

# مطالعه آزمایشگاهی آسیب دیدگی سنگ مخزن در اثر رسوب آسفالتین طی فرآیند تخلیه طبیعی در یکی از مخازن ایران

پژوهش نفت

سال بیست و سوم  
شماره ۷۵

صفحه ۱۴۱-۱۳۱ ۱۳۹۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۴/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۲/۲۳

محمد غزائیان<sup>۱\*</sup>، ریاض خراط<sup>۲</sup> و عبدالنبی هاشمی<sup>۲</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه نفت و گاز

۲- دانشگاه صنعت نفت، مرکز تحقیقات دانشگاه صنعت نفت

m.ghazaeian@srbiau.ac.ir

واژه‌های کلیدی: رسوب آسفالتین، شرایط دینامیک، کاهش تراوایی، مکانیسم رسوب، افت طبیعی فشار

## مقدمه

تاکنون تعاریف زیادی از آسفالتین ارائه شده است. یک تعریف عمومی از آسفالتین این است که آسفالتین‌ها اجزایی از نفت خام هستند که در آلکان‌های سبک مانند نرمال پنتان و نرمال هپتان، نامحلول و در تولوئن محلول هستند. رسوب آسفالتین در مراحل مختلفی از تولید، رخ داده و سبب بروز مشکلاتی در تولید می‌شود [۱-۳].

حدود سی سال است که مطالعات گسترده‌ای در زمینه رسوبات آسفالتینی صورت گرفته و نتیجه این تحقیقات به صورت مدل‌های مختلفی برای رسوب ارائه شده است. [۴ و ۵]. اما در عمل و در مقیاس مخزن اکثر این مدل‌ها کارایی مناسبی ندارند، به دلیل اینکه بر هم کنش بین سیال و فضای متخلخل پیچیده‌تر از آن است که بتوان آن را به طور کامل مدل کرد.

هنگامی که آسفالتین‌ها از محلول جدا می‌شوند، به صورت

## چکیده

رسوب آسفالتین می‌تواند در مراحل مختلفی از تولید یا طی فرآیندهای ازدیاد برداشت تشکیل شود. مطالعات میدانی و تحقیقات آزمایشگاهی بسیاری در این زمینه انجام شده است که همه روش‌های ارائه شده در جهت بهینه‌سازی آن بوده و هزینه‌های زیادی را در برداشته است. از این رو، بررسی مکانیسم‌های رسوب، به دست آوردن پارامترهای آنها و اجرای آنالیز حساسیت تحت سناریوهای مختلف به منظور مقابله با رسوب آسفالتین لازم و ضروری به نظر می‌رسد که در این تحقیق به آن پرداخته شده است. در این پژوهش، مطالعات آزمایشگاهی بر روی کاهش تراوایی مغزه تحت شرایط افت فشار طبیعی در اثر تولید، انجام گرفته است. اهداف اصلی این آزمایش‌ها عبارتند از: اندازه‌گیری تراوایی، آنالیز غلظت آسفالتین و اندازه‌گیری ویسکوزیته و تخلخل. آزمایش‌های مذکور بر روی ماسه سنگ انجام شده است. از نتایج به دست آمده می‌توان به کاهش تراوایی و تخلخل در ماسه سنگ اشاره کرد. علاوه بر این، مکانیسم رسوب در طول زمان تولید تغییر کرده و تابعی قوی از نرخ تزریق بوده است. همچنین مشاهده شد که پس از مسدود شدن گلوگاه‌ها، با افزایش نرخ تزریق، تراوایی آسیب دیده بهبود پیدا می‌کند.

تجهیزات در آن قرار گرفته تأمین می‌شود. همچنین تزریق سیال به درون مغزه به وسیله یک پمپ کوپریکس<sup>۱</sup> انجام می‌شود که قابلیت پمپ کردن تا فشار ۵۰۰۰ psi با نرخ تزریق ۴-۱۰ cc/min را دارد. با این تجهیزات می‌توان سیالی با دمای بیشتر از ۱۵۰°C و فشار بیشتر از ۵۰۰۰ psi ایجاد کرد. دستگاه دارای قطعات مختلفی از قبیل پمپ‌ها، اتاقک حرارتی، نگهدارنده مغزه، دستگاه کنترل کننده جریان خروجی سیال، دستگاه اندازه‌گیری ویسکوزیته و... است که هر کدام در سیستم وظیفه‌ای را بر عهده دارد.

نگهدارنده مغزه شامل یک استوانه فولادی با قدرت تحمل فشار بالا است که مغزه در حالی که درون یک جلیقه لاستیکی است، درون آن قرار می‌گیرد. اطراف جلیقه را به طور کامل آب فرا گرفته تا بتوان با پمپ، فشاری بیشتر از فشار جریان داخل مغزه، ایجاد کرد. این فشار برای جلوگیری از جریان شعاعی در مغزه است.

#### مواد آزمایشگاهی

نفت استفاده شده در آزمایش، در داخل سیلندر ترکیب کننده نفت و گاز ساخته شد. ترکیب درصد و خصوصیات نفت مورد استفاده به ترتیب در جداول شماره ۱ و ۲ آورده شده است همچنین مشخصات سنگ در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

جدول ۱- ترکیبات نفت مخزن

ترکیبات	درصد مولی
N <sub>2</sub>	۰/۱۸
CO <sub>2</sub>	۳/۸۶
H <sub>2</sub> S	۴/۸۳
C <sub>1</sub>	۴۲/۸۵۶
C <sub>2</sub>	۶/۹۹۹
C <sub>3</sub>	۴/۳۹
iC <sub>4</sub>	۱/۰۲
nC <sub>4</sub>	۲/۷۷
iC <sub>5</sub>	۱/۲۶
nC <sub>5</sub>	۱/۷۳
C <sub>6</sub>	۲/۵۵
C <sub>7</sub>	۲/۵۳
C <sub>8</sub>	۲/۷۱
C <sub>9</sub>	۲/۵۶
C <sub>10</sub>	۲/۲۰
C <sub>11</sub>	۱/۷۳
C <sub>12</sub>	۱۵/۸۲

تکه‌ای جامد به سطح سنگ می‌چسبند و یک لایه پیوسته آسفالتینی روی سطح محیط متخلخل به وجود می‌آورند. این لایه به تدریج گسترده‌تر شده و توانایی جذب ذرات دیگر آسفالتین روی سطح سنگ را افزایش می‌دهد. این امر سبب تغییر تدریجی ترشوندگی از آب دوست به نفت دوست می‌شود [۶-۸]. به هر حال برای ارائه یک راه حل مناسب برای مشکل رسوب آسفالتین، لازم است رفتار آسفالتین‌ها به درستی شناخته شود. از آنجایی که مدل‌های ارائه شده دارای دقت بسیار کمی در پیش‌بینی رفتار آسفالتین‌ها هستند، انجام تحقیقات آزمایشگاهی اهمیت خود را بیش از پیش نشان می‌دهد. هدف اصلی این پژوهش بررسی آزمایشگاهی اثر تخلیه طبیعی در فشارهای مختلف روی یک نمونه مغزه مخزنی در شرایط دما و فشار مخزن است.

#### تجهیزات و مواد آزمایشگاهی

##### تجهیزات آزمایشگاهی

برای تحقیق در مورد پدیده رسوب آسفالتین در شرایط مخزن، آزمایشات مختلفی تا کنون طراحی شده است. دستگاه‌های آزمایشگاهی این پژوهش به گونه‌ای طراحی شده که بتوان شرایط دما و فشار مخزن را برای آن تأمین کرد. دمای مخزن به وسیله یک اتاقک حرارتی که تمام

جدول ۲ - خصوصیات نفت استفاده شده برای ترکیب

محتوای آسفالتین (%)	وزن ملکولی (gr/gr-mole)	API	فشار اشباع (psig)	ویسکوزیته در شرایط مخزن (دو فازی) (cP)	GOR (scf/stb)
۴/۲	۹۰/۵۵	۲۹/۱۱	۳۹۰۴	۰/۴۶	۱۱۰۶

جدول ۳ - خصوصیات مغزه ماسه سنگی

نوع سنگ	طول (cm)	قطر (cm)	نفوذپذیری (md)	تخلخل	S <sub>wc</sub>
ماسه سنگ	۱۰/۲	۳/۸	۴۸/۶۲۳	۰/۱۷	۰/۳۱

مدتی فرصت داده می‌شود تا به ورودی مغزه برسد. از این زمان، اختلاف فشار دو سر و چند سانتی‌متر انتهای مغزه (بسته به طول مغزه) به وسیله سیستم جمع‌آوری اطلاعات ثبت می‌گردد. با در اختیار داشتن حجم فضای متخلخل مغزه و حجم فضای مرده، زمان رسیدن نفت زنده به تثبیت کننده فشار محاسبه می‌شود. پس از گذشت این زمان، عملیات نمونه‌گیری از اولین حجم تزریق انجام می‌شود. با توجه به مشخص بودن یک حجم فضای متخلخل مغزه و نرخ تزریق پمپ، زمان تولید یک حجم فضای متخلخل محاسبه شده و نمونه‌گیری از آن انجام می‌شود. به همین ترتیب عملیات نمونه‌گیری از حجم‌های تزریقی دیگر صورت می‌گیرد. جمع‌آوری حجم‌های سیال به این دلیل مهم است که میزان آسفالتین موجود در فضای متخلخل به ازای هر حجم تزریق سیال باید تعیین شود تا بتوان میزان آسفالتین رسوب کرده در مغزه را محاسبه کرده و به دنبال آن میزان کاهش تخلخل مغزه را اندازه‌گیری نمود. عملیات تزریق تا زمان ثابت شدن اختلاف فشار دو سر مغزه، ادامه می‌یابد.

#### محاسبه محتوای آسفالتین

محتوای آسفالتین با استفاده از روش استاندارد ASTM IP143(D6560) اندازه‌گیری می‌شود.

#### محاسبه چگالی آسفالتین

چگالی آسفالتین برای محاسبه تخلخل مغزه بعد از تزریق هر حجم سیال به درون مغزه باید اندازه‌گیری شود [۸ - ۱۰].

#### مراحل انجام آزمایش

پارامترهای اصلی که در زمان انجام آزمایش اندازه‌گیری شدند، عبارتند از: ویسکوزیته سیال، اختلاف فشار بین ابتدا تا انتهای مغزه، اختلاف فشار از ۵ cm ابتدایی تا انتهای مغزه، تراوایی موثر و مطلق مغزه، محتوای آسفالتین سیال ورودی و خروجی، چگالی آسفالتین و تخلخل مغزه به ازای هر حجم تزریق سیال.

#### آماده کردن نفت زنده

برای آماده کردن نفت زنده از نمونه نفت مرده و گازها با نسبت مشخص استفاده شد. سیالات با نسبت مولی معین به داخل سیلندر ترکیب کننده سیال، تزریق شدند. برای رسیدن به خصوصیات نفت میدانی، فشار سیلندر به فشار مخزن رسانده شده و به مدت دو هفته به حالت دورانی حرکت داده شد.

#### انجام سیلاب زنی مغزه

به دلیل تغییرات محسوس ویسکوزیته با تغییر فشار، ویسکوزیته سیال تزریقی در هر مرحله افت فشاری اندازه‌گیری می‌شود. همچنین افت فشار ابتدا و انتهای مغزه و افت فشار از ۵ cm ابتدایی تا انتهای مغزه به طور پیوسته در بازه‌های زمانی مشخص (۰/۵ sec) توسط دستگاه ثبت داده، ثبت می‌شود. پس از اندازه‌گیری میزان لزجت، به کمک شیرهای تعبیه شده در بیرون از سیستم گرمایشی، نفت به درون نگهدارنده مغزه هدایت می‌شود. با در دست داشتن حجم فضای مرده قبل از نگهدارنده مغزه، به نفت

سیستم و قبل از ورود سیال به مغزه، ابتدا ویسکوزیته آن اندازه‌گیری شده و از آن نمونه گرفته می‌شود که میزان آسفالتین این نمونه به عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود. این تست در سه مرحله افت فشاری و مجموع ده حجم سیال تزریقی به مغزه انجام شده است که در ادامه اطلاعات به‌دست آمده مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

#### اختلاف فشار اندازه‌گیری شده در طول مغزه

با بهره‌گیری از اختلاف فشار سنج‌های موجود در سیستم و ثبت داده‌های اندازه‌گیری شده توسط آنها، شکل‌های ۲ تا ۴ حاصل می‌شود. این نمودارها، اختلاف فشار دو سر مغزه را در هر مرحله فشاری نشان می‌دهند.

شکل ۲ نشان دهنده نمودار افت فشار دو سر مغزه در اولین مرحله فشاری (۴۵۰۰ psig) بر حسب حجم تزریق می‌باشد. این نمودار را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد. در بخش اول، نفت زنده تمایل دارد به درون مغزه وارد شود، اما مغزه از ورود آن جلوگیری می‌کند. فشار ابتدای مغزه تا فشار آستانه ورود افزایش می‌یابد و نفت زنده وارد آن می‌شود. در بخش دوم، به دلیل ورود نفت زنده به درون مغزه، فشار ابتدای مغزه کاهش می‌یابد. با جایگزینی نفت زنده به جای نفت مرده، در اولین حجم تزریق، لزجت سیال درون مغزه که ترکیبی از نفت زنده و نفت مرده می‌باشد، کاهش یافته و در نتیجه افت فشار ابتدا و انتهای مغزه افزایش می‌یابد.

روش کار به این صورت است که به نسبت‌های مشخصی مقداری تولوئن به آسفالتین به‌دست آمده از تست IP 143 اضافه می‌شود. در هر مرحله چگالی مخلوط را به‌دست آورده و در نهایت نمودار معکوس چگالی مخلوط نسبت به جزء جرمی آسفالتین را رسم می‌کنیم. چگالی آسفالتین به طور غیر مستقیم از نمودار رسم شده و با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{1}{\rho_M} = \frac{1}{\rho_A} + \left( \frac{1}{\rho_A} - \frac{1}{\rho_T} \right) * X_A \quad (1)$$

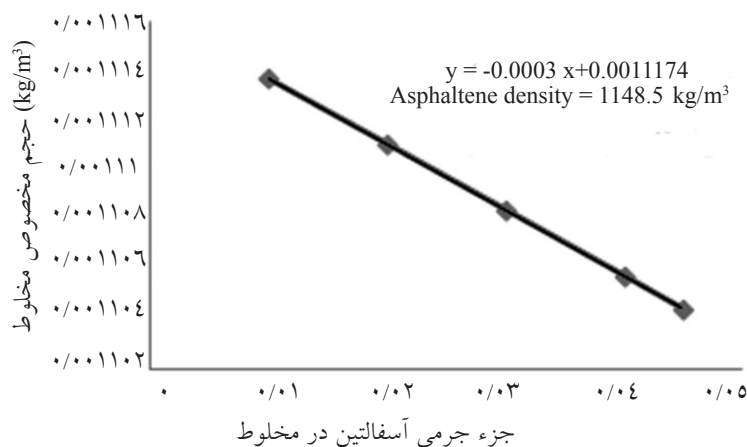
از این رو داریم

$$\rho_A = \frac{1}{S_0 + I} \quad (2)$$

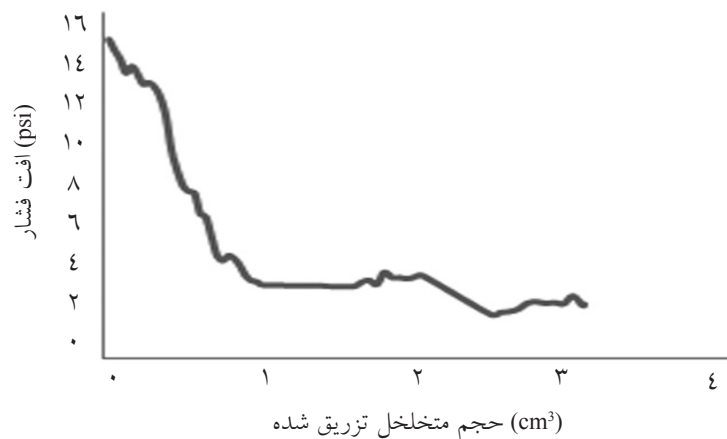
با استفاده از رابطه بالا و اطلاعات به‌دست آمده از تست IP 143، شکل ۱ به‌دست آمده است.

#### نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

نرخ تزریق سیال به داخل مغزه باید به گونه‌ای باشد که جریان آرام باشد. لذا با استفاده از رابطه کارمان-کرنی و همچنین رابطه رینولدز، میزان بیشینه نرخ تزریق سیال به داخل مغزه قابل محاسبه است. این تست با نرخ تزریق ثابت ۰/۵ cc/min انجام شده است. نفت زنده تزریقی در این تست حاوی ۲/۴٪ آسفالتین می‌باشد. ابتدا مغزه و تجهیزات آزمایش در دمای ۱۱۰ °C باقی می‌ماند تا به شرایط پایدار برسد. همچنین تثبیت‌کننده فشار روی فشار ۴۵۰۰ psi تنظیم می‌گردد تا در طول زمان پایداری، فشار سیستم بالاتر از فشار مخزن نرود. پس از پایدار شدن



شکل ۱- حجم مخصوص مخلوط بر حسب جزء جرمی آسفالتین



شکل ۲ - نمودار افت فشار دو سر مغزه برحسب حجم حفره‌های تزریق شده در فشار ثابت ۴۵۰۰ psig

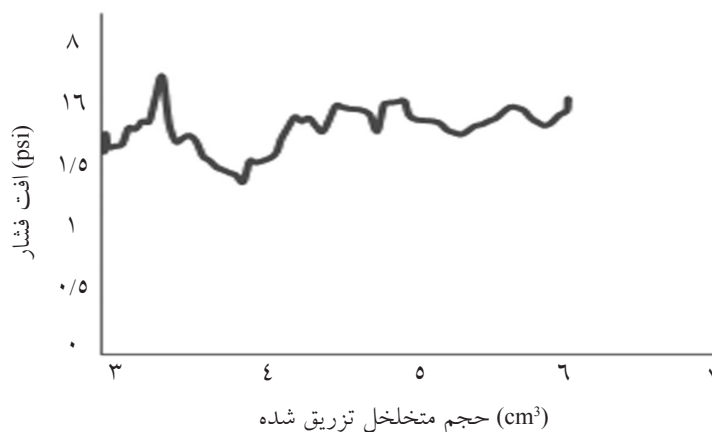
تثبیت کننده فشار می‌باشد. بخش دوم این نمودار نیز نشان دهنده افزایش اختلاف فشار دو سر مغزه در نتیجه رسوب آسفالتین در محیط متخلخل می‌باشد.

با کمی دقت در شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان دریافت که با کاهش فشار، افت فشار دو سر مغزه تغییر می‌کند که این پدیده به خاطر باز شدن برخی از مسیرهای مسدود شده توسط ذرات آسفالتین می‌باشد. در این مغزه و در بازه نهایی، افت فشار در محدوده ۱/۵ psi نوسان می‌کند. شکل ۵ نشان دهنده افت فشار دو سر مغزه در سه مرحله افت فشار می‌باشد.

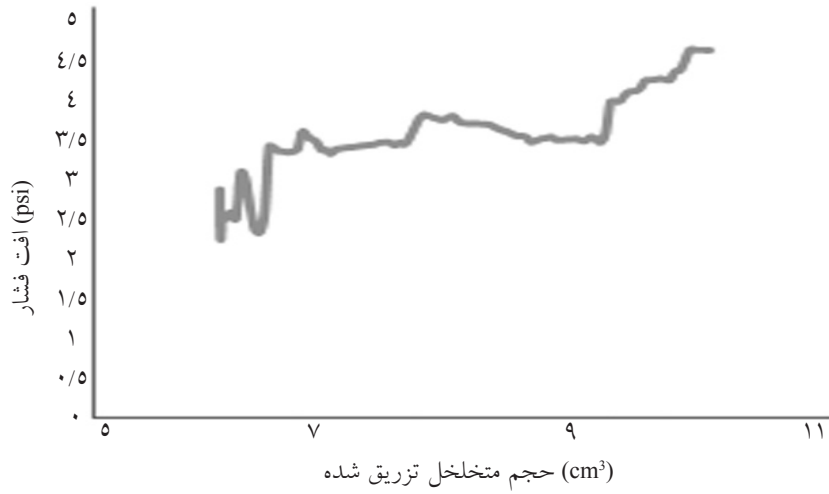
در شکل ۶ اختلاف فشار اندازه‌گیری شده دو سر مغزه، ۵ cm ابتدایی و ۵/۲ cm انتهایی مغزه بر حسب حجم سیال تزریقی نشان داده شده است.

شکل ۳ نشان دهنده نمودار افت فشار دو سر مغزه در دومین مرحله فشاری (۴۳۵۰ psig) بر حسب حجم تزریق می‌باشد. با دقت در این نمودار مشاهده می‌شود که این نمودار را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. بخش اول این نمودار نشان دهنده افزایش فشار ناشی از کاهش فشار تثبیت کننده و بخش دوم نشان دهنده افزایش اختلاف فشار دو سر مغزه در نتیجه رسوب آسفالتین در محیط متخلخل می‌باشد.

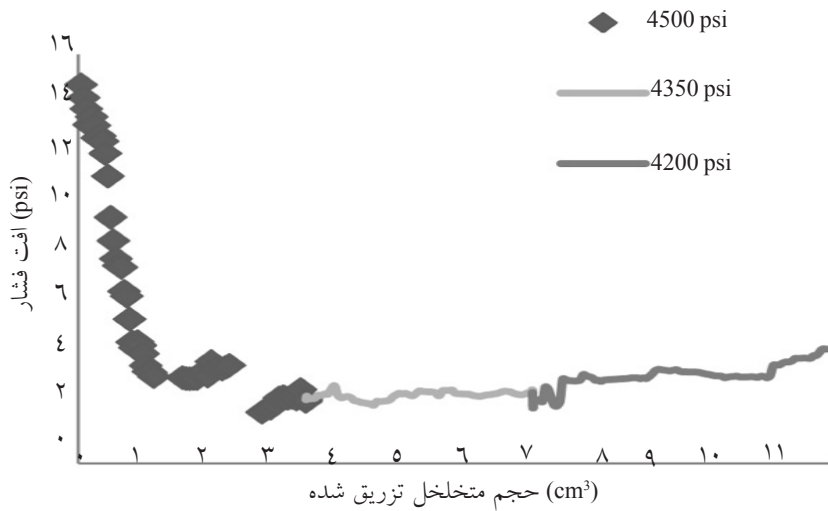
در شکل ۴، افت فشار دو سر مغزه در سومین مرحله فشاری (۴۲۰۰ psig) بر حسب حجم تزریق رسم شده است. با دقت در این نمودار مشاهده می‌شود که این نمودار را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. بخش اول این نمودار نشان دهنده افزایش فشار ناشی از کاهش فشار



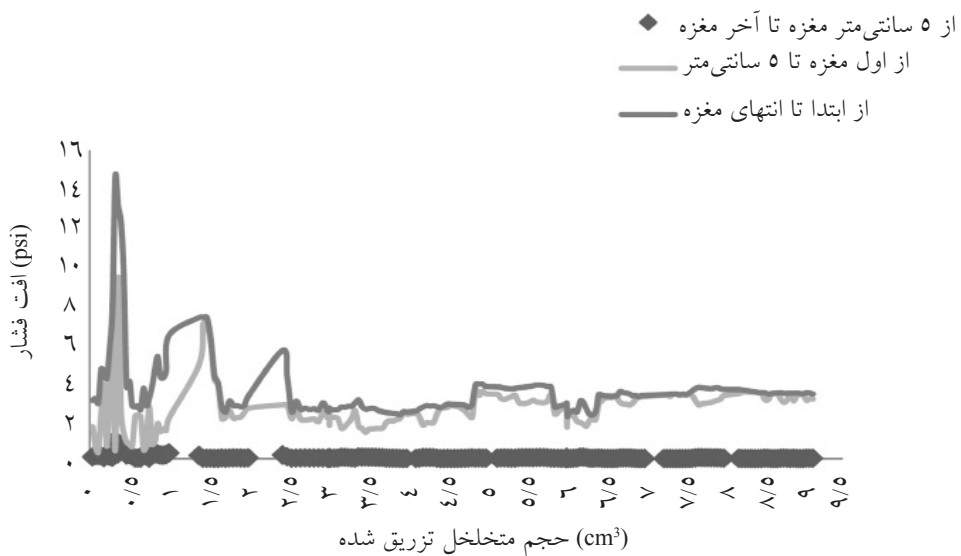
شکل ۳ - نمودار افت فشار دو سر مغزه بر حسب حجم حفره‌های تزریق شده در فشار ثابت ۴۳۵۰ psig



شکل ۴- نمودار افت فشار دو سر مغزه بر حسب حجم حفره‌های تزریق شده در فشار ثابت ۲۲۰۰ psig



شکل ۵- افت فشار دو سر مغزه در سه مرحله افت فشار



شکل ۶- اختلاف فشارهای ثبت شده در طول‌های مختلف مغزه

در اولین حجم متخلخل تزریقی قابل قبول نیست، زیرا ویسکوزیته سیال درون مغزه در این بازه مشخص نیست. شکل‌های ۸ تا ۱۰ نفوذپذیری آسیب دیده به نفوذپذیری اولیه را بر حسب زمان، به ترتیب در فشارهای ۴۲۰۰ psig، ۴۳۵۰ psig و ۴۵۰۰ psig نشان می‌دهد.

مکانیسم‌های کاهش نفوذپذیری شامل رسوب سطحی ذرات، انسداد گلوگاه‌ها و تشکیل فیلتر کیک می‌باشد که در صورت غالب بودن هر یک از این مکانیسم‌ها، رابطه نفوذپذیری با زمان داده شده است. در اکثر مواقع بیش از یک مکانیسم در کاهش نفوذپذیری مؤثر است، از این رو لازم به نظر می‌رسد تا مدلی توسعه یابد که وجود بیش از یک مکانیسم را به‌طور همزمان در نظر بگیرد.

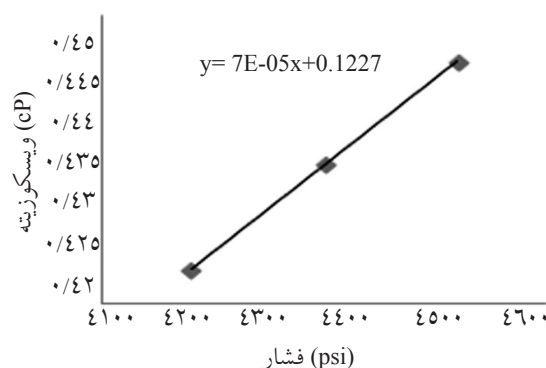
با توجه به توضیحات داده شده، با کمی دقت در شکل ۸ و رسم خط از بین داده‌ها و نظر به مکانیسم تشکیل فیلتر کیک می‌توان وجود این مکانیسم را در این بازه مشاهده کرد. با دقت در شکل ۹ و با توجه به اینکه در هر دو حالت مکانیسم‌های رسوب سطحی و انسداد گلوگاه‌ها از تقریب خوبی برخوردار هستند، می‌توان به تشکیل این دو مکانیسم در این بازه پی‌برد. همچنین در شکل ۱۰ نسبت نفوذپذیری آسیب دیده به زمان برای دو تا هشت حجم متخلخل تزریقی اولیه رسم شده و از بین داده‌ها خطی عبور داده شده است که با تقریب نسبتاً خوبی از روند داده‌ها پیروی کرده و حضور مکانیسم رسوب سطحی را تأیید کرده. در جدول ۴ پارامترهای مکانیسم‌های رسوب‌گذاری داخل مغزه پس از انجام آنالیز حساسیت ارائه شده است.

همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است، در اولین حجم متخلخل تزریقی، به دلیل ورود نفت زنده به درون مغزه، اختلاف فشارهای ثبت شده روند کاهشی دارد و تا زمانی که نفت مرده از مغزه خارج نشود، این روند مشاهده می‌شود. پس از این مرحله می‌توان اختلاف فشاری که به دلیل رسوب آسفالتین اتفاق می‌افتد را به وضوح دید. مطابق شکل، افزایش اختلاف فشار در ابتدای مغزه بیشتر از انتهای مغزه است که با نتایج مطالعات قبلی بر روی رسوب آسفالتین مطابقت دارد [۱۱ - ۱۳].

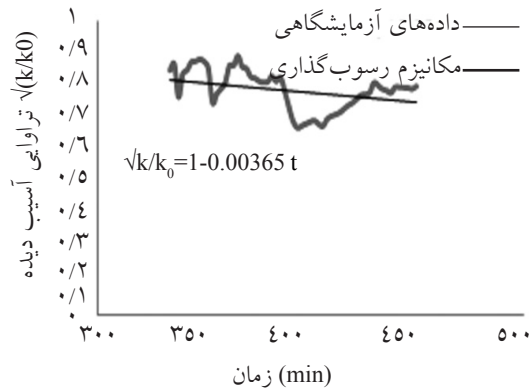
افزایش اختلاف فشار در دو سر مغزه در ابتدا به صورت ملایم است که می‌توان دلیل آن را به غالب بودن مکانیسم رسوب سطحی نسبت داد. بعد از تزریق حدود ۸ حجم سیال، افزایش ناگهانی در اختلاف فشار دو سر مغزه اتفاق می‌افتد. علت این پدیده را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که با رسوب سطحی ذرات آسفالتین، به تدریج قطر گلوگاه‌ها کاهش می‌یابد و پس از مدتی، پدیده انسداد گلوگاه‌ها یا تشکیل فیلتر کیک اتفاق می‌افتد این روند تا پایان ۹ حجم متخلخل تزریقی مشاهده می‌شود. در ادامه، افزایش اختلاف فشار، باعث از هم گسیختگی آسفالتین رسوب کرده خواهد شد و به طور موقت آسفالتین اجازه جریان خواهد یافت، در نتیجه رویه افزایش اختلاف فشار قطع می‌شود.

#### محاسبه کاهش تراوایی

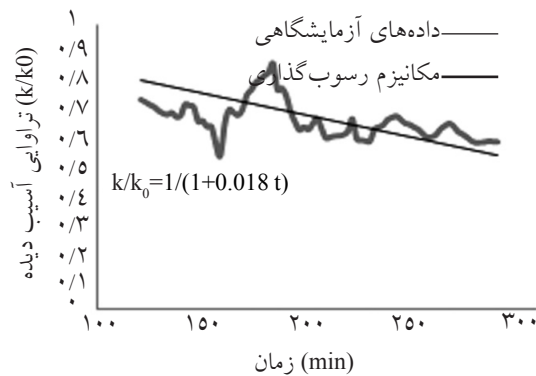
با استفاده از لزجت اندازه‌گیری شده با لزجت سنج موئینه که در شکل ۷ نشان داده شده و به کمک معادله دارسی، می‌توان نفوذپذیری مغزه را در اختلاف فشارهای ثبت شده محاسبه کرد. لزجت سیال با استفاده از معادله پویزله تعیین شده است. لازم به ذکر است که نفوذپذیری محاسبه شده



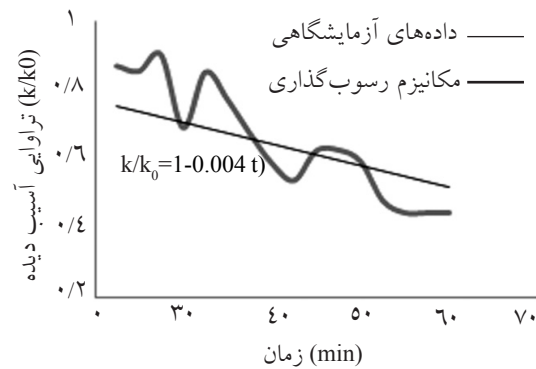
شکل ۷ - نمودار تغییرات لزجت نفت زنده بر حسب فشار



شکل ۸ - کاهش نفوذپذیری در فشار ۴۲۰۰ psig



شکل ۹ - کاهش نفوذپذیری در فشار ۴۳۵۰ psig



شکل ۱۰ - کاهش نفوذپذیری در فشار ۴۵۰۰ psig

جدول ۴ - نتایج به دست آمده از مکانیسم‌های رسوب

مکانیسم رسوب گذاری	معادله مدل	پارامترهای مدل $A, B, C \frac{1}{min}$	مجموع مربعات باقیمانده
تشکیل فیلتر کیک	$\frac{K}{K_0} = \frac{1}{1 + C \cdot t}$	۰/۰۱۸۴۶۲۳	۰/۰۳۷۴۲۱۸۴
رسوب سطحی ذرات	$\sqrt{\frac{K}{K_0}} = 1 - A \cdot t$	۰/۰۰۳۶۵۳۰۳	۰/۱۶۰۴۴۵۱۴
انسداد گلوگاه‌ها	$\frac{K}{K_0} = 1 - B \cdot t$	۰/۰۰۴۵۷	۱/۴۴۷۱۳۶۷۷۴



## محاسبه کاهش تخلخل

با استفاده از نمونه‌های جمع‌آوری شده در هر حجم تزریق، می‌توان میزان آسفالتین رسوب کرده در هر حجم تزریق را محاسبه کرد. رسوب آسفالتین باعث کاهش تخلخل مغزه می‌شود. بنابراین لازم است تخلخل مؤثر مغزه بعد از تزریق هر حجم سیال محاسبه شود. روش انجام این کار و روابط مورد استفاده به شرح زیر می‌باشد:

$$\varphi = \frac{V_p}{V_b} \quad (3)$$

$$V_p = V_{pi} - V_{da} \quad (4)$$

$$V_{da} = \frac{m_{da}}{\rho_a} \quad (5)$$

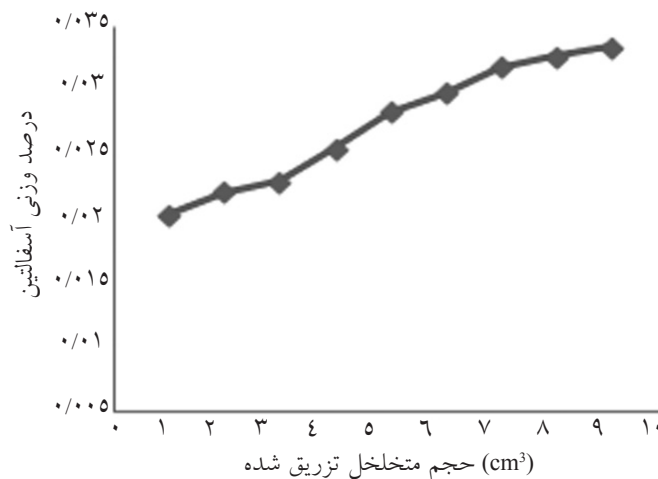
$$m_{da} = m_{oa} - m_{aof} \quad (6)$$

در واقع جرم آسفالتین نفت زنده قبل از ورود به مغزه و همچنین جرم آسفالتین نمونه خروجی پس از گذشتن از مغزه از تست IP 143 به دست می‌آید. روش به دست آوردن

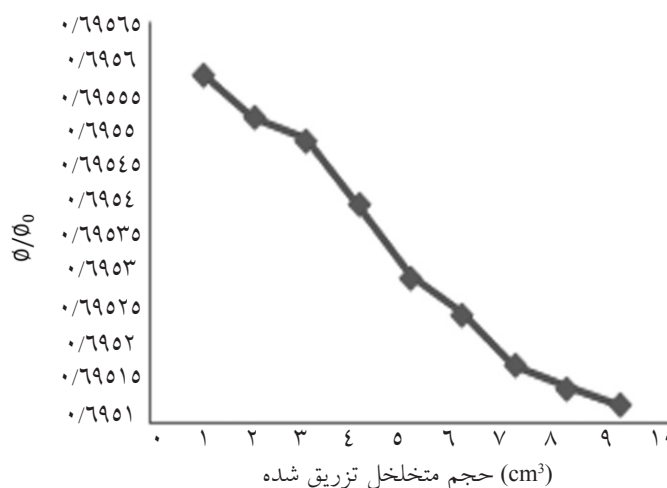
چگالی آسفالتین پیشتر به طور کامل توضیح داده شد. شکل ۱۱ نمودار میزان آسفالتین رسوب کرده در مغزه در هر حجم فضای متخلخل تزریقی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که طبق نمودارهای اختلاف فشار و کاهش نفوذپذیری انتظار می‌رفت، میزان رسوب آسفالتین در حجم فضاهای متخلخل انتهایی افزایش یافته که با کاهش شدید تراوایی در این بازه مطابقت دارد. شکل ۱۲ نمودار کاهش تخلخل بر حسب حجم متخلخل تزریقی را نشان می‌دهد.

## یافتن رابطه میان تغییرات تخلخل و نفوذپذیری

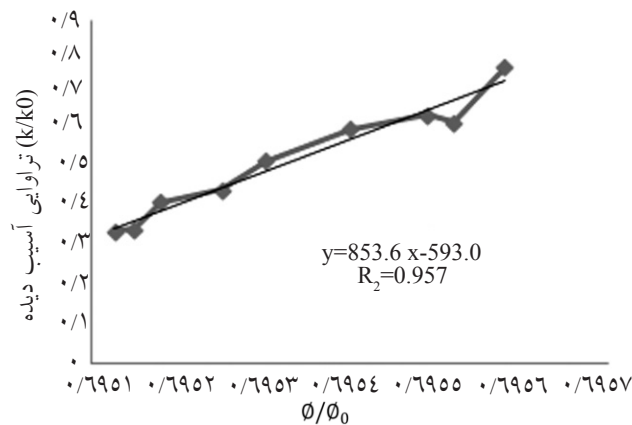
همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، منحنی رسم شده با دقت نسبتاً خوبی از میان نقاط محاسبه شده عبور کرده است و یک رابطه خطی میان نسبت کاهش نفوذپذیری و کاهش تخلخل مؤثر وجود دارد.



شکل ۱۱- درصد وزنی آسفالتین رسوب کرده در مغزه بر حسب حجم فضای متخلخل تزریق شده



شکل ۱۲- نسبت تخلخل آسیب دیده به تخلخل اولیه بر حسب حجم فضای متخلخل تزریق شده



شکل ۱۳- نمودار نفوذپذیری آسیب دیده بر حسب تخلخل آسیب دیده

مدت طولانی ادامه پیدا کند، قسمتی از رسوب آسفالتین تشکیل شده بر روی سطح متخلخل از سطح سنگ جدا شده و منجر به بهبود تراوایی آسیب دیده می‌شود. با افزایش نرخ جریان سیال، میزان رسوب بیشتری از سطح سنگ جدا می‌شود.

#### علائم و نشانه‌ها

- $I$ : نقطه برخورد نمودار با محور عمودی
- $m_{aof}$ : جرم آسفالتین در سیال خروجی (gr)
- $m_{da}$ : جرم آسفالتین رسوب کرده در مغزه (gr)
- $m_{oa}$ : جرم آسفالتین قبل از ورود به مغزه (gr)
- $S_0$ : شیب نمودار
- $V_{da}$ : حجم آسفالتین رسوب کرده در مغزه ( $\text{cm}^3$ )
- $V_p$ : حجم فضای خالی مغزه ( $\text{cm}^3$ )
- $k/k_0$ : نسبت نفوذ پذیری نسبی به نفوذپذیری اولیه
- $V_{pi}$ : حجم فضای خالی اولیه ( $\text{cm}^3$ )
- $X_A$ : جزء جرمی آسفالتین
- $\phi$ : تخلخل
- $\rho_a$ : چگالی آسفالتین رسوب کرده ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
- $\rho_A$ : چگالی مخلوط ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
- $\rho_M$ : چگالی تولوئن ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
- $\rho_T$ : میانگین چگالی آسفالتین ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر تخلیه طبیعی بر کاهش تراوایی در یک مغزه ماسه سنگی و در فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به داده‌هایی که از اختلاف فشار ابتدا و انتهای مغزه مشاهده شد، به دلیل جایگزینی نفت زنده به جای نفت مرده در اولین حجم تزریقی به مغزه، این داده‌ها دارای خطای بسیار زیادی بوده و از آنها صرف نظر شد. همچنین در این داده‌ها شاهد یک کاهش و یک افزایش شدید در انتهای اولین حجم تزریق هستیم، ولی در ادامه افزایش یکنواخت افت فشار دیده می‌شود. دلیل این امر ممانعت شدید نمونه ماسه سنگی از ورود سیال به درون آن و لزجت پایین نفت می‌باشد. این آزمایشات همچنین نشان داد که فاکتور زمان یک عامل مؤثر در تغییر ضرایب رسوب سطحی ذرات و مسدود شدن فضاهای متخلخل می‌باشد.

طی اولین حجم متخلخل تزریقی، تمامی اختلاف فشارهای ثبت شده روند کاهشی دارد و تا زمانی که تمام نفت مرده از مغزه خارج نشود، این روند مشاهده می‌شود که در نتیجه ورود نفت زنده به درون مغزه است. پس از این مرحله می‌توان اختلاف فشاری که به دلیل رسوب آسفالتین اتفاق می‌افتد را به وضوح مشاهده کرد. افزایش اختلاف فشار در دو سر مغزه در ابتدا به صورت ملایم است که می‌تواند به دلیل غالب بودن مکانیسم رسوب سطحی باشد.

نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که پس از مسدود شدن گلوگاه‌ها، هنگامی که جریان سیال در داخل مغزه برای

## مراجع

- [1]. Hematfar V, Bagheri M., *Optimization Assisted Asphaltene Deposition Modeling in Porous Media During a Natural Depletion Scheme*, Petrol. Sci. Technol, 2012.
- [2]. Soleimany-Nazar A. R. and Zonnouri A. "Modeling of asphaltene deposition in oil reservoirs during primary oil recovery", Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011.
- [3]. Bagheri M. B., *Experimental Investigation of the Asphaltene Deposition Process during Different Production Schemes*, Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP Energies Nouvelles, 2011.
- [4]. Bagheri M. B., *Experimental study and mathematical modeling of Asphaltene deposition in porous media*, PhD dissertation Sharif university of Technology, Tehran, 2010.
- [5]. Papadimitriou N. I., Romanos G.E., Charalambopoulou G.Ch., Kainourgiakis M.E., Katsaros F.K. and Stubos A.K., "Experimental investigation of asphaltene deposition mechanism during oil flow in core samples", Journal of Petroleum Science and Engineering 57, 281–293, 2007.
- [6]. Garrouch A. A. and Al-Ruhaimani Feras A. "Simple Models for Permeability Impairment in Reservoir Rocks Caused by Asphaltene Deposition", Petrol. Sci. Technol. 23, 7-8, pp. 811-826, 2005.
- [7]. Sim S. S. A., Takabayashi K., Okatsu K. and Fisher D., "Asphaltene-Induced Formation Damage: Effect of Asphaltene Particle Size and Core Permeability", SPE Paper 95515 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, U.S.A., 2005.
- [8]. Wang S., Civan F., "Modeling Formation Damage by Asphaltene Deposition during Primary Oil Recovery", J. Energ. Resour.-ASME127, pp. 310-317, 2005.
- [9]. Nghiem L. X., Kohse B. F., Farouq A. S. M. and Doan Q. "Asphaltene precipitation: modeling and compositional simulation", SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modeling for Asset Management, Yokohama, Japan, April 25-26, 2000.
- [10]. Kabir C. S. and Jamaluddin A. K. M., "Asphaltene Characterization and Mitigation in South Kuwait's Marrat Reservoir", SPE Middle East Oil Show, Bahrain, pp. 20-23, Febr., 1999.
- [11]. Leontaritis K. J., Amaefile J. O. and Charles R. E. A., "Systematic Approach for the Prevention and Treatment of Formation Damage Caused by Asphaltene Deposition", SPE International Symposium on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, pp. 26-27, Febr. 1992.
- [12]. Burke N. E., Hobbs R. D. and Kashou S. F. "Measurement and modeling of asphaltene precipitation from live reservoir fluid systems", 63rd SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 26, Oct. 1989.
- [13] Buckley J. S., "Wetting Alternation of Solid Surfaces by Crude Oils and their Asphaltenes", Oil Gas Sci. Technol. - Rev. IFP 53, 3, pp. 303-312, 1998.