

مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی اثر دبی تزریق نفت بر پدیده نشست آسفالتین در مغزه کربناته

پژوهش نفت

سال بیست و سوم
شماره ۷۴
صفحه، ۳۵-۴۸
۱۳۹۲
تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۱/۲۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۶/۲۱

ترانه جعفری بهبهانی^۱، عباس شهرآبادی^{۱*}، سیروس قطبی^۲ و وحید تقی‌خانی^۲

۱- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده پالایش نفت

۲- دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی

sharabadia@ripi.ir

چکیده

آسفالتین سنگین‌ترین جزء نفت خام می‌باشد که در حالت عادی در آن به صورت پایدار حل شده و در صورت تغییر شرایط ترمودینامیکی و هیدرودینامیکی، از نفت جدا می‌شود و در مخزن، نزدیکی دهانه چاه، ستون چاه، خطوط لوله انتقال نفت و یا تسهیلات سطح‌الارضی رسوب می‌کند. تاکنون کارهای فراوانی بر روی شناخت ساختار، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آسفالتین انجام شده است. اما در بحث رفتار هیدرودینامیکی و مکانیزم ته نشین شدن آسفالتین در محیط متخلخل کارهای اندکی انجام شده است. هدف از انجام این کار تحقیقاتی، بررسی اثر دبی تزریق بر فرآیند ته‌نشین شدن آسفالتین در محیط متخلخل و مدل‌سازی پارامترهای پدیده نشست آسفالتین می‌باشد. بدین منظور فرآیند سیلاب‌زنی نفت در درون مغزه کربناته طبیعی در دبی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که پدیده نشست آسفالتین در شدت جریان کم در دو مرحله روی می‌دهد. در مرحله اول با افزایش میزان تزریق، کاهش تراوایی ناشی از نشست آسفالتین افزایش می‌یابد. سپس تراوایی تقریباً ثابت می‌شود که این امر بیان‌گر برابری میزان نشست آسفالتین

و میزان برداشته شدن از روی سطح متخلخل می‌باشد. همچنین نتایج در دبی بالاتر نشان می‌دهد که در ابتدا تراوایی کاهش یافته و به یک مقدار کمینه می‌رسد. پس از آن تراوایی در اثر مکانیزم همراه بردگی بهبود یافته و سپس ثابت می‌شود. جهت تجزیه و تحلیل اثرات پارامترهای مختلف، مکانیزم‌های پدیده نشست آسفالتین مانند مکانیزم نشست سطحی و همراه بردگی و آنالیز حساسیت در مدل هیدرودینامیکی انجام شد. آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که با افزایش ضریب مکانیزم نشست سطحی و گرفتگی مکانیکی، تراوایی سنگ کم و با افزایش ضریب مکانیزم همراه بردگی تراوایی سنگ مخزن افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: نشست آسفالتین، دبی تزریق، محیط متخلخل، کاهش تراوایی، آسیب دیدگی سازند

مقدمه

در اصطلاح امروزی آسفالتین معرف ترکیبات غیر قابل حل در نرمال آلکان‌ها، ولی محلول در بنزن و تولوئن می‌باشد. آسفالتین‌ها توسط رزین‌هایی که بر روی سطح خود

ذغال سنگ در نرمال آلکان‌های با وزن ملکولی پایین که در حلال‌هایی نظیر تولوئن، بنزن، دی سولفید کربن قابل حل می‌باشد. ذرات تشکیل دهنده آن به صورت مواد جامد بی شکل، قهوه‌ای تیره و به صورت پودر غیر کریستالی می‌باشد. از نظر ساختمان، این ماده شامل عناصری مثل کربن، هیدروژن و هترو اتم‌هایی نظیر اکسیژن، گوگرد و نیتروژن است. همچنین آسفالتین شامل فلزات گروه انتقالی به خصوص نیکل، وانادیم و به مقدار کم آهن و مس می‌باشد و در نفت به صورت جمعی^۱ به فرم سوسپانسیون موجود است و توسط رزین‌ها احاطه شده و به صورت پایدار در آمده است. رابطه نزدیکی بین آسفالتین‌ها و رزین‌های نفت خام وجود دارد. ترکیب آسفالتین‌های به دست آمده توسط نرمال پنتان با ترکیب آسفالتین‌های به دست آمده توسط هپتان با هم متفاوت است. نسبت هیدروژن به کربن برای آسفالتین‌های به دست آمده توسط هپتان از همین نسبت برای آسفالتین‌های به دست آمده توسط نرمال پنتان کمتر است و این موضوع باعث پیشنهاد این نظریه می‌شود که درجه آروماتسیته آسفالتین‌های به دست آمده توسط هپتان، باید بالاتر باشد. آسفالتین‌های به دست آمده توسط هپتان شامل بخش‌های هتروالمان‌های بیشتری می‌باشد [۲].

پارامترهای مؤثر در تشکیل رسوب

مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در تشکیل رسوب آسفالتین عبارتند از:

نوع و غلظت ترکیبات

اگر میزان رزین موجود در نفت به اندازه‌ای نباشد که ذرات آسفالتین را به حالت تعلیق درآورد، به دلیل اینکه ذرات و رزین هر دو باردار با بارهای مخالف هستند، اگر قسمتی از سطح ذرات خالی از رزین باشد، یک عدم موازنه بار الکتریکی به وجود می‌آید. در نتیجه ذرات کوچک‌تر نفوذ کرده خود را به ذرات بزرگ‌تر رسانده و با اتصال آنها سبب رسوب ذرات آسفالتین می‌گردند. میزان آسفالتین نفت اهمیت کمتری از غلظت رزین در

جذب کرده‌اند، به صورت معلق در سوسپانسیون نگهداری می‌شوند. در واقع پدیده تعلیق و یا حلالیت ذرات آسفالتین در نفت خام را می‌توان به عنوان یک پدیده ترمودینامیکی تعادلی بیان نمود. هر عاملی که این تعادل را بر هم زند، می‌تواند حالت تعلیق را از بین برده و سبب بروز پدیده تجمع آسفالتین‌ها شود که در نهایت رسوب کردن آنها را به دنبال دارد. از جمله پارامترهایی که در رسوب آسفالتین مؤثر است، می‌توان به ترکیب درصد نفت، غلظت آسفالتین و رزین در نفت، دما و فشار، نوع حلال به کار گرفته شده و مشخصه‌های جریانی و هیدرودینامیکی اشاره نمود [۱].
به طور کلی بهره‌برداری از مخازن نفتی به سه شیوه انجام می‌گیرد: بهره‌برداری نوع اول، نوع دوم و نوع سوم.

عامل بهره‌برداری نوع اول فشار مخزن می‌باشد. با افزایش تولید و کاهش فشار از میزان نفت تولیدی کاسته می‌شود تا جایی که تولید غیر اقتصادی می‌گردد. بهره‌برداری از این طریق حداکثر تا حدود ۲۰٪ از نفت در جای مخزن را شامل می‌شود. البته عوامل دیگری در این میزان مؤثرند که از آن جمله می‌توان به نوع محیط متخلخل، تراوایی سنگ مخزن و دمای مخزن اشاره نمود. برای بالا بردن میزان بازیافت از شیوه بهره‌برداری نوع دوم استفاده می‌شود که در آن معمولاً با تزریق سیالاتی به درون مخزن سعی می‌شود تا فشار مخزن در حدی ثابت بماند که تولید همچنان ادامه داشته باشد. در بهره‌برداری نوع دوم و سوم معمولاً سیالات امتزاج‌ناپذیر و امتزاج‌پذیر به مخزن تزریق می‌شوند. در مواردی که از سیالات امتزاج‌پذیر استفاده می‌شود، تغییراتی در رفتار جریان، خواص تعادلی فازها و خواص سنگ مخزن ایجاد می‌شود که علی‌رغم بالا بردن میزان بهره‌برداری نفت سبب بروز مشکلاتی نظیر رسوب آسفالتین می‌شود. مشکل نشست آسفالتین هنگام تولید، یکی از مشکلات جدی برخی از میدان‌های تولید نفت است. زیرا این رسوب می‌تواند باعث مسدود شدن لایه تولیدی، ستون چاه و تسهیلات فرآورش و حتی تأسیسات پالایشگاهی گردد.

تعریف آسفالتین

آسفالتین عبارت است از بخش غیر قابل حل نفت خام یا

1. Aggregate State

اثر کاهش فشار رسوب می‌نماید. در درجه حرارت ثابت و نسبت حلال به نفت خام ثابت، افزایش فشار سبب کاهش رسوب می‌شود. فشار نقطه حباب نقش مهمی در تشکیل رسوب آسفالتین دارد. در فشار بالای نقطه حباب تغییری در ترکیب نفت خام به وجود نمی‌آید، اما حجم مولکولی مایع و پارامتر حلالیت در اثر فشار تغییر می‌کند [۶]. افزایش فشار سبب کاهش حجم مولکولی و افزایش پارامتر حلالیت می‌شود. در زیر نقطه حباب در اثر افزایش فشار مقدار بیشتری از گاز در نفت خام حل شده و سبب کاهش پارامتر حلالیت می‌شود. حداقل حلالیت آسفالتین در نفت خام در نقطه حباب اتفاق می‌افتد. این پدیده با حداکثر تشکیل رسوب آسفالتین همراه است.

خصوصیات حلال اضافه شونده

وقتی نسبت حلال به نفت خام کاهش می‌یابد و یا تعداد کربن حلال در یک نسبت خاص افزایش می‌یابد، توانایی قدرت حل‌کنندگی مؤثر حلال نیز افزایش می‌یابد. چرا که رزین‌های قطبی تا درجات مختلفی در تمام نرمال آلکان‌ها محلولند و وجود این رزین‌ها در مخلوط است که سبب تغییر در قدرت حلالیت می‌شود. هر مقدار رزین بیشتری در نرمال آلکان حل شود (که معادل با افزایش نسبت حلال است)، رسوب آسفالتین بیشتر می‌شود. بنابراین هر چه حلال رسوب‌دهنده سنگین‌تر باشد، میزان رسوب تشکیل شده کمتر خواهد بود. همچنین نقطه شروع انعقاد زودتر به وجود می‌آید و ذرات رسوب کرده جرم مولکولی سنگین‌تری خواهد داشت. به همین ترتیب هر چه حلال سبک‌تر باشد، نقطه شروع انعقاد در نسبت بالاتری از حجم حلال به حجم نفت خام اتفاق می‌افتد و جرم مولکولی ذرات آسفالتین رسوب کرده کمتر و میزان رسوب بیشتر خواهد شد [۷].

پتانسیل جریانی

در برخی نفت‌های خام با وجود اینکه میزان رزین به اندازه‌ای است که می‌تواند مقادیر کم آسفالتین موجود در آن را به حالت تعلیق در آورد، در عمل مشاهده می‌شود که حین

فرآیند لخته شدن^۱ دارد. به عبارت دیگر ممکن است نفتی درصد آسفالتین بالایی داشته باشد و در آن پدیده رسوب مشاهده نشود. به این دلیل مقدار رزین به میزانی بالاست که ذرات آسفالتین را در محلول معلق نگه می‌دارد و بر عکس در یک نفت سبک که میزان آسفالتین آن نسبتاً پایین است این پدیده اتفاق بیفتد [۳].

نسبت حلال به نفت و نوع حلال

به طور کلی در اثر افزایش حلال خاصی به نفت خام، رسوب آسفالتین ایجاد می‌گردد. هر اندازه نسبت حلال به نفت خام افزایش یابد، مقدار رسوب آسفالتین تشکیل شده افزایش می‌یابد. این افزایش تا یک حد بحرانی رسیده و پس از آن با افزایش حلال تغییری در مقدار آسفالتین حاصل نخواهد شد. به عنوان مثال هنگامی که گاز طبیعی و نفت خام در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، حلالیت گاز در نفت سبب کاهش حلالیت آسفالتین و احتمالاً رزین شده و سبب ریزش و رسوب آسفالتین می‌شود [۴].

دما

با افزایش دمای سیستم، رزین‌های زیادی حل می‌شوند. بنابراین نوعی عدم موازنه بار الکتریکی بین ذرات به وجود می‌آید که سبب رسوب بیشتر می‌شود. رسوب آسفالتین در دماهای پایین، کمتر ملاحظه می‌شود که پارامتر حلالیت نفت به مقدار آن در آسفالتین نزدیک‌تر است. به عبارت دیگر به دلیل اینکه برای مایعات، اثرات دمایی هم در انرژی داخلی تبخیر و هم در دانسیته مؤثر است، با کاهش دما در این خواص تغییر ایجاد می‌شود که نهایتاً منجر به افزایش پارامتر حلالیت نفت خام می‌شود. افزایش دما، علاوه بر عوامل فوق باعث افزایش حرکت مولکول‌های نفت یا به عبارتی حرکت براونی می‌شود که این عامل سبب افزایش احتمال برخورد ذرات به یکدیگر شده و امکان تجمع ذرات آسفالتین و بزرگ‌تر شدن ذرات و در نهایت احتمال رسوب را افزایش می‌دهد [۵].

فشار

تغییرات فشار نسبت به تغییرات دما شدیدتر است تا حدی که این فرآیندها به صورت ایزوترم بررسی می‌شوند. مواد آسفالتینی در تجهیزات سرچاهی و خطوط لوله در

آسفالتین رسوب کرده از فاز مایع به وسیله تئوری فلوری-هاگینز محاسبه می شود [۹].

مدل های تعلیق کلوئیدی آسفالتین

روشی دیگر برای مدل کردن رسوب آسفالتین بر اساس این فرض است که آسفالتین ها به صورت ذرات جامد معلق کلوئیدی در نفت خام حضور دارند و به وسیله رانش مولکول های رزین جذب شده پایدار می شوند. مدل ترمودینامیکی کلوئیدی را با توجه به پارامترهای مؤثر در پایداری سوسپانسیون کلوئیدی آسفالتین، می توان فرموله نمود [۱۰].

مدل های تشکیل مایسل های آسفالتین

در این مدل مولکول های آسفالتین به هم چسبیده و یک هسته مایسل تشکیل می دهند که به وسیله مولکول های رزین که در سطح هسته قرار می گیرند، به حالت پایدار می رسند. در این مدل غلظت آسفالتین با به کارگیری روش می نیم کردن انرژی آزاد گیبس فاز نفت خام و فاز رسوب کرده، تعیین می شود. نتایج حاصل از این مدل به خوبی با داده های آزمایشگاهی مطابقت دارد. مدل ارائه شده نیاز به یک سری پارامترهای مولکولی دارد که باید تخمین زده شوند [۱۱].

مدل های حالت جامد

این مدل ها رسوب آسفالتین را به عنوان یک فاز تنهای جامد در نظر می گیرند و فازهای مایع و گاز با استفاده از معادلات حالت مدل می شوند. مدل با فرض اینکه آسفالتین رسوب کرده به صورت یک فاز خالص باشد، برای حلالیت آسفالتین جامد در حلال ارائه گردیده است. سنگین ترین جزء در نفت می تواند به دو قسمت تقسیم شود: جزء رسوب کرده و جزء رسوب نکرده. جزء رسوب کرده به عنوان آسفالتین ها شناخته می شوند و مقدار آسفالتین رسوب کرده با مساوی قرار دادن فوگاسیته های جزء آسفالتین در فازهای مایع و جامد قابل محاسبه است. این مدل جهت استفاده بسیار ساده است، اما نیاز به یک سری داده های آزمایشگاهی برای مشخص کردن یکی از پارامترهای خود دارد همچنین نیازمند محاسبات فلاش سه فازی می باشد [۱۲].

جریان این نفت در کانال های انتقال، پدیده رسوب آسفالتین روی می دهد. علت این مشکل پتانسیل جریانی تولید شده در اثر جریان ذرات باردار می باشد. پتانسیل جریانی عبارت است از پتانسیل الکتریکی بین دو فاز که در هنگام عبور به وجود می آید. همچنین حرکت یک محلول شامل اجزاء قطبی در داخل یک لوله موئینه یا در داخل یک بستر متخلخل، باعث تولید یک چنین پتانسیلی بین دیواره ها و جریان سیال خواهد شد [۸]. پتانسیل جریانی تابعی از رژیم جریان، هدایت حرارتی دیواره لوله، خواص فیزیکی محیط سوسپانسیون، اندازه، شکل و خواص الکتریکی ذرات آسفالتین است. میزان رسوب آسفالتین به واسطه اثرات الکتریکی تابعی از درجه حرارت می باشد. سرعت سیال تناسب مستقیم با ایجاد پتانسیل جریانی دارد.

ترمودینامیک رسوب آسفالتین

آسفالتین در ابتدا در نفت به صورت محلول می باشد و تغییر در شرایط ترمودینامیکی یا هیدروپتانسیلی باعث برهم خوردن تعادل آسفالتین در نفت شده و موجب می گردد که آسفالتین به صورت رسوب از نفت جدا شود. مقداری از آسفالتین جدا شده از نفت به صورت رسوب بر روی سطح ته نشین شده و باقی آن همراه جریان برده می شود.

مدل های ترمودینامیکی این توانایی را دارند که میزان آسفالتین جدا شده از نفت تحت شرایط مختلف از جمله تغییر در فشار، دما و یا ترکیب اجزاء سازنده نفت (همچون تزریق گاز) را پیش بینی کنند.

این مدل ها را می توان به پنج گروه زیر طبقه بندی کرد:

مدل های حلالیت

این مدل براساس تئوری ساده شده فلوری هاگینز است و پایداری آسفالتین را به صورت تعادل محلول برگشت پذیر توصیف می کند. به جای حل مدل تعادل سه فازی، می توان ترکیبی از مدل بخار - مایع و مدل مایع - مایع را به کار برد یعنی ابتدا با استفاده از معادله حالت SRK محاسبات تعادلی مایع - بخار را انجام داده و ترکیب فاز مایع بدون در نظر گرفتن رسوب آسفالتین تعیین می گردد. سپس مقدار

مدل‌های SAFT

معادلات حالت نمی‌توانند به خوبی رفتار مخلوط مولکول‌ها با اندازه‌های متفاوت را پیش‌بینی نمایند. همچنین در محاسبه دانسیته مایعات دقت کمی دارند. دلیل دقت کم، تنظیم این معادلات با نقطه بحرانی است. تاکنون تلاش‌های زیادی برای مدل‌سازی آثار هم پیوندی، در مدل‌سازی سیالات صورت گرفته است. اخیراً، پیشرفت‌های قابل توجهی در تئوری مولکولی سیالات هم پیوندی، انجام شده است که قابلیت پیش‌بینی رفتار این گونه مواد را افزایش داده است. یکی از معادلات حالت جدید که می‌تواند به خوبی اثر درجه حرارت، فشار و ترکیب را بر روی خواص فاز سیال در مواردی که مخلوط با اندازه‌های مختلف مولکولی وجود دارد، پیش‌بینی نماید SAFT است. معادلات حالت SAFT از تکامل تئوری اغتشاشی ورتهایم حاصل شده است. در رفتار فازی آسفالتین سهم نیروهای پراکندگی (نیروی واندوالس) و نیروی قطبیت ناچیز در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این فرضیات ترم تجمع در این معادله به کار برده نمی‌شود.

پارامترهای این مدل عبارتند از:

- تعداد اجزاء در یک مولکول زنجیره (m)

- قطر یک جز مولکول (σ)

- نیروی پراکندگی بین اجزا (ε/k)

مراحل مدل‌سازی یک سیال توسط معادله SAFT شامل مراحل زیر است:

- چهار جز در فاز گاز در نظر می‌گیریم: نیتروژن،

دی‌اکسید کربن، متان و شبه جز C_2^+

این تقسیم‌بندی بر اساس اطلاعات فاز گاز خواهد بود. پارامترهای این معادله برای نیتروژن، دی‌اکسید کربن، متان و شبه جزء C_2^+ در مراجع موجود می‌باشد. سه شبه جزء رفتار فاز مایع را نشان می‌دهد:

ترکیبات اشباع، رزین‌ها- آروماتیک‌ها و آسفالتین‌ها.

مشخص‌سازی این فاز بر اساس اطلاعات ترکیب سیال مایع (برای مثال C_{30}^+) و آنالیز SARA می‌باشد. از نتایج این آنالیز، برش C_{10} به عنوان کسر ترکیبات اشباع در نظر گرفته می‌شود. برش $C_{10} - C_{29}$ برش آروماتیک - رزین در نظر گرفته می‌شود. کلیه آسفالتین‌ها در سنگین‌ترین برش

در نظر گرفته خواهد شد [۱۳]. پارامترهای این معادله برای ترکیبات اشباع و آروماتیک‌ها- رزین‌ها توسط وزن مولکولی متوسط محاسبه می‌شود.

مکانیزم نشست آسفالتین

بعد از تجمع آسفالتین‌ها، ممکن است در برخورد با مکانی که احتمال نگهداری آنها را در روی سطح سنگ دارد، توقف کنند. آسفالتین‌های تجمع یافته یا روی این سطوح جذب شده یا دوباره توسط جریان سیال کنده شده و حمل می‌شوند. فرآیند نشست آسفالتین به ترتیب از مکانیسم زیر تبعیت می‌کند:

برخورد آسفالتین‌های تجمع یافته با سطح سنگ

جذب آسفالتین‌های تجمع یافته با سطح سنگ

کنده شدن احتمالی آسفالتین‌هایی که در مرحله قبل جذب شده‌اند. اگر فیلم‌های سیال روی سطوح خلل و فرج سنگ وجود داشته باشد، مکانیزم‌های احتمالی که آسفالتین‌های تجمع یافته را بر روی سطح می‌نشانند، عبارتند از: نفوذ جانبی هیدرودینامیکی در لایه مرزی و نفوذ براونی. بعد از اجتماع ممکن است آسفالتین‌ها در تماس با سطح سنگ به واسطه برخورد با یک سطح جامد و یا آسفالتین‌هایی که قبلاً نشست کرده‌اند، رسوب کنند. نیروهای واندوالس و نیروهای الکتریکی که جاذب یا دافع هستند، بسته به حالت‌های فیزیکی و شیمیایی آسفالتین‌ها دارند. همچنین می‌توانند عامل رسوب‌گذاری باشند. رسوب اولیه به صورت تک لایه مشاهده می‌شود همانند اتفاقی که در جذب شیمیایی گازها مشاهده می‌شود، بعد از اینکه یک لایه تک مولکولی جذب شد، رسوبات می‌توانند با استفاده از پیوندهای هیدروژنی، برخورد با رزین‌ها و دیگر آسفالتین‌های تجمع یافته مشابه رشد کرده و به این ترتیب بر تعداد لایه‌ها افزوده می‌شود. عملیات رسوب‌گذاری آسفالتین‌ها روی سطوح سنگ مخزن باعث تغییراتی در ترشوندگی سنگ مخزن می‌شود. هنگامی که مقادیر زیادی از آسفالتین‌ها روی سطح مخزن رسوب نمود، باعث کاهش تراوایی و یا حتی بسته شدن کامل خلل و فرج سنگ مخزن شود [۱۴].

تغییر در خاصیت ترشوندگی سنگ مخزن

خاصیت ترشوندگی به عنوان تمایل یک سنگ برای

مسدود شونده ذرات آسفالتین در توده متخلخل استوار است [۱۵، ۱۷، ۲۲ و ۲۳].

بخش آزمایشگاهی

به منظور مطالعه پدیده نشست آسفالتین در محیط متخلخل، یک سری آزمایش در شدت جریان های مختلف انجام گرفت.

مواد مورد نیاز

از مهم ترین مواد لازم برای انجام آزمایش می توان به مغزه و نفت خام اشاره نمود. سنگ مورد نیاز برای تهیه مغزه از مناطق جنوب غربی ایران تهیه گردید که از نوع کربناته بوده و مشخصات آن مطابق جدول ۱ می باشد. همچنین نفت خام زنده ته چاهی از یکی از حوزه های جنوب ایران تهیه گردید که مشخصات آن در جداول ۲ تا ۴ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مغزه کربناته

| مشخصات | کمیت |
|-----------------------|-------|
| وزن (گرم) | ۱۱۸/۵ |
| طول (سانتی متر) | ۵/۱۱۴ |
| قطر (سانتی متر) | ۳/۷ |
| درصد تخلخل | ۲۲/۵ |
| تراوایی (md) | ۱۰۶ |
| دانسیته (gr/cm^3) | ۲/۶۸ |

جدول ۲- خواص PVT نفت

| مشخصات | کمیت |
|---------------------------------------------|--------|
| فشار اشباع (bar) | ۹۷ |
| وزن مولکولی نفت (g/mol) | ۱۸۲ |
| وزن مخصوص نفت (g/cm^3) | ۰/۹۳۲۲ |
| وزن مولکولی برش سنگین C_{12+} (g/mol) | ۴۹۱ |
| وزن مخصوص برش سنگین C_{12+} (g/cm^3) | ۰/۹۸۵۳ |
| GOR(SCF/STB) | ۳۰۵ |
| ویسکوزیته (cP) در $40^\circ C$ | ۹۹/۸۶ |
| ویسکوزیته (cP) در $20^\circ C$ | ۴۵۵/۵ |
| ویسکوزیته (cP) در $10^\circ C$ | ۱۱۰۳/۵ |
| دانسیته (g/cm^3) در $15.56^\circ C$ | ۰/۸۹۲۷ |

1. Trapping

گسترش و پیوستن یک نوع سیال بر روی سطح آن در حضور دیگر سیال های امتزاج ناپذیر با سیال یاد شده، تعریف می شود. ترشوندگی یک عامل مهم در کنترل جهت حرکت، جهت جریان و نحوه توزیع سیالات در مخزن می باشد. انواع خواص ترشوندگی عبارتند از:

- یکنواختی: که در آن تمام سطح مخزن دارای یک خاصیت ترشوندگی است.

- جزئی: که در آن نواحی مختلف سطح سنگ دارای خاصیت های ترشوندگی متفاوتی با دیگر خلل و فرج همان سنگ می باشد.

اغلب مخازنی که خاصیت نفت دوستی دارند، شامل نفتی با میزان آسفالتین بالاتر هستند. تأثیر خاصیت ترشوندگی بر روی میزان تولید نفت بسیار مهم و حیاتی است [۱۵] در بخش نشست آسفالتین ها مدل های موجود عموماً بر پایه کارهای گراسپک [۱۶] می باشد. در این مدل از سه مکانیزم نشست سطحی، همراه بردگی و گرفتگی مکانیکی استفاده شده است. ونگ [۱۷] مدل گراسپک را در فرآیند نشست آسفالتین به کار برد. مونتاگدو [۱۸] از مدل سازی شبکه برای شبیه سازی جریان تک فازی در محیط متخلخل در شرایط نشست آسفالتین استفاده نمود. همچنین سولقانی [۱۹] جمله مکانیزم نشست سطحی آسفالتین را برای پدیده نشست آسفالتین در دهانه چاه اصلاح نمود. المهادب [۲۰] نشست آسفالتین در دهانه چاه را در مختصات کروی در سه بعد مدل سازی نمود.

مدل سازی پدیده نشست آسفالتین

مرحله اول: مدل سازی ترمودینامیکی: به منظور مدل سازی ترمودینامیکی رسوب آسفالتین، از مدل اصلاح شده هیشبرگ [۲۱] استفاده شده است.

مرحله دوم: مدل سازی فرآیند جذب آسفالتین از رفتار سطح اضافی پیروی می کند. رسوب کردن مداوم آسفالتین مربوط به جذب شدن و به تله افتادن آسفالتین در حفره ها می باشد. بنابراین به تله افتادن را از جذب شدن جدا انگاشته و جذب بر مبنای تئوری سطح اضافی مدل سازی شده است [۱۴].

مرحله سوم: در بخش گرفتگی مکانیکی، مدل سازی بر مبنای مکانیزم های ته نشینی سطحی، همراه بردگی و

جدول ۳- نتایج آنالیز نفت

| مشخصات | کمیت |
|----------|-------|
| آسفالتین | ۳/۱۶ |
| رزین | ۶۱/۷ |
| اشباع | ۴۸/۴۳ |
| آروماتیک | ۶۱/۳۲ |

جدول ۴- ترکیب نفت زنده ته چاهی مورد استفاده

| اجزا | در صد مولی | اجزا | در صد مولی |
|------------------|------------|------------------|------------|
| H ₂ S | ۰ | n-C ₅ | ۱/۵۹ |
| N ₂ | ۰/۳ | C ₆ | ۶/۹۵ |
| CO ₂ | ۱/۸۳ | C ₇ | ۴/۱ |
| C ₁ | ۲۲/۷ | C ₈ | ۳/۸۸ |
| C ₂ | ۸/۲۴ | C ₉ | ۲/۴۹ |
| C ₃ | ۶/۱۴ | C ₁₀ | ۴/۰۳ |
| i-C ₄ | ۱/۱۹ | C ₁₁ | ۲/۸۵ |
| n-C ₄ | ۳/۶۱ | C ₁₂₊ | ۲۸/۷۴ |
| i-C ₅ | ۱/۳۸ | Total | ۱۰۰ |

سیستم آزمایشگاهی سیلاب‌زنی

برای انجام آزمایشات تزریق و بررسی پدیده نشست آسفالتین از سیستم آزمایشی شامل تجهیزات زیر استفاده گردید:

- پمپ DBR
- سیلندرهای فشار بالا
- نگهدارنده مغزه
- رگولاتور فشار
- جمع‌آوری کننده سیالات

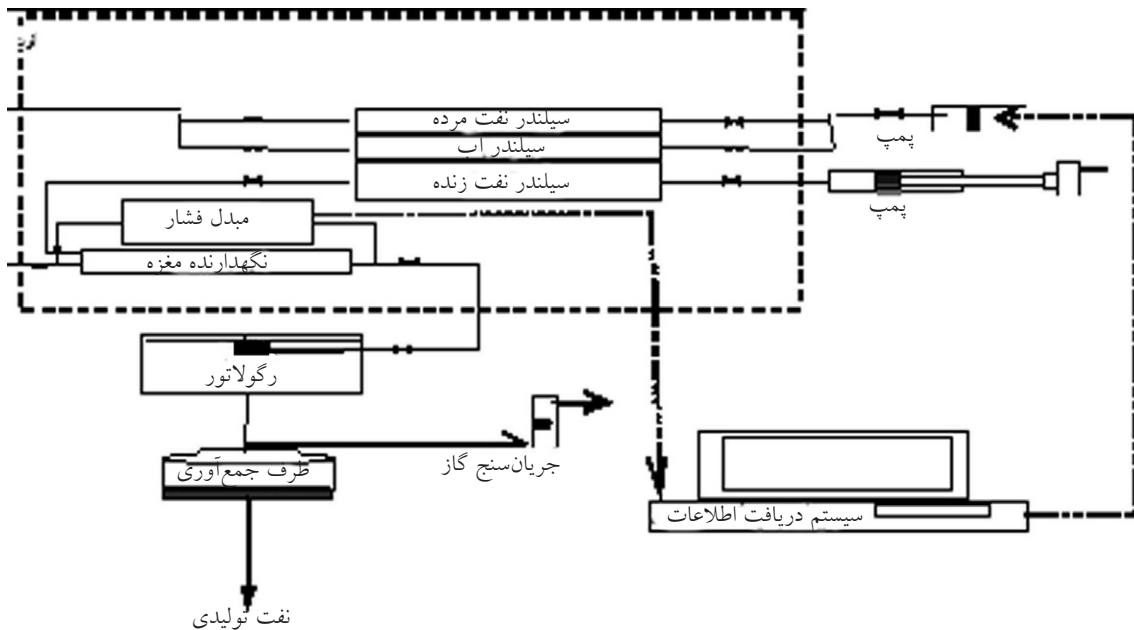
این سیستم قادر بود آزمایشات را در یک یا چند فاز در محیط متخلخل انجام دهد. یکی از قابلیت‌های مهم آن امکان اندازه‌گیری پیوسته افت فشار می‌باشد.

این اندازه‌گیری توسط یک مانومتر دیفرانسیلی حساس با دقت بالا انجام می‌شود. جهت تزریق نفت خام به درون مغزه از پمپ DBR استفاده گردید. شماتیک این سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است.

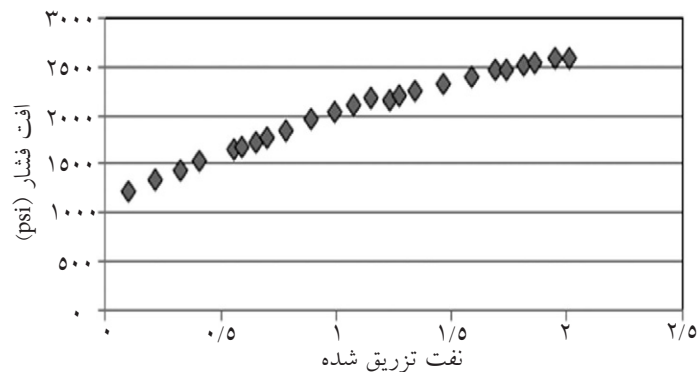
آزمایشات تزریق

برای بررسی اثر شدت جریان تزریق بر روی مقدار نشست آسفالتین و در نتیجه کاهش نفوذپذیری، آزمایشات در شرایط تخلیه طبیعی انجام گرفت. در ابتدا مغزه طبیعی کاملاً تمیز به مدت ۲ ساعت در خلأ قرار داده شد. سپس به منظور اشباع با آب، مغزه به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار گرفت. جهت محاسبه حجم تخلخل، وزن مغزه خشک و اشباع اندازه‌گیری شد و با توجه به دانسیته آب، حجم اشغال شده توسط نفت به دست آمد. سپس با توجه به حجم کل مغزه، درصد تخلخل مؤثر محاسبه گردید. پس از آن جهت انجام آزمایشات تزریق، مراحل زیر صورت گرفت:

- پر کردن دو سیلندر مجهز به پیستون یکی با نفت و دیگری با آب
- آماده کردن نگهدارنده مغزه و اعمال فشار مناسب به داخل فضای حلقوی توسط روغن



شکل ۱- شماتیک دستگاه سیلاب‌زنی مورد استفاده



شکل ۲- افت فشار در شدت جریان ۳ cc/hr

در ادامه مغزه در نگهدارنده قرار گرفته و سیال نفتی با دبی‌های مختلف تزریق گردید. در مرحله اول نفت با شدت جریان ۳ cc/hr به میزان ۲ حجم تخلخل تزریق گردید. سپس دبی تزریق به ۶ cc/hr افزایش یافته و در این مرحله ۳ حجم تخلخل تزریق گردید. در هر مرحله فشار ورودی، فشار خروجی، حجم تزریق شده، زمان تزریق و میزان محتوای آسفالتین در نفت خروجی از مغزه اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

با نشست آسفالتین بر روی سطح حفرات متخلخل و همچنین بسته شدن گلوگاه این حفرات، فشار لازم برای عبور دبی حجمی ثابت از محیط متخلخل افزایش می‌یابد.

-اتصال سیلندر های حاوی نفت و آب

-هواگیری سیستم

-اتصال پمپ‌ها به زیر سیلندرها

-تزریق سیال مورد نظر به داخل مغزه

-اندازه‌گیری فشار ورودی و خروجی مغزه

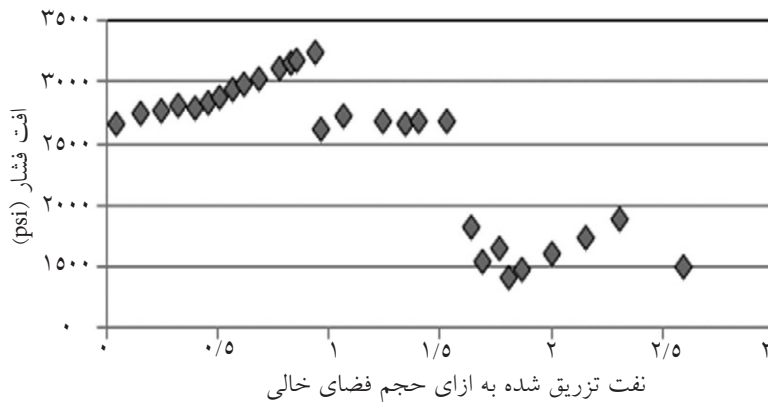
- نمونه‌گیری بعد از تزریق هر حجم معادل حجم حفرات خالی مغزه

پس از اشیاع مغزه با آب، لازم است تراوایی نسبت به آب اندازه‌گیری شود. برای این منظور مغزه در نگهدارنده قرار گرفته و آب با شدت جریان ثابت تزریق می‌شود. در هر مرحله افت فشار اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از معادله دارسی تراوایی به دست می‌آید.

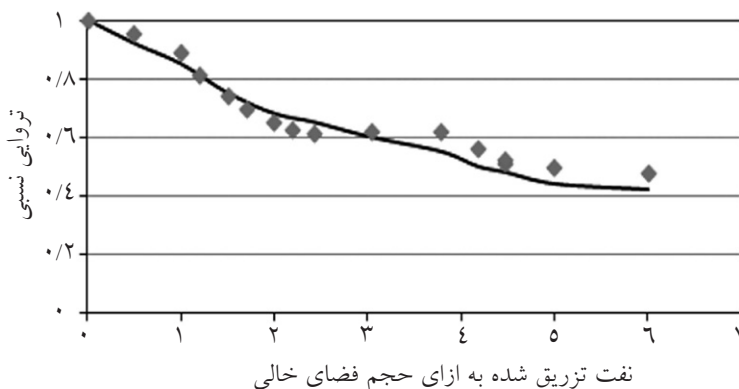
برای شدت جریان تزریقی نفت و ثابت بودن همه شرایط مدل فیزیکی، مشاهده شد که تغییر شدت جریان تزریق در سرعت رسوب‌گذاری مؤثر بوده و با افزایش دبی تزریق، عمل رسوب‌گذاری در لحظات اولیه، سریع‌تر روی می‌دهد. همچنین برای حالتی که دبی تزریق کاهش می‌یابد، افزایش فشار در مراحل انتهایی، بیشتر است که دلیل این امر، کاهش اثر مکانیزم همراه بردگی است. شکل‌های ۴ و ۵ نسبت نفوذپذیری نسبی به نفوذپذیری اولیه را در هر حجم از سیال تزریقی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، این نمودار روند نزولی دارد که نشان‌دهنده کاهش نفوذپذیری مغزه با تزریق سیال است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که میزان کاهش نفوذپذیری در حجم‌های ابتدایی تزریق بیشتر است. خصوصاً در اولین حجم تزریق، نفوذپذیری کل مغزه، به میزان قابل توجهی کاهش داشته است.

در این حالت اختلاف فشار میان دو سر مغزه توسط فشارسنج و با استفاده از دستگاه ثبت اطلاعات، ثبت شده است. منحنی‌های افت فشار در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود. در هر مرحله با توجه به مقادیر افت فشار اندازه‌گیری شده، کاهش تراوایی با استفاده از رابطه دارسی محاسبه شده و در شکل‌های ۴ و ۵ رسم گردیده است. همان‌گونه که از منحنی‌های ۲ و ۳ مشخص است، با افزایش زمان تزریق (حجم نفت تزریقی) افت فشار افزایش یافته است.

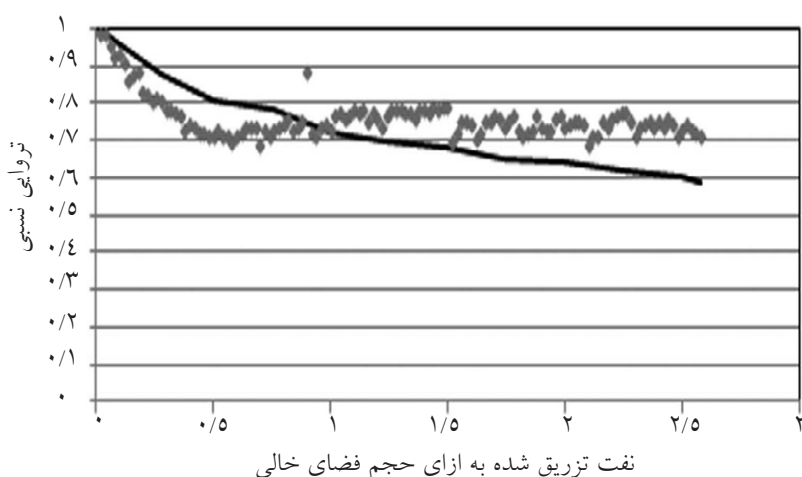
در لحظات اولیه، افزایش فشار میانگین، به دلیل جذب آسفالتین بر سطح خلل و فرج بسیار شدید بوده و به تبع آن، رسوب‌دهی آسفالتین و رشد اندازه ذرات، باعث مسدود شدن تعدادی از خلل و فرج و کاهش قابل توجه تراوایی مغزه می‌شود. در نتیجه افزایش فشار با شیب بسیار تندی ادامه خواهد داشت. با تعریف دو سناریوی متفاوت



شکل ۳- افت فشار در شدت جریان ۶ cc/hr



شکل ۴- کاهش تراوایی در شدت جریان ۳ cc/hr (داده آزمایشگاهی - مدل)



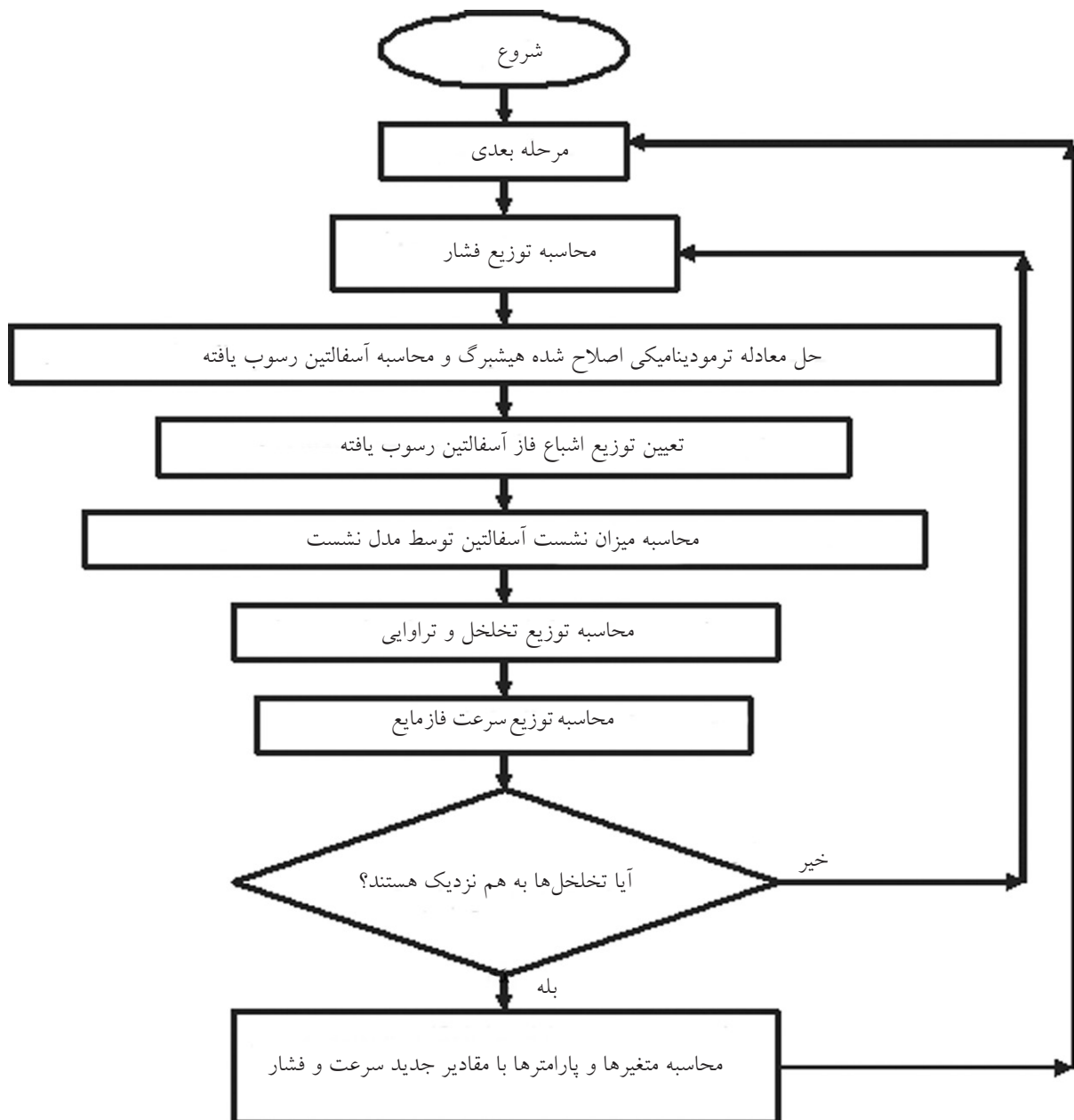
شکل ۵- کاهش تراوایی در شدت جریان ۶ cc/hr (♦ داده آزمایشگاهی - مدل)

با توجه به نتایج مدل‌سازی در شکل‌های ۴ و ۵ و با توجه به در نظر گرفتن هر چهار مکانیزم جذب، همراه بردگی، گرفتگی و جذب سطحی، تطابق خوبی بین نتایج مدل‌سازی و نتایج تجربی وجود دارد. همچنین از پارامترهای بهینه مدل که در جدول ۵ ارائه شده، مشخص است که با افزایش نرخ جریان، پارامتر همراه بردگی افزایش قابل توجهی یافته است که این نتیجه توسط نتایج آزمایشگاهی در شکل ۵ نیز تأیید شده است. همچنین با افزایش دبی، پارامترهای مکانیزم نشست سطحی و گرفتگی مکانیکی در مدل هیدرودینامیکی نیز افزایش یافته است. این مطلب نشان دهنده اثر قابل توجه مکانیزم نشست سطحی و گرفتگی مکانیکی در کاهش تراوایی سنگ مخزن ناشی از نشست آسفالتین می‌باشد.

آنالیز حساسیت

جهت تجزیه و تحلیل اثر پارامترهای مختلف مکانیزم‌های پدیده نشست آسفالتین مانند مکانیزم نشست سطحی، همراه بردگی و مکانیزم گرفتگی مکانیکی، آنالیز حساسیت در مدل هیدرودینامیکی انجام شد که نتایج آن در شکل‌های ۷ تا ۹ آمده است. آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که با افزایش ضریب مکانیزم نشست سطحی و گرفتگی مکانیکی، تراوایی سنگ کم و با افزایش ضریب مکانیزم همراه بردگی، تراوایی سنگ مخزن افزایش می‌یابد.

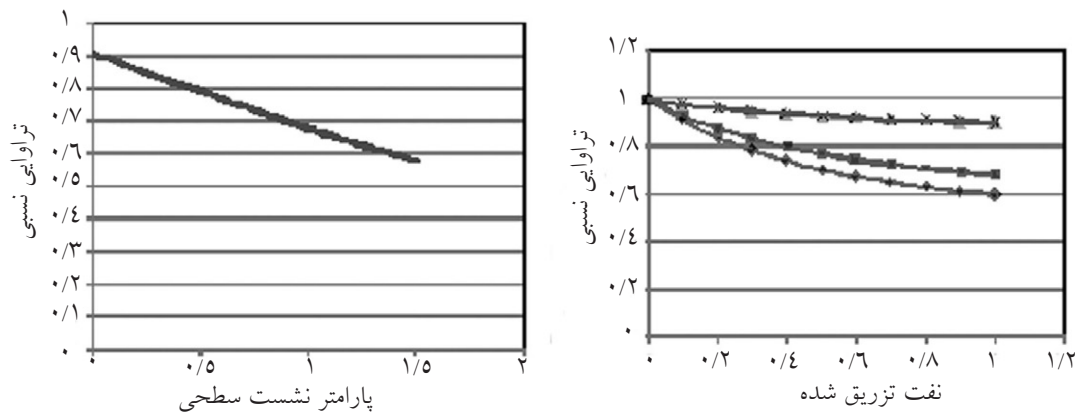
در ابتدای تزریق چون حفرات تمیز هستند، ذرات آسفالتین به راحتی و با سرعت زیاد بر روی سطح حفرات و همچنین گلوگاه‌ها نشسته و باعث کاهش نفوذپذیری می‌شوند. بنابراین مکانیزم‌های غالب رسوب در ابتدای تزریق، جذب سطحی و گرفتگی گلوگاه‌ها می‌باشد. در حالی که در ادامه، مکانیزم گرفتگی گلوگاه‌ها مؤثرتر است. همچنین با توجه به شکل ۴ که مربوط به اندازه‌گیری نتایج تراوایی در دبی ۳ cc/hr است، می‌توان دریافت که پدیده نشست آسفالتین در دو مرحله روی داده است. در مرحله اول با افزایش میزان حجم تخلخل تزریقی، کاهش تراوایی ناشی از نشست آسفالتین افزایش می‌یابد. سپس با تزریق ۱ حجم تخلخل از سیال نفتی، تراوایی تقریباً ثابت می‌شود. در این نقطه میزان نشست آسفالتین برابر میزان برداشته شدن^۱ می‌شود. این رژیم جریان در دبی‌های کم قابل مشاهده است. مطابق شکل شماره ۵ که مربوط به اندازه‌گیری نتایج کاهش تراوایی مغزه در دبی ۶ cc/hr است، در ابتدا تراوایی کاهش یافته و به یک مقدار کمینه می‌رسد. پس از آن بر خلاف حالت قبل، نقطه پایا که در آن مقدار تراوایی ثابت است نمی‌رسد. بلکه تراوایی اندکی بهبود یافته و سپس ثابت می‌شود. به منظور مدل‌سازی پدیده نشست آسفالتین از فلوچارت شکل ۶ استفاده شده است. معادلات موازنه جرم با استفاده از روش Crank-Nicholson و نیوتن و همچنین معادلات جذب و نشست آسفالتین از روش رانگ-کاتا مرتبه چهارم با استفاده از نرم‌افزار MATLAB حل شده است.



شکل ۶- فلوچارت مورد استفاده در مدل‌سازی پدیده نشست آسفالتین

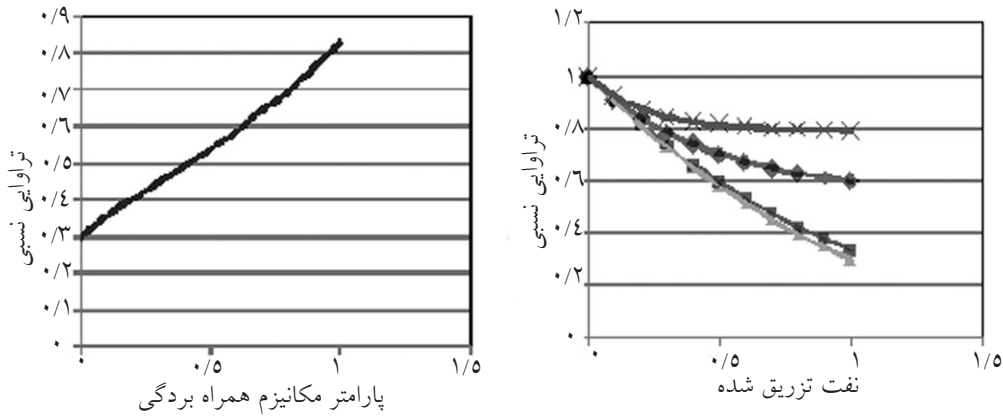
جدول ۵- پارامترهای مدل نشست آسفالتین در دبی‌های مختلف

| | | |
|-------------------|--------|--------|
| v_{cr} (cm/s) | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۷۹ |
| α (1/sec) | ۰/۰۰۴۲ | ۰/۰۰۶۸ |
| β (1/cm) | ۰/۱ | ۰/۸۱ |
| γ_i (1/cm) | ۰/۰۷ | ۰/۰۹ |
| σ | ۱ | ۰/۲ |
| K | ۲۵۰۰ | ۲۵۰۰ |



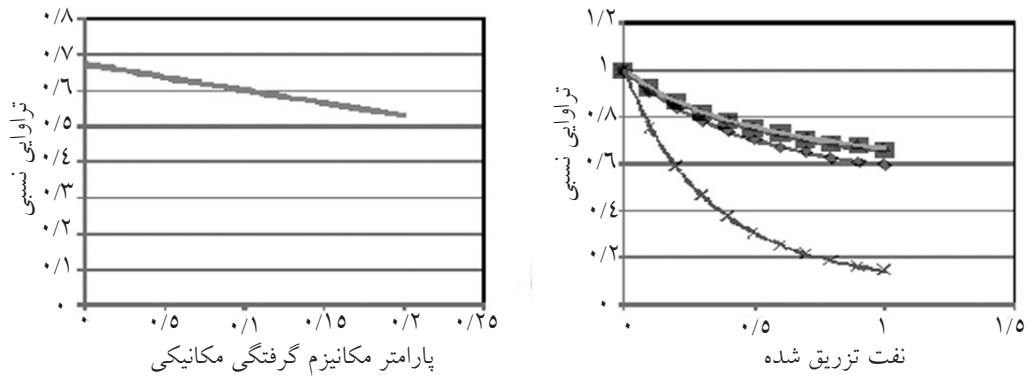
- ◆ پارامتر مکانیزم نشست سطحی = $1/3$
- پارامتر مکانیزم نشست سطحی = 0.9
- ▲ پارامتر مکانیزم نشست سطحی = 0.1
- × پارامتر مکانیزم نشست سطحی = 10^{-3}

شکل ۷- اثر پارامتر مکانیزم نشست سطحی بر تراوایی نسبی



- ◆ پارامتر مکانیزم همراه بردگی = 0.65
- پارامتر مکانیزم همراه بردگی = 0.065
- ▲ پارامتر مکانیزم همراه بردگی = 0.0065
- × پارامتر مکانیزم همراه بردگی = $1/65$

شکل ۸- اثر پارامتر مکانیزم همراه بردگی بر تراوایی نسبی



- ◆ پارامتر مکانیزم گرفتگی مکانیکی = 1
- پارامتر مکانیزم گرفتگی مکانیکی = 0.1
- ▲ پارامتر مکانیزم گرفتگی مکانیکی = 0.01
- × پارامتر مکانیزم گرفتگی مکانیکی = 1

شکل ۹- اثر پارامتر مکانیزم گرفتگی مکانیکی بر تراوایی نسبی

نتیجه‌گیری

K: تراوایی

l_{al} : پارامتر متقابل دوجزئی بین آسفالتین و نفت
 m_a : میزان پوشش تک لایه‌ای برای آسفالتین و نفت
 n_i^a : سطح اضافی
 m_o : میزان پوشش تک لایه‌ای برای آسفالتین و نفت
 W_{dal} : غلظت جرمی آسفالتین حل شده و معلق در فاز نفت
 W_{sal} : آسفالتین رسوب کرده
 V_A : جزء حجمی آسفالتین ته‌نشین شده
 v^t : حجم مولی
 v_c : حجم بحرانی فاز مایع (cm/sec)

نشانه‌های یونانی

φ_a : کسر حجمی آسفالتین در فاز نفت
 \emptyset : تخلخل
 α : ضریب مکانیزم نشست سطحی sec^{-1}
 β : ضریب مکانیزم همراه بردگی cm^{-1}
 γ : ضریب مکانیزم گرفتگی مکانیکی cm^{-1}
 σ : ضریب پدیده گلوله برفی
 δ : پارامتر حلالیت

۱- کاهش تراوایی ناشی از نشست آسفالتین در دبی کم تزریق نفت به سنگ مخزن در ابتدا افزایش یافته و سپس تراوایی تقریباً ثابت می‌شود. در این نقطه میزان نشست آسفالتین برابر میزان برداشته شدن می‌باشد.

۲- در دبی بالاتر، ابتدا تراوایی کاهش یافته تا به یک مقدار کمینه می‌رسد. پس از آن بر خلاف حالت اول، تراوایی بهبود یافته و سپس ثابت می‌شود.

۳- مکانیزم نشست سطحی و گرفتگی مکانیکی در کاهش تراوایی سنگ مخزن ناشی از نشست آسفالتین بیشترین تأثیر را دارند.

۴- با افزایش ضریب مکانیزم نشست سطحی و گرفتگی مکانیکی، تراوایی سنگ کم و با افزایش ضریب مکانیزم همراه بردگی، تراوایی سنگ مخزن افزایش می‌یابد.

علائم و نشانه‌ها

C_{sal} : غلظت رسوب آسفالتین
 D_{pt} : قطر متوسط گلوله‌ها
 D_{ptcr} : قطر بحرانی گلوله‌ها

مراجع

- [1]. Civan F., Knapp R. M., and Ohen H. A., "Alteration of Permeability by Fine Particles Processes", J. Petrol. Sci. Eng. 3, pp. 65-79, 1989.
- [2]. Chandra W. A., "Precipitation of asphaltenes from solvent-diluted heavy oil and thermodynamic properties of solvent-diluted heavy oil solutions", Fuel, 85, pp. 492-506, 2006.
- [3]. Branco M., Mansoori G. A. and De Almeida X., "Asphaltene flocculation and collapse from petroleum fluids", J. Pet. Tech, 32, pp. 217-230, 2001.
- [4]. Huggins M. J. "Solutions of long chain compounds", J. Chem. Phys., 9, pp. 440-448, 1941.
- [5]. Andersen S. I. and Speight J. G., "Thermodynamic models for asphaltene solubility and precipitation", J. Petrol. Sci. Eng. 22, pp. 53-66, 1999.
- [6]. Thomas F., "Experimental and theoretical studies of solids precipitation from reservoir fluid", J. Can. Pet. Technol., 31, pp. 22-31, 1992.
- [7]. Victorov A. and Firrozabadi A., "Thermodynamic micellization model of asphaltene precipitation from petroleum fluids", AIChE J., 42, pp. 1753-1764, 1996.
- [8]. Victorov A. and Smirnova N., "Description of asphaltene polydispersity and precipitation by means of thermodynamic model of self-assembly, Fluid Phase Equilib", 471, 158-160, 1999.

- [9]. Hirschberg A., "Influence of temperature and pressure on asphaltene flocculation", Soc. Petrol. Eng., 24, pp. 283–291, 1984.
- [10]. Leontaritis K. "Asphaltene flocculation during oil recovery and processing: a thermodynamic-colloidal model", The SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, San Antonio, USA , 1987.
- [11]. Fahim M. A., "Prediction of asphaltene precipitation for Kuwaiti crude using thermodynamic micellization model", Ind. Eng. Chem. Res., 40, pp. 2748–2756 , 2001.
- [12]. Nghiem L., "Modeling asphaltene precipitation during primary depletion", SPE J., 2, pp.170–176, 1997.
- [13]. Gonzalez D. L., "Prediction of asphaltene instability under gas injection with the PC-SAFT equation of state", Energy Fuels, 19, pp. 1230–1234, 2005.
- [14]. Ali M. A. and Islam M. R., *The effect of asphaltene precipitation on carbonate rock permeability: An experimental and numerical approach*, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, 1997.
- [15]. Wang S. and Civan F., "Modeling Formation Damage by Asphaltene Deposition during Primary Oil Recovery", J. Energ. Resour. 127, pp. 310-317 , 2005.
- [16]. Gruesbeck C. and Collins R. E., "Entrainment and deposition of fine particles in porous Media", Soc. Pet. Eng. J. 22, pp. 847–856 ,1982.
- [17]. Wang S. and Civan F., "Productivity decline of vertical and horizontal wells by asphaltene deposition in petroleum reservoirs", The SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, Texas, SPE pp. 64991, 2001.
- [18]. Monteagudo J. E. P., Rajagopal K. and Lage, P. L. C. , "Simulating oil flow in porous media under asphaltene deposition", Chem. Eng. Sci.,57, pp. 323–337, 2002.
- [19]. Soulgani B., Tohidi B., Jamialahmadi M. and Rashtchian D., "Modeling Formation Damage due to Asphaltene Deposition in the Porous Media", Energy Fuels, 25, pp. 753–761, 2011.
- [20]. Almehaideb R. A., "Asphaltene precipitation and deposition in the near wellbore region: a modeling approach", J. Pet. Sci. Eng. 42, pp. pp.157–170, 2004.
- [21]. Mousavi-Dehghani S. A., Mirzayi B., Mousavi S. M. H., and Fasih M., "An Applied and Efficient Model for Asphaltene Precipitation In Production and Miscible Gas Injection Processes", Petroleum Science and Technology, 28, pp. 113-124, 2010.
- [22]. Civan F., *Reservoir Formation Damage Fundamentals, Modeling, Assessment, and Mitigation*, ISBN-088415-301-0, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 2000.
- [23]. Bagheri M. B., Kharrat R. and Ghotbi C., "Experimental Investigation of the Asphaltene Deposition Process during Different Production Schemes", Oil Gas Sci. Technol. - Rev. IFP 66, 3, pp. 507-519, 2011.