco R., "Polymer-coated nanoparticles for enhanced oil recovery," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 131, No. Issue 15, pp. 1-13, 2014 .