

تأثیر غلظت و اندازه قطرات نفت همراه آب در کاهش تزریق پذیری در فرآیند بازتزریق آب تولیدی

علی لطفی فتح آبادی^۱، عظیم کلانتری اصل^۱، میثم محمدزاده شیرازی^{۱*} و سعید گلشکوه^۲

۱- بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱

چکیده

آب تولیدی همراه نفت از بزرگ‌ترین جریان‌های فاضلاب صنایع به‌شمار می‌رود. از جمله روش‌های مدیریت این آب، تزریق مجدد آن به مخازن نفتی به‌منظور فشارافزایی است؛ از طرفی به‌دلیل حضور آلاینده‌های مختلف در این آب، احتمال انواع آسیب‌سازندی وجود دارد. در این میان حضور قطرات نفت همراه آب، سبب گرفتگی محیط متخلخل، کاهش تزریق‌پذیری و افزایش فشار تزریق می‌گردد. در این پژوهش، آب تولیدی سنتزی شامل قطرات نفت امولسیون شده در آب آماده شد و از طریق بررسی‌های میکروسکوپی و انجام آزمایش‌های میکرومدل، تأثیر میزان غلظت نفت بر اندازه قطرات امولسیون و همچنین میزان کاهش تخلخل بررسی گردید. آزمایش‌های میکروسکوپی با غلظت نفت و شوری در محدوده به‌ترتیب ۳۰ تا ۱۰۰ قطره و ۴ ppm تا ۳۲ ppm و آزمایش‌های میکرومدل با غلظت نفت ۷۰ و ۱۵۰ قطره تا تزریق ۳۵ PV انجام شد. نتایج مشاهدات میکروسکوپی نشان داد، افزایش غلظت نفت سبب افزایش میزان اندازه قطرات نفت شده بطوریکه افزایش غلظت نفت از ۳۰ به ۱۰۰ قطره، موجب افزایش میانگین اندازه قطره از $۱/۵۶ \mu\text{m}$ به $۱/۹۸ \mu\text{m}$ می‌گردد. در آزمایش‌های میکرومدل با محاسبه تخلخل اشغال شده ناشی از قطرات نفت محبوس، مشخص گردید با افزایش دو فاکتور میزان حجم تزریق و غلظت نفت، نسبت تخلخل اشغال شده نهایی به تخلخل اولیه کاهش می‌یابد. به‌عنوان نمونه برای امولسیون نفت در آب با غلظت ۱۵۰ قطره نفت، در حجم تزریق ۷ PV و ۳۵ PV این نسبت از ۰/۸۷۵ به ۰/۶۴۲ در حجم تزریق می‌رسد. همچنین با تزریق ۳۵ PV آب تولیدی سنتزی با دو غلظت ۷۰ و ۱۵۰ قطره نفت، نسبت کاهش تخلخل از ۰/۹۱۴ به ۰/۶۴۲ رسید که موید تشدید آسیب‌سازند باشد. یافته‌های این تحقیق، به‌صورت کمی، اهمیت حذف آلاینده قطرات نفت همراه با آب تولیدی (قبل از تزریق شان به چاه‌ها) را در جهت جلوگیری از کاهش تزریق‌پذیری نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: آب تولیدی، امولسیون نفت در آب، غلظت نفت، حجم تزریق، میکرومدل، بررسی میکروسکوپی

*مسئول مکاتبات

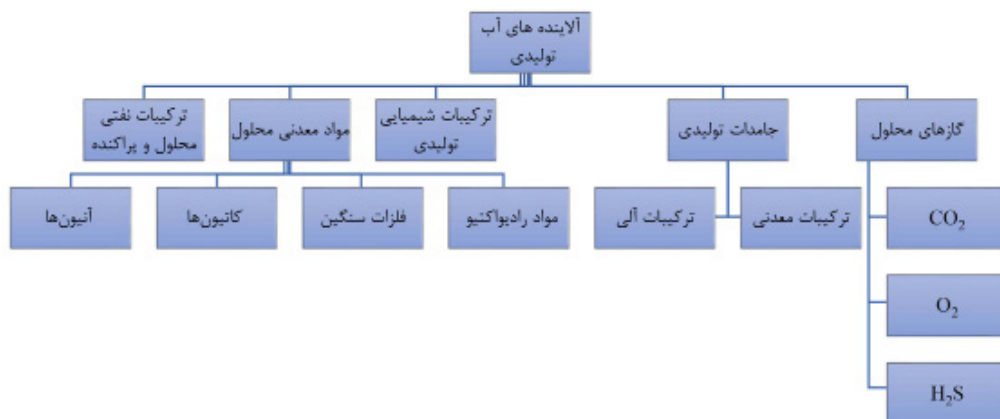
آدرس الکترونیکی: m.mohammadzadeh@shirazu.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/pr.2024.5317.3365)

مقدمه

درحالی‌که جهان بهره‌مند از تولید هیدروکربن است، اما این تولید با برخی مواد زائد نامطلوب دیگر همراه بوده که عامل ایجاد مشکلات محیط زیستی و هزینه‌های بالای تصفیه‌ای هستند. از جمله این مواد زائد می‌توان به آب تولیدی همراه تولید نفت و گاز اشاره کرد که حجم قابل توجهی داشته و نیاز به مدیریت صحیح در کوتاه‌مدت و بلندمدت دارد [۱]. در صنعت نفت و گاز، آب تولید شده از دو منبع حاصل می‌شود. اول، در طول فرآیند استخراج هیدروکربن، مخلوطی از آب و نفت تولید می‌شود که منبع اصلی آن آب دریا یا رودخانه است و دوم آبی که به میدان نفتی تزریق شده تا نفت عمیق را به سطح برساند که در نهایت بخشی از همین آب یا فاضلاب، مجدد تولید می‌شود [۲]. در نهایت آب تولید شده‌ای که الزامات کنترل کیفی را برآورده کند ممکن است به‌طور بالقوه در کاربردهای مختلفی در عملیات میداین نفتی، مانند سیل آب/بخار، تزریق به آبد مخزن، حفاری و تکمیل چاه، شکست هیدرولیکی و یا خارج از عملیات میدان نفتی، مانند آبیاری محصولات کشاورزی، حیات وحش و مصرف دام و تولید برق مورد استفاده قرار گیرد [۳]. کیفیت آب تولید شده با محتوای جامدات معلق کل^۱ و میزان نفت همراه

آب^۲ اندازه‌گیری می‌شود. کیفیت پایین آب تزریقی منجر به کاهش نرخ تزریق آب و مسدود شدن چاه‌ها می‌شود [۴]. برای این منظور و برای جلوگیری از گرفتگی منافذ، محتوای جامدات معلق و میزان نفت همراه باید محدود شود. مشخصات کلی برای محدودیت‌های قابل قبول نفت همراه و جامدات معلق به ترتیب ۴۲ mg/L و ۱۰ mg/L است [۵]. شکل ۱ انواع ترکیبات و آلاینده‌های همراه آب تولیدی را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، مدیریت آب تولیدی شامل سه روش کمینه‌سازی، استفاده مجدد یا بازیافت آب تولیدی و همچنین دفع آب تولیدی است. در بحث کمینه‌سازی هر بشکه اضافی آب تولیدی، هزینه‌های پمپاژ آن به سطح و ذخیره، تصفیه و مدیریت آن را افزایش می‌دهد؛ لذا یک راه‌حل بهینه برای کاهش هزینه‌ها، کاهش میزان آب مصرفی است [۶]. همچنین در زمینه بازیافت آب تولیدی، آب تولیدی، آب تولید شده می‌تواند به‌عنوان یک منبع قابل بازیابی در نظر گرفته شود و در زمینه‌های مختلف مورد استفاده مجدد قرار گیرد. به‌عنوان مثال، تزریق مجدد آب تولید شده به یک سازند برای دستیابی به حداکثر بازیابی نفت، یک روش استفاده مجدد رایج است [۷]. در نهایت از منظر اثربخشی هزینه، دفع آب تولیدی بهترین روش است.



شکل ۱ انواع ترکیبات و آلاینده‌های همراه آب تولیدی

1. Total Suspended Solid (TSS)

2. Oil in Water

ج) ترکیبات شیمیایی تولیدی

براساس مشخصات چاه‌ها، در هنگام تولید نفت و گاز، برخی از افزودنی‌ها مانند انواع بازدارنده‌ها، بیوسیدها، پخش‌کننده‌های آسفالتین، کف‌زدا، امولسیون شکن‌ها و مواد شیمیایی تصفیه آب مانند زلال‌کننده‌ها، منعقدکننده‌ها و لخته‌سازها برای تصفیه و بهبود جداسازی نفت/آب اضافه می‌شوند [۱۰].

د) جامدات تولیدی

جامدات تولیدی انواع مختلفی از ترکیبات آلی و معدنی مانند خاک رس، موم، باکتری، کربنات، ماسه، فرآورده‌های خوردگی و رسوب‌گذاری و جامدات تشکیل‌دهنده هستند که در آب تولیدی وجود دارند. ترکیبات SiO_2 ، Fe_2O_3 ، Fe_3O_4 و BaSO_4 برخی از مواد معدنی هستند که ممکن است در آب تولیدی نیز یافت شوند [۱۰].

ه) گازهای محلول

گازهایی مانند CO_2 ، O_2 و H_2S نیز می‌توانند در آب تولیدی وجود داشته باشند. رسوب براساس کربنات و سولفات در طول تزریق مجدد آب تولیدی می‌تواند مربوط به حضور کربن دی‌اکسید و هیدروژن سولفید محلول در آب تولیدی باشد، زیرا این گازها باعث تغییرات pH با فشار و دما می‌شوند. [۱۲].

آسیب سازند در اثر تزریق مجدد آب تولیدی

آسیب سازند به‌عنوان تغییرات عملکرد چاه از نظر تزریق/ بهره‌وری تعریف می‌شود که بر ویژگی‌های سازند مخزن در ناحیه اطراف چاه تأثیر می‌گذارد [۱۳]. انواع سازوکارهای آسیب سازند در فرآیند تزریق آب بازتزریق به مخزن به‌شرح زیر است:

* آسیب مکانیکی

آسیب مکانیکی به‌صورت مسدودشدن منافذ در ناحیه نزدیک به چاه توسط مواد جامد معلق موجود در آب تزریق شده است. رسوب جامدات و شدت آسیب به غلظت جامدات معلق، گرانولومتری

پس از جداشدن از نفت، آب تولید شده یا به جریان آب‌های سطحی تخلیه می‌شود و یا از طریق چاه‌ها به زیرسطح تزریق می‌شود. باتوجه‌به ممنوعیت شدید قوانین، بیشتر چاه‌های دریایی ایالات متحده، آب تولید شده خود را برای دفع یا افزایش هیدروکربن، مجدداً به مخزن وارد می‌کنند [۸].

مشخصات آب تولیدی

به‌منظور بررسی سازوکارهای مختلف آسیب سازندی ضمن فرآیند بازتزریق آب تولیدی، می‌بایست با انواع خصوصیات آن آشنا گردید. به همین منظور تمامی مشخصات به‌شرح زیر جمع‌آوری شده است:

الف) ترکیبات نفتی محلول و پراکنده

نفت از هیدروکربن‌هایی مانند BTEX، نفتالین، فنانترن، دی بنزوتیوفن^۱، هیدروکربن‌های پلی آروماتیک^۲ و فنل‌ها تشکیل شده است [۹]. حلالیت نفت در آب تولیدی به پارامترهای مختلفی مانند نوع نفت، حجم آب تولیدی، شرایط ترمودینامیکی و سن تولید بستگی دارد. بیشتر هیدروکربن‌ها محلول در آب نیستند و بنابراین قطرات نفت در آب پراکنده شده و امولسیون نفت در آب تشکیل می‌دهد که این مقدار پراکندگی تحت تأثیر پارامترهای مختلفی مانند چگالی نفت و کشش سطحی آب - نفت قرار می‌گیرد [۱۰]. در این پژوهش تمرکز بر این نوع آلودگی است.

ب) مواد معدنی محلول

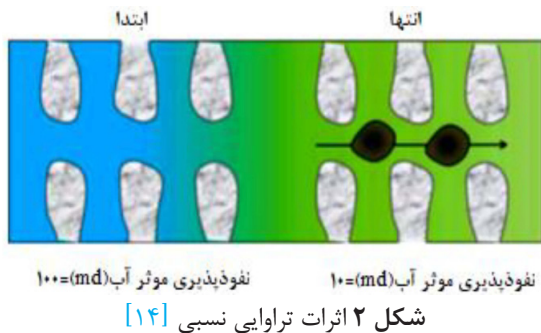
ترکیبات غیرآلی محلول در آب تولیدی شامل آنیون‌ها، کاتیون‌ها، فلزات سنگین و مواد رادیواکتیو است [۱۱]. کاتیون‌هایی مانند سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، باریوم، استرانسیوم و آهن و آنیون‌هایی مانند کلر، سولفات و کربنات، شیمی آب تولیدی را تشکیل می‌دهند. علاوه‌براین، ردپایی از فلزات سنگین، به‌عنوان مثال، کادمیوم، کروم، مس، و مواد رادیواکتیو طبیعی^۳ در آب تولیدی وجود دارد [۱۲].

1. NPD

2. PAHs

3. NORM

اشباع نفت در فضای منافذ مربوط می‌شود. شکل ۲ نشان می‌دهد که چگونه حضور نفت در آب در تزریق مجدد آب تولیدی، بر نفوذپذیری مؤثر آب و در نتیجه تزریق تأثیر می‌گذارد [۱۴].



همان‌گونه که اشاره شد آب تولیدی، حتی پس از تصفیه، حاوی ذرات جامد و قطرات نفت است که می‌توانند در صورت تزریق مجدد، محیط متخلخل را در ناحیه نزدیک چاه مسدود کرده و باعث آسیب سازند و کاهش غیرقابل قبول تزریق گردد. این دو آلاینده جایگاه ویژه در ایجاد مشکلات ناشی از بازتزریق آب های تولیدی دارند. پدیده‌های دیگر همچون ترش شدن مخزن ناشی از فعالیت میکروبی و خوردگی نیز در این موضوع درگیر اند اما بر خلاف انسداد جامدات و احتباس قطرات، می‌توان آنها را ارزیابی، کنترل و کاهش داد [۱۶-۱۸]. در این پژوهش به‌طور خاص آسیب سازند ناشی از حضور قطرات نفت همراه آب تولیدی بررسی شده است.

عوامل مؤثر بر احتباس قطرات نفت

هنگامی که قطرات نفت همراه آب تولیدی به درون محیط متخلخل تزریق می‌شوند احتمال به دام افتادن آنها و به اصطلاح احتباسشان وجود دارد. حفظ قطرات در محیط متخلخل فرآیند پیچیده‌ای است که به عوامل مختلفی بستگی دارد. شکل ۳ عوامل مؤثر بر احتباس قطره را نشان می‌دهد. در ادامه هریک از این عوامل توضیح داده شده است.

آنها، سرعت تزریق و توزیع اندازه منافذ سازند بستگی دارد. آزمایش‌های سیلاب‌زنی برای مطالعه روند اختلال به‌عنوان تابعی از غلظت جامدات معلق و نرخ تزریق انجام شده‌اند. نتیجه این که اختلال نفوذپذیری با غلظت جامدات معلق و سرعت تزریق آب، از آنجایی که تهاجم عمیق‌تر رخ می‌دهد، افزایش می‌یابد [۱۴].

* فعل و انفعالات آب تزریقی و سنگ و سیال سازند

برهم‌کنش بین آب تزریقی و سنگ سازند می‌تواند سبب مواردی همچون تورم خاک رس^۱، شکسته‌شدن تجمعات رس^۲، انحلال سازند، جذب شیمیایی و تغییرات ترشوندگی شود [۱۵]. برهم‌کنش آب تزریقی و سیال درجا سبب مواردی همچون رسوب واکس و آسفالتین، رسوب ذرات جامد (آسفالتین‌ها، هیدرات‌ها و سولفورها)، ایجاد رسوبات و لجن‌ها و تشکیل امولسیون می‌شود [۱۳]. تشکیل امولسیون سازوکار آسیب سازندی مورد نظر در این پژوهش است.

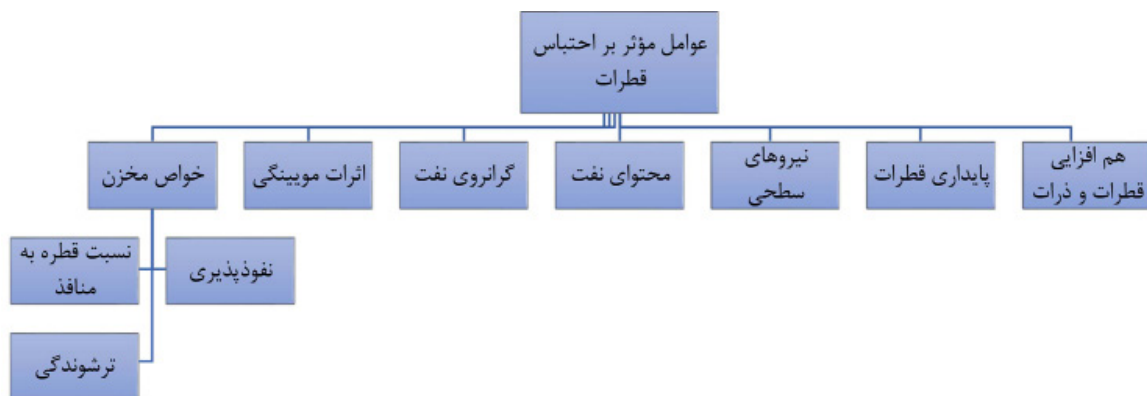
* اختلالات بیولوژیکی

آب تزریقی، صرف‌نظر از منبع آن، معمولاً حاوی عوامل باکتریایی است. مشکلات باکتریایی مرتبط با تزریق آب می‌تواند با رشد باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی مرتبط باشد. مشکلات مرتبط با رشد باکتری در چاه‌های تزریقی را می‌توان به پلاگ شدن، خوردگی و سمیت اشاره کرد [۱۵].

* اثرات نفوذپذیری نسبی ناشی از احتباس قطرات نفت

قطرات نفت معلق در جریان آب تزریق شده و حباب متعاقب آن منبع اصلی اختلال در تزریق بالقوه است. درجه ازدست‌دادن قابلیت تزریق بستگی به اشباع اولیه مایع در اطراف چاه تزریق دارد. در واقع، پروژه‌های تزریق/دفع آب ممکن است با آب تزریق شده به مناطق آبدۀ اشباع شده با ۱۰۰٪ آب (بدون اشباع نفت باقی‌مانده) و مناطق با اشباع نفت اجرا شود. اثر منفی نفت در آب بر تزریق آب به کاهش نفوذپذیری مؤثر آب به دلیل افزایش حضور

1. Clay Swelling
2. Clay Deflocculation



شکل ۳ عوامل مؤثر بر احتباس قطره نفت درون محیط متخلخل

خواص مخزن

اولین فاکتور مؤثر در این پدیده نسبت اندازه قطره به اندازه منافذ است که هرچه نسبت اندازه قطره به منافذ بزرگتر شود، تأثیر بارزتری بر روی کاهش نفوذپذیری دارد؛ زیرا قطرات بزرگتر از منافذ گلو نسبت به قطرات کوچکتر، احتمال بیشتری در انقباض منافذ را دارند [۸ و ۱۹]. مورد دیگر، نفوذپذیری سنگ است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که نمونه‌هایی با نفوذپذیری کمتر مستعد کاهش نفوذپذیری بیشتری هستند. بنابراین سازندهای با نفوذپذیری بالاتر برای تزریق مجدد مناسب‌تر هستند [۲۰]. ترشوندگی سنگ، مورفولوژی سیالات، بازیابی ثانویه و ثالثیه را تعیین می‌کند و ممکن است برای جریان امولسیون‌های نفت در آب بسیار مهم باشد. مطالعات شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ترشوندگی بر قطره‌ای که از انقباضات عبور می‌کند تأثیر می‌گذارد. در واقع با نزدیک شدن به نسبت اندازه قطره به منافذ، جذب قطرات، مستقل از ترشوندگی می‌شود و با سرعت جریان کنترل می‌شود [۱۲].

اثرات موینگی^۱

توانایی قطرات بزرگ برای غلبه بر نیروهای موینگی و عبور از یک انقباض^۲ را می‌توان با عدد مویرگی توصیف کرد. برای جریان در محیط متخلخل، عدد مویرگی نشان‌دهنده تعادل بین نیروهای ویسکوز و نیروهای مویرگی است [۱۲]. کوبوس و همکاران

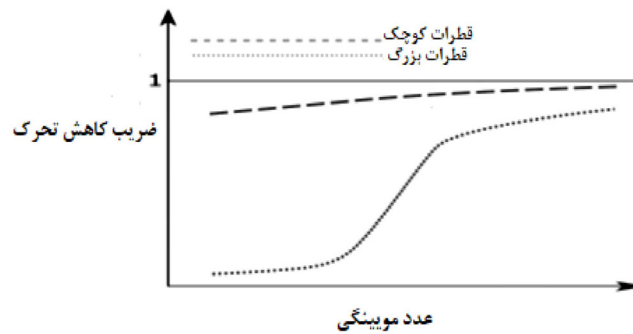
یک ضریب کاهش تحرک ارائه کرد که نسبت افت فشار جریان فاز پیوسته به جریان امولسیون در همان سرعت جریان است و به‌عنوان یک ضریب مقیاس است که تحرک مایع را هنگام عبور از گلوگاه منفذ توصیف می‌کند. با توجه به شکل ۴، وقتی قطرات به‌طور قابل توجهی کوچک‌تر از منافذ گلوگاه هستند، ضریب کاهش تحرک مستقل از عدد موینگی است و حدود ۱ است. اما زمانی که قطرات بزرگ‌تر از گلوگاه منافذ هستند، یک عدد موینگی بحرانی بیان می‌شود که ضریب کاهش تحرک به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد و کوچک‌تر از یک می‌شود. هنگامی که عدد موینگی بزرگ‌تر از مقدار بحرانی شود، ضریب کاهش تحرک به ۱ نزدیک می‌شود [۲۱]. پارامتر دیگری که باید در نظر گرفت کشش سطحی است. یو و همکاران نشان دادند که کشش سطحی بالاتر منجر به کاهش شدیدتر نفوذپذیری می‌شود [۸].

گرانروی نفت

نیروی اصطکاک از گرانروی فاز پراکنده و پیوسته ناشی می‌شود. مقاومت اصطکاکی در گلوگاه منفذی به گرانروی نفت، سرعت جریان، اندازه قطرات و هندسه گلوگاه بستگی دارد. هنگامی که یک قطره از یک انقباض عبور می‌کند، مقاومت اصطکاکی در تماس بین قطره و دیواره رخ می‌دهد.

1. Capillary Effects

2. Constriction



شکل ۴ طرح واره ضرب کاهش تحرک به‌عنوان تابعی از عدد موینگی

انتشار همرفت، با افزایش پکلت، راندمان جذب کاهش یافت تا زمانی که یک عدد پکلت بحرانی به‌دست آمد. هنگامی که پکلت بزرگ‌تر از پکلت بحرانی شد، رژیم هیدرودینامیکی وارد عمل شد و راندمان جذب با پکلت افزایش یافت؛ زیرا نیروهای هیدرودینامیکی بر سد انرژی غلبه کرده و قطرات را به حداقل اولیه می‌رسانند. در عدد پکلت بالا (سرعت بالا)، نیروهای هیدرودینامیکی به‌اندازه‌ای زیاد هستند که احتمال رسوب برابر با یک بود [۲۳].

پایداری قطرات

اجزای فعال سطحی موجود در نفت خام همچون آسفالتین‌ها، لایه‌های سطحی را تشکیل می‌دهند که باعث افزایش پایداری قطرات در برابر ادغام می‌شوند. هنگامی که قطرات به یکدیگر نزدیک می‌شوند، اجزای فعال سطحی می‌توانند مانع فضایی ایجاد کنند و مانع ادغام می‌شوند. علاوه‌براین، اثرات فضایی می‌تواند بر چسبیدن قطرات به دیواره‌های منافذ تأثیر بگذارد. ادغام قطرات نشان می‌دهد که نسبت قطر به منافذ به‌طور پویا در طول تزریق مجدد تغییر می‌کند. افزایش نسبت قطر به‌اندازه منافذ، تحرک قطرات را کاهش می‌دهد و باعث کاهش چشمگیر تزریق می‌شود [۱۲].

با افزایش گرانیوی نفت، عبور یک قطره از گلوی منافذ دشوارتر می‌شود. مقاومت اصطکاکی در یک جسم منفذی، به گرانیوی امولسیون بستگی دارد [۱۲]. چن و همکاران استدلال می‌کنند که مسیر جریان امولسیون یکی دیگر از توضیحات احتمالی برای افزایش غیرمتناسب مقاومت اصطکاکی است. عبور قطرات نفت با گرانیوی بالاتر از منافذ باریک دشوار است؛ بنابراین، جریان امولسیون به منافذ بزرگتر هدایت می‌شود. آن‌ها گزارش دادند که اثر گرانیوی به‌طور قابل توجهی بر کاهش نفوذپذیری تأثیر می‌گذارد [۲۰].

محتوای نفت

غلظت نفت بالاتر منجر به کاهش نفوذپذیری بارزتر می‌شود؛ زیرا قطرات بیشتری برای به دام افتادن وجود دارد [۱۲]. میزان تأثیر کمی این اثر به پارامترهای مختلفی بستگی دارد و تاکنون در سابقه تحقیق نتایج عددی جامعی ارائه نشده است.

نیروهای سطحی

نیروهای سطحی نقش مهمی در رهگیری قطرات در طول جریان در محیط متخلخل دارند. کارایی جذب سطحی قطرات به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر سرعت جریان و قدرت یونی است. روسو و همکاران جذب سطح را برحسب عدد پکلت بدون بعد توصیف کردند که نسبت اثرات همرفتی به انتشار است. آن‌ها استدلال کردند که بسته به عدد پکلت، سه رژیم جذب سطحی می‌تواند وجود داشته باشد: همرفت - انتشار^۱، هیدرودینامیک^۲ و رهگیری^۳ [۲۲]. در رژیم

1. Convection-Diffusion
2. Hydrodynamic
3. Interception

هم‌افزایی قطرات نفت و ذرات جامد

ذرات جامد با ایجاد کیک فیلتر داخلی یا خارجی، سازند را مسدود می‌کنند. در طول زمان اولیه تزریق، ذرات معلق کیک فیلتر داخلی را تشکیل می‌دهند و نفوذپذیری را کاهش می‌دهند. پس از مدتی، تنها چند ذره می‌توانند وارد منطقه فیلتراسیون داخلی شوند و کیک فیلتر خارجی روی سطح چاه شروع به ساختن کنند. ساخت کیک فیلتر خارجی به‌طور قابل توجهی میزان تزریق را کاهش می‌دهد. وسعت انسداد توسط نسبت اندازه ذره به منافذ، بار سطحی و نرخ تزریق کنترل می‌شود [۱۲]. همان‌طور که بیان شد آب تولیدی شامل آلاینده‌ها و ترکیبات نفتی پراکنده است. در صورت تزریق مجدد این آب امکان فعال شدن آسیب‌های سازندی همچون اثرات نفوذپذیری نسبی و فعل‌وانفعالات آب تزریقی و سیال درجا هست. میزان قطرات و محتوای نفت همراه و اندازه آنها نیز از جمله عواملی هستند که سبب تغییر در میزان احتباس قطرات نفت می‌شوند. در این پژوهش به‌منظور بررسی انسداد منافذ توسط قطرات نفت موجود در امولسیون نفت در آب، از میکرومدل ناهمگن استفاده گردید. براین اساس تجزیه و تحلیل‌های کمی و کیفی مبتنی بر تصویر به‌منظور پیگیری احتباس قطرات بر روی حجم منافذ تزریق شده انجام شد. در مرحله اول تأثیر غلظت بر اندازه قطرات نفت توسط روش مشاهده‌ای

میکروسکوپی بررسی شد، سپس با تغییر غلظت فاز پراکنده (نفت) در امولسیون نفت در آب به بررسی تأثیر غلظت نفت بر میزان آسیب و کاهش تزریق پرداخته شده است.

مواد و روش کار

تهیه امولسیون نفت در آب (آب تولیدی سنتزی)

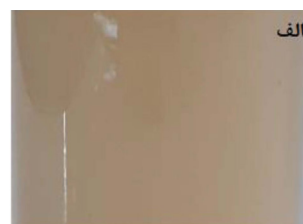
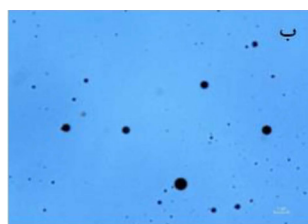
به‌منظور ساخت امولسیون نفت در آب که بیانگر نمونه مصنوعی آب تولیدی است، از دستگاه همزن آزمایشگاهی با دور rpm ۱۰۰۰۰ استفاده شد. بدین ترتیب که در ابتدا آب مقطر و نمک کلرید سدیم مخلوط می‌شوند، سپس نفت در غلظت‌های مختلف به آب نمک اضافه می‌شود. واحد غلظت نفت براساس تعداد قطره است که توسط سرنگ مشخص به آب اضافه می‌شود. تعداد قطرات برحسب گرم نیز محاسبه شده‌اند. در این پژوهش از نفت یکی از مخازن جنوب غرب ایران که ویژگی‌های آن در جدول ۱ آورده شده استفاده شده است. شکل ۵ تصویر میکروسکوپی قطرات نفت در امولسیون است که نشان از نوع چندپراکنده بودن^۱ امولسیون است.

بررسی میکروسکوپی

به‌منظور بررسی تأثیر غلظت نفت بر اندازه قطرات نفت حاضر در امولسیون نفت در آب، با کمک سرنگ از امولسیون نمونه‌برداری شد و توسط میکروسکوپ تصویربرداری شد.

جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و SARA نفت مورد استفاده در آزمایش‌ها

| API | چگالی (g/cm ³) | ویسکوزیته در دمای ۲۵ °C (cp) | ویسکوزیته در دمای ۶۰ °C (cp) | آسفالتین (%) | رزین (%) | آروماتیک (%) | اشباع (%) |
|------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------|----------|--------------|-----------|
| ۲۰/۳ | ۰/۹۳۲۱ | ۱۴۰ | ۲۳ | ۸ | ۶ | ۳۸/۵ | ۴۷/۵ |



شکل ۵ الف) تصویر امولسیون نفت در آب (ب) عکس میکروسکوپی از امولسیون

پوشانده می‌شوند. همچنین به‌منظور بررسی تأثیر میزان غلظت نفت بر کاهش تزریق‌پذیری محیط متخلخل، امولسیون در غلظت‌های نفت مختلف ساخته شده و توسط پمپ سرنگی در حجم تزریق ثابت ۰/۲۱ mL و در نرخ جریان ۱۰ mL/h (براساس محاسبات متداول تزریق‌پذیری به چاه‌های میدان مورد نظر) به میکرومدل تزریق گردید. در دو مرحله حجم تزریق ۷ PV و ۳۵ PV، که بیانگر زمان میانی و انتهای فرآیند تزریق است، توسط دوربین از میکرومدل عکس‌برداری شد و سپس تخلخل اشغال شده ناشی از احتباس قطرات توسط نرم‌افزار Im-agez محاسبه گردید. شکل ۷ طرح واره مجموعه آزمایشگاهی مربوط به آزمایش‌های میکرومدل را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

آزمایش‌های میکروسکوپی

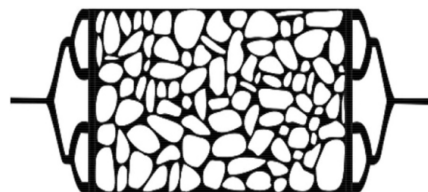
در ابتدا و به‌منظور تعیین اندازه قطرات نفت در امولسیون، بررسی کمی مشاهده‌ای توسط میکروسکوپ انجام شد. شکل ۸ نمودار توزیع اندازه قطرات نفت در امولسیون را در سه غلظت مختلف حضور نفت (۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ قطره) نشان می‌دهد.

جدول ۲ مشخصات میکرومدل

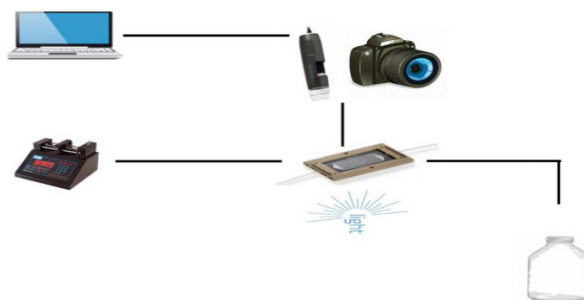
| طول (cm) | عرض (cm) | تخلخل | حجم فضای خالی (mL) |
|----------|----------|-------|--------------------|
| ۱۰ | ۴ | ۰/۲۶۷ | ۰/۲۱ |

در ادامه تصاویر گرفته شده با نرم‌افزار Imagej آنالیز شدند. به این صورت که پس از سیاه و سفید کردن عکس‌ها، انتخاب مقیاس متناسب با لنز میکروسکوپ و سپس انتخاب عدد گردش‌دگی مناسب، قطرات نفت در عکس شناسایی شده و اندازه آن‌ها به‌دست می‌آید. براساس آنالیز آب تولیدی در مناطق مختلف، سدیم و کلرید به‌عنوان فراوان‌ترین یون‌های نمک موجود در آب تولیدی هستند؛ لذا در ساخت آب تولیدی سنتزی از نمک سدیم کلرید استفاده شد و تأثیر این نمک بر میزان اندازه قطرات نفت نیز بررسی شده است. **آزمایش‌های میکرومدل**

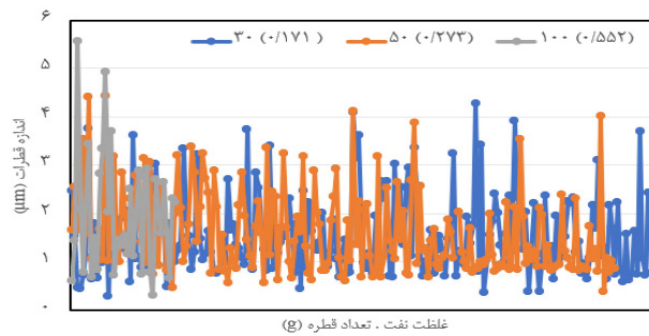
به‌منظور بررسی میزان آسیب‌سازند ناشی از تزریق نمونه آب تولیدی و احتباس قطرات نفت، از میکرومدل ناهمگن استفاده شد. شکل ۶ و جدول ۲ به‌ترتیب الگوی ناهمگن میکرومدل و مشخصات آن را نشان می‌دهد. به‌منظور ساخت میکرومدل، ابتدا طرح آن توسط نرم‌افزار Coreldraw طراحی و سپس توسط لیزر طرح بر روی شیشه حک شد. در ادامه بعد از مراحل اسیدشویی و آب‌شویی، توسط کوره سطح شیشه حکاکی شده با شیشه دیگری



شکل ۶ الگوی میکرومدل ناهمگن مورد استفاده در این پژوهش



شکل ۷ طرح واره آزمایشات میکرومدل به‌منظور بررسی آسیب‌سازند ناشی از تزریق آب تولیدی حاوی قطرات نفت



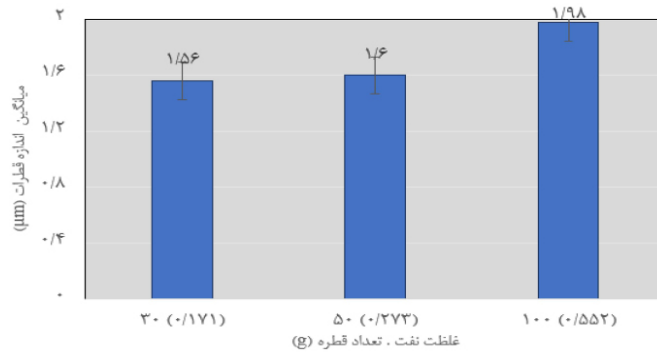
شکل ۸ توزیع اندازه قطرات نفت در امولسیون برای غلظت‌های مختلف حضور نفت

بیشتر قطرات نفت در میکرومدل، تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت کاهش می‌یابد به طوری که میزان تخلخل اشغال شده نهایی برای امولسیون در غلظت ۷۰ و ۱۵۰ قطره نفت، در مرحله تزریق PV ۳۵ به ترتیب ۰/۲۴۴ و ۰/۱۷۱ است که کاهش ۸٪ را نشان می‌دهد. همچنین با افزایش میزان حجم تزریق، تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت کاهش می‌یابد به طوری که میزان تخلخل اشغال شده نهایی برای امولسیون در غلظت ۱۵۰ قطره نفت، در مرحله تزریق PV ۷ و PV ۳۵ به ترتیب ۰/۲۳۴ و ۰/۱۷۱ است که کاهش ۷٪ را نشان می‌دهد. شکل ۱۳ نسبت تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت به تخلخل اولیه را در دو غلظت ۷۰ و ۱۵۰ قطره نفت در مراحل تزریق PV ۷ و PV ۳۵ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش غلظت نفت، این نسبت کاهش یافته، به طوری که در دو غلظت ۷۰ و ۱۵۰ قطره نفت و در مرحله تزریق PV ۳۵ به ترتیب به ۰/۹۱۴ و ۰/۶۴۲ رسیده است (کاهش ۳۰٪ حجم فضای خالی). به‌طور کلی کاهش تخلخل محیط متخلخل با کاهش تراوایی همراه بوده که به‌عنوان افزایش میزان آسیب سازند محسوب می‌گردد. از سوی دیگر با افزایش میزان حجم تزریق، نسبت تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت به تخلخل اولیه کاهش می‌یابد. همان‌گونه که مشخص است این نسبت برای امولسیون با حضور ۱۵۰ قطره نفت، در مرحله تزریق PV ۷ و PV ۳۵ به ترتیب ۰/۸۷۵ و ۰/۶۴۲ است که کاهش ۲۳٪ را نشان می‌دهد.

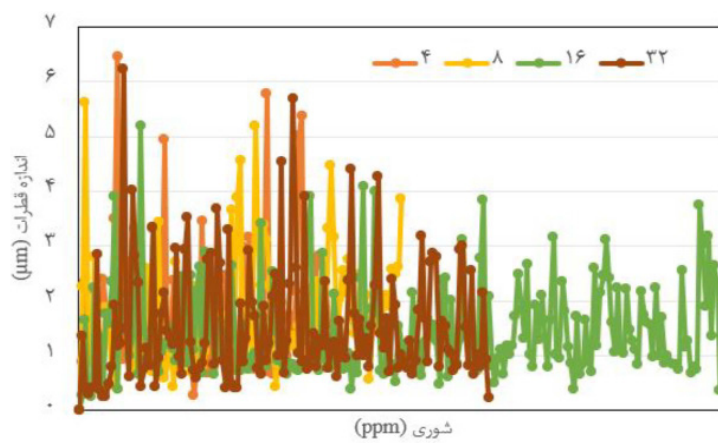
همچنین شکل ۹ نمودار مقایسه‌ای میانگین اندازه قطرات نفت در این سه حالت را بیان می‌کند. همان‌گونه که مشخص است با افزایش غلظت نفت در امولسیون، اندازه قطرات نفت افزایش می‌یابد. میزان افزایش میانگین اندازه قطره برای امولسیون با غلظت‌های نفت متفاوت ۳۰ و ۱۰۰ قطره، به ترتیب $1/56 \mu\text{m}$ و $1/98 \mu\text{m}$ است که افزایش ۲۷٪ را نشان می‌دهد. براساس پژوهش‌های پیشین، افزایش اندازه قطرات نفت با افزایش غلظت نفت، معمول است. شکل ۱۰ نمودار توزیع اندازه قطرات نفت در امولسیون در شوری‌های مختلف نمک سدیم کلرید و شکل ۱۱ مقادیر میانگین قطرات نفت در امولسیون را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش شوری، اندازه قطره نفت در امولسیون ابتدا افزایش، سپس کاهش می‌یابد. به طوری که میانگین اندازه قطره نفت از $1/77 \mu\text{m}$ برای امولسیون با شوری ۴ ppm به $1/81 \mu\text{m}$ در شوری ۸ ppm و در نهایت به $1/57 \mu\text{m}$ در شوری ۳۲ ppm می‌رسد که کاهش ۱۳٪ دارد.

آزمایش‌های میکرومدل

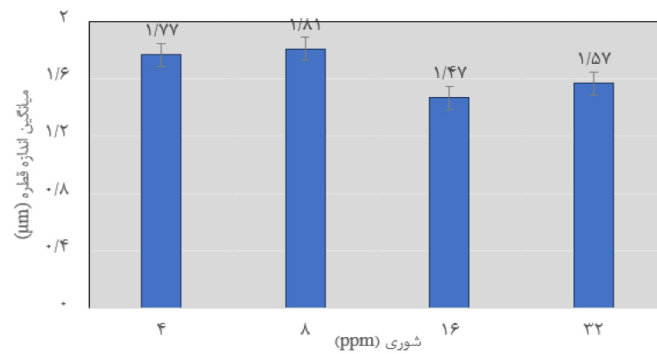
در گام دوم به‌منظور تعیین میزان آسیب محیط متخلخل ناشی از احتباس قطرات نفت و یافتن سازوکار گیرافتادگی، آزمایش‌های میکرومدل برنامه‌ریزی گردید. شکل ۱۲ نمودار تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت در دو غلظت ۷۰ و ۱۵۰ قطره نفت است. مشخص است با افزایش غلظت نفت و میزان حجم تزریق، به دلیل تزریق و احتباس



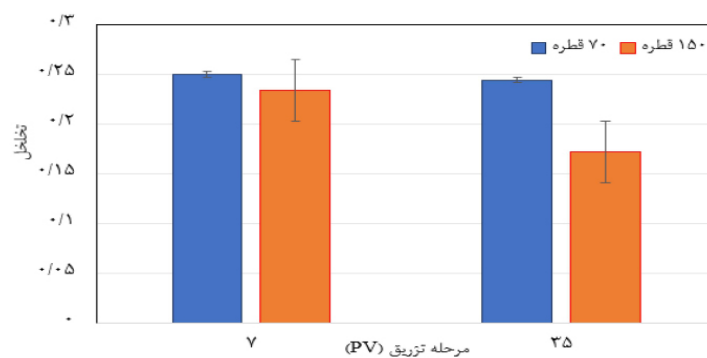
شکل ۹ میانگین قطرات نفت در امولسیون برای غلظت‌های مختلف حضور نفت



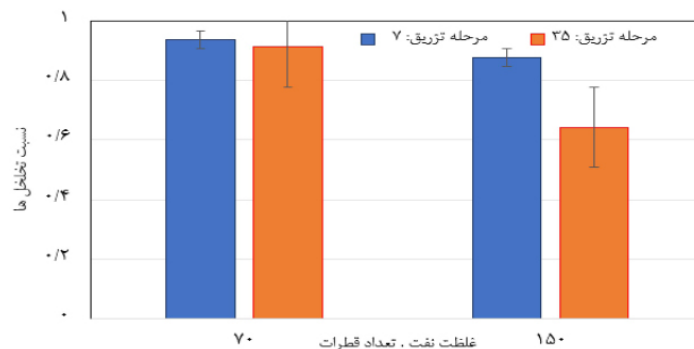
شکل ۱۰ توزیع اندازه قطرات نفت در امولسیون در شوری‌های مختلف نمک سدیم کلرید



شکل ۱۱ میانگین قطرات نفت در امولسیون در شوری‌های مختلف نمک سدیم کلرید



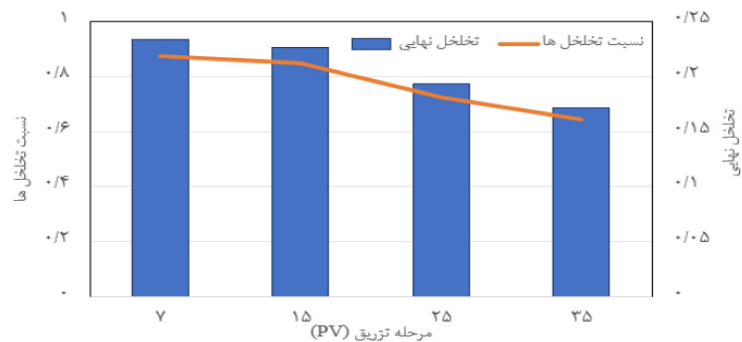
شکل ۱۲ تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت در دو غلظت متفاوت حضور نفت



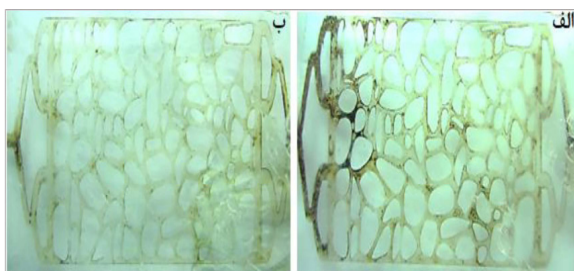
شکل ۱۳ نسبت تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت به تخلخل اولیه در دو غلظت متفاوت حضور نفت

در مرحله PV ۳۵ به ۰/۱۷ می‌رسد. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تصاویر میکرومدل را در حجم‌های تزریق PV ۷ و PV ۳۵ در دو آزمایش مختلف با دو غلظت ۷۰ و ۱۵۰ قطره نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، با افزایش غلظت، میزان آسیب و گرفتگی افزایش پیدا می‌کند. همچنین براساس شکل ۱۶-الف، در غلظت بالاتر نفت، به دلیل بسته شدن منافذ در قسمت‌های میانی و انتهای میکرومدل در حجم تزریق PV ۳۵، قطرات نفت بیشتر در قسمت ابتدایی میکرومدل قرار گرفته و با تجمع شان سبب بسته شدن منافذ می‌شوند.

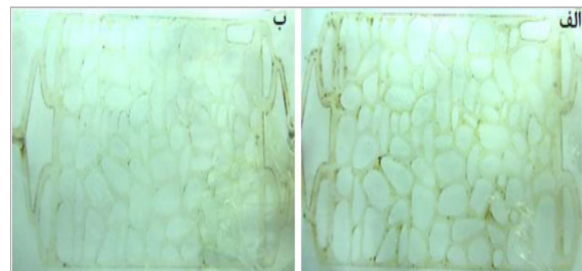
به‌منظور بررسی تأثیر حجم تزریق، نتایج تأثیر کاهش تخلخل ناشی از احتباس قطرات نفت در ۴ حجم مختلف اندازه‌گیری شد. شکل ۱۴ نمودار تخلخل ثانویه و نسبت تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت به تخلخل اولیه را در آزمایش تزریق آب تولیدی با غلظت ۱۵۰ قطره نفت در چهار حجم مختلف تزریق نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش مراحل تزریق، میزان تخلخل کاهش می‌یابد. به طوری که تخلخل ثانویه در مرحله تزریق PV ۷، ۰/۲۳ و در PV ۱۵ به ۰/۲۲ می‌رسد و کاهش بسیار کمی را نشان می‌دهد اما در انتهای تزریق و



شکل ۱۴ تخلخل ثانویه و نسبت تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت به تخلخل اولیه برای امولسیون با غلظت نفت ۱۵۰ قطره در چهار حجم مختلف تزریق



شکل ۱۶ تصاویر میکرومدل پس از تزریق امولسیون در مرحله تزریق PV ۳۵ در دو غلظت نفت الف) ۱۵۰ قطره ب) ۷۰ قطره



شکل ۱۵ تصاویر میکرومدل پس از تزریق امولسیون در مرحله تزریق PV ۷ در دو غلظت نفت الف) ۱۵۰ قطره ب) ۷۰ قطره

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به موضوع آسیب‌سازند در اثر تزریق آب تولیدی به محیط متخلخل در اثر احتباس قطرات نفت حاضر در آن پرداخته شده است. در این راستا بررسی میکروسکوپی و آزمایش میکرومدل انجام شده و نتایج به شرح زیر به بدست آمد:

- براساس مشاهدات میکروسکوپی، افزایش غلظت نفت سبب افزایش اندازه قطرات نفت در امولسیون می‌شود. به صورت نمونه با افزایش غلظت نفت از ۳۰ قطره به ۱۰۰ قطره، میزان اندازه قطرات ۲۷٪ افزایش یافته و اندازه قطره به $1/98 \mu\text{m}$ می‌رسد.
- افزایش شوری آب تولیدی ابتدا سبب افزایش اندازه قطرات نفت در امولسیون و سپس کاهش آن می‌شود. میزان اندازه قطره نفت در امولسیون از $1/77 \mu\text{m}$ برای امولسیون با شوری ۴ ppm به $1/81 \mu\text{m}$ در شوری ۳۲ ppm و در نهایت به $1/57 \mu\text{m}$ در شوری ۳۲ ppm می‌رسد که کاهش ۱۳٪ را نتیجه می‌دهد.

- براساس نتایج آزمایش‌های میکروسکوپی، هرچه غلظت نفت (فاز پراکنده) بیشتر بوده متعاقباً اندازه قطرات نفت هم بزرگتر شده و با توجه به مشاهدات در حین ساخت امولسیون، حجم بیشتری از نفت نیز از امولسیون جدا می‌شود (امولسیون ناپایدارتر)
- آزمایش‌های میکرومدل نشان داد، افزایش غلظت نفت در امولسیون، سبب به دام افتادن بیشتر قطرات نفت در میکرومدل شده که کاهش تخلخل و متعاقباً افزایش آسیب‌سازند را به همراه دارد. به صورت نمونه با افزایش غلظت نفت از ۷۰ به ۱۵۰ قطره، در حجم تزریق ۳۵ PV، میزان تخلخل اشغال شده

مراجع

- [1]. Eytayo, S. I., Watson, M. C., & Kolawole, O. (2023). Produced Water Management and Utilization: Challenges and Future Directions. *SPE Production & Operations*, 38(03), 367-382.
- [2]. Al-Ghouti, M. A., Al-Kaabi, M. A., Ashfaq, M. Y., & Da'na, D. A. (2019). Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 222-239. doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.001.
- [3]. Gray, M. (2020, July). Reuse of produced water in the oil and gas industry. In *SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability?* (p. D021S004R001). doi.org/10.2118/199498-MS.
- [4]. Bader, M. S. H. (2007). Seawater versus produced water in oil-fields water injection operations. *Desalination*, 208(1-3), 159-168, doi: https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.05.024.

نهایی ۸٪ کاهش یافته و به ۰/۱۷۱ می‌رسد و نسبت تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت به تخلخل اولیه ۳۰٪ کاهش یافته و به ۰/۶۴۲ می‌رسد.

- با افزایش میزان حجم تزریق، میزان تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت و نسبت تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت به تخلخل اولیه کاهش می‌یابد بطوریکه برای امولسیون با غلظت ۱۵۰ قطره نفت، در حجم تزریق ۷ PV و ۳۵ PV، تخلخل اشغال شده نهایی از ۰/۲۳۴ به ۰/۱۷۱ می‌رسد و نسبت تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت به تخلخل اولیه، در حجم تزریق ۷ PV از ۰/۸۷۵ به ۰/۶۴۲ در حجم تزریق ۳۵ PV می‌رسد.
- کاهش تخلخل اشغال شده نهایی و نسبت تخلخل اشغال شده نهایی توسط قطرات نفت به تخلخل اولیه، نشان دهنده کاهش نسبت تراوایی و افزایش آسیب‌سازند است.
- در غلظت بالاتر به دلیل بسته‌شدن منافذ در قسمت‌های میانی و انتهای میکرومدل در انتهای تزریق ۳۵ PV، قطرات نفت داخل امولسیون بیشتر در قسمت ابتدایی میکرومدل قرار گرفته و با تجمعشان سبب بسته‌شدن منافذ می‌شوند. در نهایت افزایش غلظت نفت در امولسیون نفت در آب، سبب افزایش اندازه قطرات نفت می‌شود که به دنبال آن میزان آسیب محیط متخلخل نیز هم‌زمان با حجم تزریق بیشتر، افزایش می‌یابد. یافته‌های این تحقیق، به صورت کمی، اهمیت حذف آلاینده قطرات نفت همراه با آب تولیدی (قبل از تزریق شان به چاه‌ها) را در جهت جلوگیری از کاهش تزریق‌پذیری نشان می‌دهد.

- [5]. Liu, Y., Lu, H., Li, Y., Xu, H., Pan, Z., Dai, P., Wang, H. and Yang, Q. (2021). A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields. *Science of the Total Environment*, 775, 145485. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145485.
- [6]. Veil, J. A. (2011). Produced water management options and technologies. In *Produced water: environmental risks and advances in mitigation technologies*, 537-571. New York, NY: Springer New York.
- [7]. Kaby, A., Yang, M., Abbassi, R., & Li, S. (2020). A risk-based approach to produced water management in offshore oil and gas operations. *Process safety and Environmental protection*, 139, 341-361, doi: org/10.1016/j.psep.2020.04.021.
- [8]. Yu, L., Sang, Q., Dong, M., & Yuan, Y. (2017). Effects of interfacial tension and droplet size on the plugging performance of oil-in-water emulsions in porous media. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(32), 9237-9246, doi: 10.1021/acs.iecr.7b01770.
- [9]. Jiménez, S. M., Micó, M. M., Arnaldos, M., Medina, F., & Contreras, S. (2018). State of the art of produced water treatment. *Chemosphere*, 192, 186-208. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.139.
- [10]. Ghafoori, S., Omar, M., Koutahzadeh, N., Zendejboudi, S., Malhas, R. N., Mohamed, M., ... & Mehrvar, M. (2022). New advancements, challenges, and future needs on treatment of oilfield produced water: A state-of-the-art review. *Separation and Purification Technology*, 289, 120652, doi: 10.1016/j.seppur.2022.120652.
- [11]. Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L. C., Biak, D. R. A., Madaeni, S. S., & Abidin, Z. Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2-3), 530-551. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.044.
- [12]. Azizov, I., Dudek, M., & Øye, G. (2021). Emulsions in porous media from the perspective of produced water re-injection—A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 206, 109057. doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109057.
- [۱۳]. فراهانی، عباسی، تشکیل رسوب و آسیب دیدگی سازند در فرآیند تزریق آب به مخازن نفتی، چاپ دوم، چاپ شده توسط انتشارات پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۹۶، ۱-۱۸۳، شابک ۱۳ رقمی: ۹۷۸۶۰۰۵۹۶۱۱۴۰.
- [14]. Rossini, S., Roppoli, G., Mariotti, P., Renna, S., Manotti, M., Viareggio, A., & Biassoni, L. (2020). Produced water Quality impact on injection performance: predicting injectivity decline for waterflood design. In *International Petroleum Technology Conference* (p. D031S083R001). IPTC.
- [15]. Bennion, D. B., Bennion, D. W., Thomas, F. B., & Bietz, R. F. (1998). Injection water quality—a key factor to successful waterflooding. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 37(06). doi.org/10.2118/98-06-06.
- [16]. Evans, R. C. (1994). Developments in environmental protection related to produced water treatments and disposal (produced water re-injection). In *SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability?* (pp. SPE-27179). doi.org/10.2118/27179-MS.
- [17]. Sharma, M. M., Pang, S., Wennberg, K. E., & Morgenthaler, L. (1997, June). Injectivity decline in water injection wells: An offshore Gulf of Mexico case study. In *SPE European Formation Damage Conference and Exhibition* (pp. SPE-38180). doi.org/10.2118/38180-MS.
- [18]. Zuluaga, E., Evans, P., Nesom, P., Spratt, T., & Daniels, E. (2011). Technical Evaluations to Support the Decision to Reinject Produced Water. *SPE Production & Operations*, 26(02), 128-139. doi.org/10.2118/132346-PA.
- [19]. McAuliffe, C. D. (1973). Oil-in-water emulsions and their flow properties in porous media. *Journal of petroleum technology*, 25(06), 727-733, doi: 10.2118/4369-pa.
- [20]. Chen, Z., Dong, M., Husein, M., & Bryant, S. (2018). Effects of oil viscosity on the plugging performance of oil-in-water emulsion in porous media. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(21), 7301-7309, doi: 10.1021/acs.iecr.8b00889.
- [21]. Cobos, S., Carvalho, M. S., & Alvarado, V. (2009). Flow of oil–water emulsions through a constricted capillary. *International Journal of Multiphase Flow*, 35(6), 507-515, doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.02.018.
- [22]. Rousseau, D., Hadi, L. and Nabzar, L., (2007). May. PWRI-induced injectivity decline: new insights on in-depth particle deposition mechanisms. In *SPE European Formation Damage Conference and Exhibition* (pp. SPE-107666). doi.org/10.2118/107666-MS.
- [23]. Rousseau, D., Hadi, L., & Nabzar, L. (2008). Injectivity decline from produced-water reinjection: new insights on in-depth particle-deposition mechanisms. *SPE Production & Operations*, 23(04), 525-531. doi.org/10.2118/107666-PA..