

# بررسی آزمایشگاهی تاثیر فشار تزریق بر میزان آسیب دیدگی سازند ناشی از نشست رسوب آسفالتین در فرآیند تزریق گاز طبیعی به مخزن

عباس شهرآبادی<sup>۱\*</sup>، مسعود نصیری<sup>۲</sup>، کاوه خانلری<sup>۲</sup> و سعید عباسی<sup>۱</sup>

۱- طرح‌های پژوهش و فناوری ازدیاد برداشت، پژوهشکده مهندسی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۱۶

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۱۵

## چکیده

نظر به اینکه اکثریت مخازن نفتی ایران دوره تخلیه طبیعی خود را پشت سر گذاشته‌اند، استفاده از روش تزریق انواع گازها در عملیات ازدیاد برداشت ضروری به نظر می‌رسد. تشکیل رسوب‌های آلی همانند آسفالتین و به دنبال آن نشست بر روی سنگ مخزن در حین فرآیند تزریق گاز به جهت آسیبی که به سازند وارد می‌کند، یک مشکل جدی محسوب می‌شود. لذا لازم است قبل از انجام پروژه‌های تزریق گاز، مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از سیال و سنگ همان مخزن انجام و پس از تحلیل نتایج به‌دست آمده و شبیه‌سازی مخزن پروژه در مقیاس میدانی انجام پذیرد. در این تحقیق اثر فشار تزریق گاز طبیعی بر پدیده تشکیل رسوب و نشست آسفالتین و تغییر خواص مغزه مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های نفت مورد استفاده در این آزمایشات، نفت زنده یکی مخازن ایران می‌باشد. در این آزمایشات کاهش تراوایی مغزه، قبل و بعد از تزریق گاز تعیین گردیده است. همچنین در زمان‌های مختلف از سیال تولیدی نمونه‌گیری و با روش‌های استاندارد IP143 میزان آسفالتین هر نمونه مشخص گردید. با استفاده از موازنه جرم، کاهش تخلخل مغزه محاسبه و رابطه توانی بین تراوایی سنگ آسیب دیده و تخلخل مغزه آسیب دیده در آزمایشات به‌دست آمد. نتایج حاصل شده از این پژوهش نشان می‌دهد تزریق گاز طبیعی به مغزه باعث رسوب شدید آسفالتین در مغزه و نشست آن بر روی سنگ شده که سبب کاهش تراوایی سنگ خواهد گردید. با کاهش فشار تزریق گاز این آسیب دیدگی کاهش می‌یابد که تحلیل‌ها موید آن است که عمده مکانیسم رسوب انسداد مکانیکی حفرات سنگ می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** نشست آسفالتین، آسیب سازند، تراوایی، تزریق گاز، سیلاب‌زنی مغزه، گاز طبیعی

## مقدمه

تراوایی سنگ مخزن در حین عملیات مختلف از جمله تولید، حفاری، ایجاد شکاف هیدرولیکی و عملیات تعمیر چاه می‌شوند [۱]. نظر به اینکه آسیب دیدگی سازند لزوماً برگشت پذیر نیست لذا بهتر است که از تخریب سازند اجتناب شود.

آسیب دیدگی سازند در اصطلاح فنی به فرآیندهای مخربی اطلاق می‌شود که باعث آسیب زدن به

و تولوئن حل می‌شوند. این عدم انحلال آسفالتین در مایعات پارافینی سبک و بقیه سیالات ناسازگار مثل گاز هیدروکربوری، منبع ایجاد مشکلات در عملیات تولید بعضی از انواع نفت خام می‌باشد. آسفالتین به صورت حل شده یا به فرم قطرات معلق پراکنده شده در نفت که با رزین جذب شده در سطح پایدار شده‌اند، وجود دارد. نسبت آسفالتین به رزین و بالا یا پایین بودن نسبت جرم مولکولی تعیین کننده توانایی نفت خام در رسوب آسفالتین می‌باشد. در تزریق گاز با توجه به حل شدن مقداری از رزین‌ها در گاز نسبت آسفالتین به رزین نفت خام تغییر می‌کند که منجر به ایجاد رسوب می‌گردد. این فرآیند شامل چند مرحله است که اولین مرحله آن لخته شدن می‌باشد. این رسوبات می‌توانند باعث تغییر ترشوندگی و تراوایی سنگ مخزن شوند. در نتیجه عملکرد جریانی را تحت تاثیر قرار دهند علاوه بر این اثرات مخربی نیز در اطراف چاه و تجهیزات سرچاهی ایجاد می‌کنند [۴ و ۵]. برای بررسی احتمال رسوب آسفالتین در سازند می‌توان از آزمایشات دینامیکی تزریق به مغزه و در حالت استاتیک از سل‌های آزمایشگاه خواص سیال استفاده نمود. مطالعه آزمایش‌های انجام شده توسط دیگر محققین و الگو گرفتن از روش‌های آنها برای طراحی آزمایشات بسیار سودمند خواهد بود.

آزمایشات تزریق گاز در مغزه که توسط ونگ و یونگان انجام گرفت مشتمل بر ۹ آزمایش سیلاب‌زنی با دی‌اکسید کربن تحت شرایط غیرامتزاجی و امتزاجی با مغزه‌های ماسه سنگ و با تراوایی پایین بود. دبی تزریق گاز ۰/۴ cc/min، در شرایط دمایی ۲۷°C و تا ۳ برابر حجم حفرات در هر آزمایش گاز تزریق گردید. نتایج کار حاکی از آن است که در تزریق ثانویه دی‌اکسید کربن در حالت امتزاجی و زمانی که فشار بین آستانه رسوب آسفالتین تا حداقل فشار امتزاجی می‌باشد، بیشترین مقدار بازیافت نفت را شاهد هستیم [۶].

تهیه مدل فیزیکی تخریب سازند، طراحی آزمایشگاهی با در نظر گرفتن جزئیات و آزمایش میدانی می‌تواند یک راهنمای عملی فراهم کند و به گسترش شیوه‌های مفیدتر برای جلوگیری از تخریب سازند یا حداقل کردن آن کمک نماید. بنیون<sup>۱</sup> مکانیسم‌های متداول تخریب سازند را به صورت خلاصه، طبقه‌بندی نموده است [۲]. بر اساس این طبقه‌بندی، یکی از مکانیسم‌های آسیب سازند مکانیسم مکانیکی است که در اثر مهاجرت ذرات، حرکت ذرات جامد چه جامدات ارگانیکی و غیر ارگانیکی در محیط متخلخل است.

در عملیات ازدیاد برداشت از مخازن نفتی، یکی از روش‌های بسیار موثر، تزریق گاز به صورت امتزاجی به مخازن نفتی می‌باشد. معمولاً پس از بازیافت ثانویه مقداری نفت در مخزن باقی می‌ماند که این نفت عمدتاً به صورت قطراتی داخل حفره‌های سنگ به تله می‌افتند. روش تزریق گاز، این قطرات جدا افتاده نفت را به حرکت درآورده و یک جبهه نفتی به طرف چاه تولیدی شکل می‌دهد [۳].

در تزریق گازهای هیدروکربوری به مخزن نفتی می‌توان از گازهای مختلف رقیق و غنی بهره برد. ترکیبات غنی شامل پروپان، بوتان و گازهای رقیق شامل متان و اتان می‌باشند [۴ و ۵].

یکی از مسائل مهم در تزریق امتزاجی گازهای هیدروکربوری، ارزیابی احتمال تشکیل رسوب آسفالتین و اثر آن بر روی تولید می‌باشد. آسفالتین به طور کلی جزء هیدروکربنی قطبی، پلی آروماتیک<sup>۲</sup> و با جرم مولکولی بالا در نفت خام می‌باشد. آسفالتین‌ها در تعادلی حساس با دیگر اجزاء نفت خام (اشباع‌ها، آروماتیک‌ها و رزین‌ها) قرار دارند و معمولاً شامل هترواتم‌هایی مانند گوگرد، اکسیژن و نیتروژن و فلزاتی مانند نیکل، وانادیم و آهن در ساختار مولکولی خود هستند. آنها در هیدروکربن‌های پارافینی مثل هپتان قابل حل نیستند، ولی در حلال‌های آروماتیک مانند زایلین

1. Benion

2. Polyaromatic

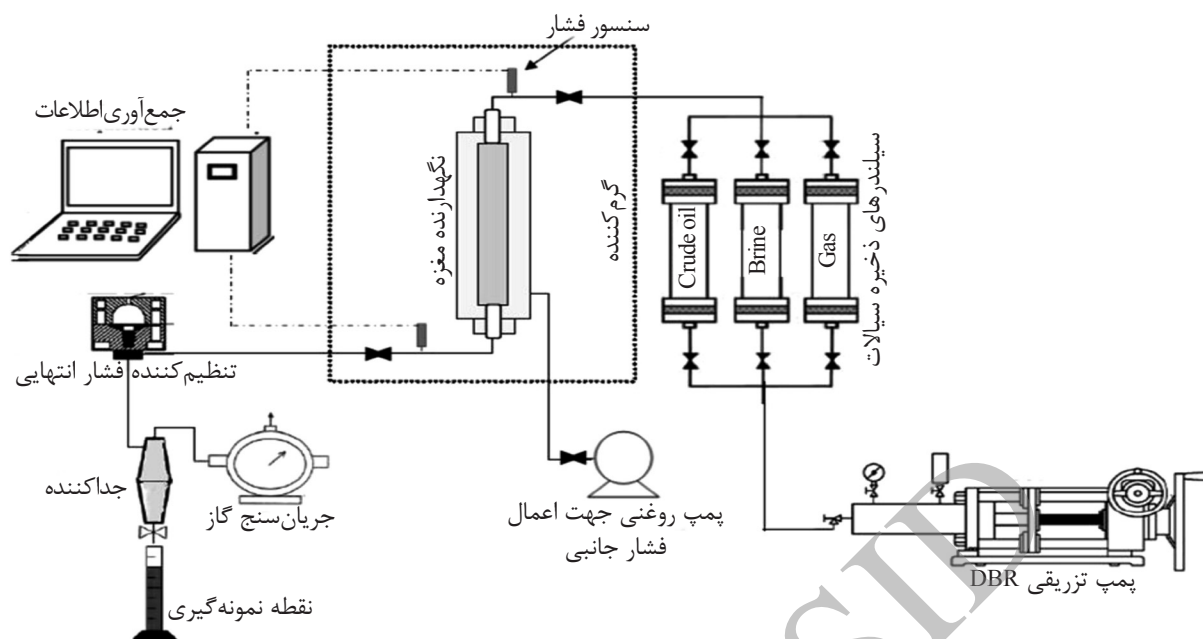
بررسی مطالعات قبلی ملاحظه می‌گردد، در اکثر آزمایشات سیلاب‌زنی از گاز دی‌اکسیدکربن و نفت مرده استفاده و کمتر از نفت زنده مخزن استفاده شده است. در بعضی از آزمایشات بستر شنی جهت محیط متخلخل استفاده شده است. در این تحقیق سعی گردیده تا حد ممکن به شرایط موجود در مخزن نزدیک شویم، به همین جهت از نفت زنده مخزن و سنگ همان مخزن در آزمایشات استفاده گردید. از طرفی با توجه به اینکه اخیراً بازگردانی گاز همراه به مخزن با هدف افزایش برداشت مد نظر می‌باشد لذا از گاز همراه تولیدی از مخزن جهت تزریق گاز استفاده گردید. نکته‌ای که قابل ذکر است در بیشتر آزمایشات هدف از تزریق گاز، تغییر در میزان بازیافت نفت بوده است در حالی که در این مطالعه آزمایشگاهی مشکلات ناشی از تزریق گاز بیشتر مورد نظر بوده است چرا که هدف از تزریق گاز افزایش بازیافت می‌باشد در حالی که این تزریق ممکن است منجر به نتایج نامطلوبی همچون آسیب سنگ مخزن و نهایتاً کاهش تولید گردد. بنابراین در این مطالعه تجهیزات آزمایشگاهی جهت انجام آزمایشات سیلاب‌زنی برپا گردید و آزمایشات تزریق گاز طبیعی به منظور بررسی اثر تشکیل رسوب آسفالتین در شرایط دینامیک در مغزه انجام پذیرفت که در ادامه به روش انجام آزمایشات و نتایج آنها پرداخته می‌شود.

### تجهیزات آزمایشگاهی

جهت انجام آزمایشات تزریق، از سیستم سیلاب‌زنی مغزه که شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است استفاده گردید. اجزای مختلف این سیستم عبارتند از: دستگاه مغزه نگهدارنده، پمپ تزریق، سیلندرهای نگهدارنده سیال، شیرهای تنظیم کننده فشار و دستگاه جمع‌آوری ثبت اطلاعات. دستگاه نگهدارنده مغزه مورد استفاده قابلیت تحمل فشار ۹۰۰۰ psia و دمای ۲۰۰ °C را دارد.

دهقانی و همکاران به بررسی تاثیر رسوب آسفالتین حین تزریق گاز طبیعی در محیط متخلخل ناپیوسته<sup>۱</sup> از نوع بستر شنی پرداخته‌اند. در سیستم آزمایشگاهی آنها تخلخل و تراوایی محیط متخلخل بسیار بالا بود. آنها از نفت مرده استفاده نموده و گاز مورد استفاده برای تزریق، گاز طبیعی بوده است [۷]. تاکاهاشی و همکاران نیز به بررسی تشکیل رسوب آسفالتین در دو مغزه از نوع ماسه سنگ با تراوایی بالا و کربناته با تراوایی پایین پرداخته‌اند. آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه در فشار ۳۵۰۰ psig و دمای ۲۱۲ °F انجام پذیرفته است. ابتدا مغزه با آب نمک اشباع شده، نفت در فشار اشباع تزریق گردیده و تراوایی موثر سنگ اندازه‌گیری شده است. مقدار آسفالتین در نفت زنده ۳۶٪ وزنی می‌باشد گاز تا ۴ برابر حجم تخلخل تزریق شده است. [۸]. هوانگ و همکاران به بررسی تزریق گاز دی‌اکسیدکربن در مخزن و امتزاج‌پذیری آن پرداختند [۹]. هدف آنها بررسی آزمایشگاهی برهم‌کنش بین نفت خام و دی‌اکسیدکربن در فشارهای مختلف و تاثیر آن روی کشش بین سطحی نفت-گاز بود. آزمایشات سیلاب‌زنی برای بررسی تاثیر برهم‌کنش بین نفت خام و دی‌اکسیدکربن روی ضریب بازیافت در فشارهای تزریق متفاوت انجام شد. آزمایشات نشان داد که ضریب بازیافت با دی‌اکسیدکربن به شدت با افزایش فشار تزریق افزایش می‌یابد [۱۰]. ذکری، الم‌حیدب و شدید بازده جابه‌جایی غیر امتزاجی توسط دی‌اکسیدکربن در مخزن کربناته با تراوایی پایین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی غیرامتزاجی حتی در محیط با تراوایی پایین بازده جابه‌جایی قابل قبولی دارد [۱۱]. ساریواستاوا و همکاران نیز با انجام آزمایشات سیلاب‌زنی به بررسی اثر آسیب دیدگی سازند پرداختند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که رسوب آسفالتین و نشست آن بر روی سنگ مخزن به پارامتر تراوایی مغزه بستگی دارد. مغزه دارای شکاف‌های واگی با تراوایی بالاتر، رسوب بالاتری را در حین تزریق گاز نشان می‌دهد [۱۲]. همان‌گونه که از

1. Unconsolidated Porous Media



شکل ۱- شماتیک سیستم تزریق گاز به مغزه

پس از اطمینان از رسیدن دمای مغزه و آب به دمای مخزن، تراوایی مطلق سنگ توسط تزریق آب به مغزه در سه دبی انجام می‌پذیرد. در ادامه نفت زنده مخزن به سنگ تزریق، تا مغزه از نفت اشباع شود. در مرحله بعدی تزریق گاز در دمای مخزن، بالاتر از حداقل فشار امتزاجی شروع و تزریق می‌گردد. تزریق تا زمانی که نفت دیگری از سیستم خارج نشود ادامه خواهد داشت. به منظور اندازه‌گیری مقدار آسفالتین موجود در نفت خروجی، از نفت تولیدی به صورت متناوب در زمان‌های مختلف نمونه‌گیری می‌شود و محتویات آسفالتین آن با استفاده از روش استاندارد IP143 اندازه‌گیری می‌شود. همچنین محتویات آسفالتین نفت خام مورد مطالعه نیز در ابتدا با استفاده از همین روش تعیین گردید که مقدار آن معادل ۰/۵٪ وزنی محاسبه گردید. در انتهای آزمایش با تزریق دوباره نفت یا حلالی که موجب رسوب آسفالتین یا حل شدن آن نشود، تراوایی در کل مغزه اندازه‌گیری می‌شود. تراوایی در این مرحله از روش قانون داریسی محاسبه و ثبت می‌گردد.

### سنگ و سیال مورد استفاده

جهت انجام آزمایشات تزریق گاز از یک نمونه نفت زنده مربوط به یکی از مخازن کشور استفاده گردید که ترکیب آن در جدول ۱ آمده است. همچنین ترکیب گاز تزریقی نیز در جدول ۲ در دسترس می‌باشد.

مغزه مورد استفاده در انجام این آزمایشات از نوع ماسه سنگ<sup>۱</sup> است که مشخصات کلی آن در جدول ۳ داده شده است.

### روش انجام آزمایشات

در این تحقیق جهت بررسی تاثیر فشار تزریق بر میزان آسیب‌دیدگی سازند در اثر رسوب و نشست مواد آلی آسفالتینی دو آزمایش سیلاب‌زنی گاز طبیعی به صورت یک بعدی در مغزه ماسه سنگی انجام پذیرفت. به منظور انجام یک آزمایش تزریق گاز مراحل زیر به ترتیب صورت پذیرفت:

در ابتدا سنگ مخزن توسط آب مخزن ۱۰۰٪ اشباع و به دستگاه نگهدارنده مغزه منتقل می‌شود. لازم است دمای سنگ، به دمای مخزن رسانده شود.

1. Sandstone

جدول ۲- ترکیب درصد گاز مورد استفاده در آزمایشات تزریق

جزء	% مولی
C <sub>1</sub>	۷۴/۴۵
C <sub>2</sub>	۹/۲۳
C <sub>3</sub>	۴/۸۴
CO <sub>2</sub>	۳/۷۹
iC <sub>4</sub>	۰/۷۰۳۳
nC <sub>4</sub>	۱/۷۵۲
iC <sub>5</sub>	۰/۵۳۶۸
nC <sub>5</sub>	۰/۶۵
C <sub>6</sub>	۰/۱۸۵۱۵
C <sub>7</sub>	۰/۶۵
C <sub>8</sub> +	۰/۲۵۲
H <sub>2</sub> S	۰/۱۳۸۴
N <sub>2</sub>	۰/۰۹۵۳
کل	۱۰۰

جدول ۱- ترکیب نفت خام

جزء	درصد مولی
H <sub>2</sub> S	۰/۲۷
N <sub>2</sub>	۰/۰۷
CO <sub>2</sub>	۲/۹۵
C <sub>1</sub>	۴۹/۰۱
C <sub>2</sub>	۸/۲۸
C <sub>3</sub>	۵/۵۴
iC <sub>4</sub>	۱/۰۱
nC <sub>4</sub>	۲/۵۵
iC <sub>5</sub>	۰/۷۴
nC <sub>5</sub>	۰/۸۲
C <sub>6</sub>	۳/۱۸
C <sub>7</sub>	۲/۵۷
C <sub>8</sub>	۲/۶۴
C <sub>9</sub>	۲/۲۷
C <sub>10</sub>	۲/۱۷
C <sub>11</sub>	۱/۴۷
C <sub>12</sub> <sup>+</sup>	۱۴/۴۶
کل	۱۰۰

جدول ۳- مشخصات مغزه

نوع سنگ	طول (cm)	قطر (cm)	تخلخل (%)	نفوذپذیری مطلق (md)
ماسه سنگ	۸/۳۴۵	۳/۸۸۶	۲۰/۱۵۲	۵/۰۴۲

### نتایج و بحث

در این بخش تمامی داده‌هایی که از آزمایشات سیلاب‌زنی مغزه به‌دست آمد مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت. همان‌گونه که قبلاً ذکر گردید دو سری آزمایش با فشار تزریق متفاوت، طبق روش شرح داده شده در بخش قبل انجام شده است.

جدول ۴- نتایج آزمایشات قبل از تزریق گاز

محتوی آسفالتین نفت خام	% wt ۰/۵
فشار نقطه شروع آسفالتین	۵۰۵۰ psi
حداقل فشار امتزاجی	۴۲۸۰ psi

قابل ذکر است پیش از انجام آزمایشات تزریق لازم است فشار نقطه شروع رسوب آسفالتین<sup>۱</sup> در خصوص سیال مخزن مورد نظر، همچنین حداقل فشار امتزاجی گاز تزریقی در نفت مخزن اندازه‌گیری شود. حداقل فشار امتزاجی گاز مورد استفاده در نفت توسط دستگاه لوله قلمی<sup>۲</sup> با اندازه‌گیری بازیافت نفت در اثر تزریق گاز طبیعی در چند فشار و نهایتاً با رسم منحنی بازیافت نهایی در فشارهای مختلف تعیین گردید که مقدار آن ۴۲۸۰ psi به‌دست آمد. همچنین برای اندازه‌گیری مقدار فشار نقطه شروع آسفالتین از دستگاه سل SDS<sup>۳</sup> استفاده گردید. چون در این مطالعه تزریق امتزاجی مد نظر می‌باشد فشار تزریق باید بالاتر از فشار امتزاجی در نظر گرفته شود. این نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است.

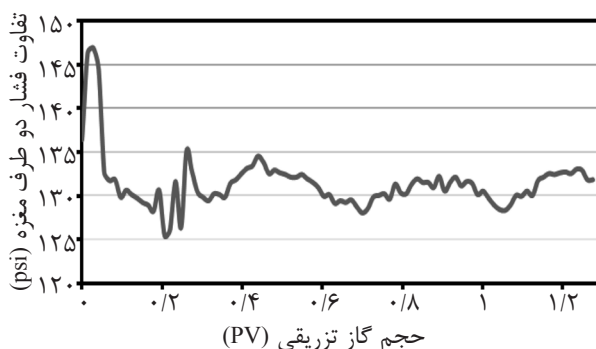
1. Asphaltene Onset Pressure  
2. Slim Tube  
3. Solid Detection System

## آزمایش اول

در این آزمایش فشار تزریق معادل ۵۵۰۰ psia در نظر گرفته شده است. در این آزمایش و آزمایش بعدی فشار تزریق از حداقل فشار امتزاجی گاز طبیعی در داخل نفت بالاتر می‌باشد، هر چند انتظار می‌رود که در آزمایشات در تمام طول مغزه به حالت امتزاجی دست یابیم ولی داده‌های به‌دست آمده از تست تزریق گاز و منحنی‌های افت فشار بر حسب زمان نشان‌دهنده وجود دو سیال مجزا در مغزه است که شاهد آن است که در بخش‌هایی از مغزه حالت کاملاً امتزاجی برقرار نمی‌باشد که در ادامه در مورد آن بحث خواهد گردید. آزمایش در دمای مخزن انجام پذیرفت. قبل از انجام آزمایش تزریق، لازم است تراوایی آب را محاسبه نماییم، آب مورد استفاده در این آزمایش نمونه آب سازند بود که توسط همین گروه نمونه‌گیری شده است. جهت محاسبه تراوایی، آب سازند در فشار ۵۰۰ psi و دمای ۳۲ °C تزریق گردید و با استفاده از رابطه دارسی مقدار تراوایی آب معادل ۱/۸۸۳ md محاسبه گردید.

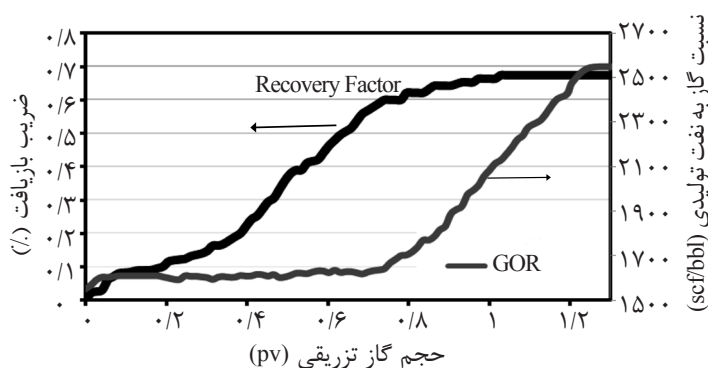
بعد از آن که سیستم به دما و فشار مورد نظر برای انجام آزمایش تزریق رسید، به ترتیب نفت و گاز و دوباره همان نفت، تزریق می‌گردد. حال به بررسی تغییر پارامترهای مختلف در حین تزریق گاز پرداخته می‌شود. مهم‌ترین پارامتری که در طول انجام آزمایش تغییرات آن ثبت می‌گردد افت فشار در طول مغزه است که نمودار آن در شکل ۲ آمده

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا افزایش ناگهانی اختلاف فشار دو سر مغزه را خواهیم داشت که می‌تواند به دلیل تغییر در نوع جریان باشد. به این گونه که در ابتدا قبل از تزریق سیال داخل مغزه سیستم در حالت سکون بوده و بالطبع افت فشار در دو سر مغزه صفر می‌باشد. با باز نمودن شیر متصل به خط لوله محتوی گاز سیستم به حالت غیر پایدار رسیده و ممکن است گاز کانالیزه شده و حتی در اثر افت فشار بالا از سیستم خارج شود. این حالت در زمان‌های اولیه پس از تزریق به وجود می‌آید. با گذشت زمان این حالت از بین رفته و به حالت پایدار نزدیک می‌شویم و در نتیجه افت فشار به حالت معقولی خواهد رسید. لازم به ذکر است در این آزمایش افت فشار تا تزریق مقدار ۰/۷ حجم حفره<sup>۱</sup> از گاز طبیعی بین ۱۲۵-۱۳۵ psi نوسان دارد که ظاهراً به علت وجود سیستم دو فازی در مغزه می‌باشد. با وجودی که فشار بالای حداقل فشار امتزاج می‌باشد و ناحیه‌ای امتزاجی در مغزه وجود دارد ولیکن در قسمتی از مغزه هنوز گاز و نفت به صورت مجزا جریان دارند و لذا نوسان در افت فشار مشاهده می‌شود. این حالت در تمام آزمایش‌ها به وضوح دیده می‌شود. در شکل ۳ نمودار ضریب بازیافت و نسبت گاز به نفت برحسب میزان گاز تزریقی ترسیم شده است. ضریب بازیافت در اثر تزریق گاز افزایش می‌یابد. در حالی که نسبت گاز به نفت تولیدی مقداری ثابت است.



شکل ۲- افت فشار در طول تزریق گاز در آزمایش اول





شکل ۳- نتایج گاز به نفت تولیدی و ضریب بازیافت در طول تزریق گاز

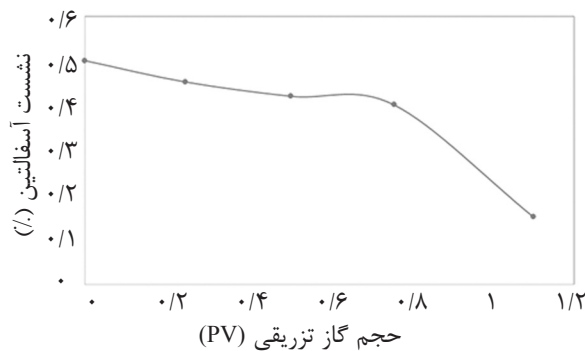
این نشانه آن است که هنوز گاز تزریقی میان شکن<sup>۱</sup> نشده است. ولی همان گونه که مشاهده می شود در این فشار تزریقی پس از تزریق حدود ۰.۷۵٪ حجم حفره با افزایش نسبت گاز به نفت تولیدی مواجه هستیم و با توجه به اینکه ضریب بازیافت به مقدار ثابتی رسیده به معنی میان شکن شدن گاز تزریقی می باشد. در زمان میان شکنی گاز مقدار بازیافت نفت معادل ۰.۶۵٪ می باشد. همان گونه که قبلا ذکر گردید این مقدار بازیافت نشان می دهد در قسمتی از مغزه شرایط امتزاجی کامل برقرار نگردیده است. هر چند در قسمت اعظم سنگ ناحیه امتزاجی وجود دارد ولی در هر حال در بخش هایی از سیستم دو فاز مجزا در سیستم در جریان بوده اند. در صورت رسیدن به امتزاج کامل به مقادیر بازیافت بالاتری نیز در مغزه می توان رسید. نکته قابل توجه دیگر رسیدن به بازیافت حدود ۰.۶۰٪ با تزریق حدود ۰.۷۵٪ حجم تزریقی از گاز می باشد، که یکی از دلایل آنرا می توان در عدم امتزاج پذیری کامل همان گونه که توضیح داده شد نسبت داد و از طرفی مقداری از گاز تزریقی متراکم شده و صرف فشار افزایشی خواهد گردید و بالطبع از رسیدن به بازیافت بالاتر جلوگیری خواهد شد.

این نشانه آن است که هنوز گاز تزریقی میان شکن<sup>۱</sup> نشده است. ولی همان گونه که مشاهده می شود در این فشار تزریقی پس از تزریق حدود ۰.۷۵٪ حجم حفره با افزایش نسبت گاز به نفت تولیدی مواجه هستیم و با توجه به اینکه ضریب بازیافت به مقدار ثابتی رسیده به معنی میان شکن شدن گاز تزریقی می باشد. در زمان میان شکنی گاز مقدار بازیافت نفت معادل ۰.۶۵٪ می باشد. همان گونه که قبلا ذکر گردید این مقدار بازیافت نشان می دهد در قسمتی از مغزه شرایط امتزاجی کامل برقرار نگردیده است. هر چند در قسمت اعظم سنگ ناحیه امتزاجی وجود دارد ولی در هر حال در بخش هایی از سیستم دو فاز مجزا در سیستم در جریان بوده اند. در صورت رسیدن به امتزاج کامل به مقادیر بازیافت بالاتری نیز در مغزه می توان رسید. نکته قابل توجه دیگر رسیدن به بازیافت حدود ۰.۶۰٪ با تزریق حدود ۰.۷۵٪ حجم تزریقی از گاز می باشد، که یکی از دلایل آنرا می توان در عدم امتزاج پذیری کامل همان گونه که توضیح داده شد نسبت داد و از طرفی مقداری از گاز تزریقی متراکم شده و صرف فشار افزایشی خواهد گردید و بالطبع از رسیدن به بازیافت بالاتر جلوگیری خواهد شد.

معمولا رابطه بین تراوایی و تخلخل به صورت توانی زیر می باشد:

$$k \propto \phi^n \quad (1)$$

معادلاتی همچون معادله کوزنی- کارمان و یا معادله بلیک- پلومر نشان دهنده ارتباط فوق با نمای ۳ است [۱۳].



شکل ۴- آسفالتین خروجی در طول تزریق گاز

بررسی آسیب سازند می‌باشد. که در این آزمایش مقدار آن قبل و بعد از آزمایش محاسبه و مقادیر آن در جدول ۶ گزارش شده است. مراجعه به نتایج نشان‌دهنده کاهش آن در حدود ۱۵٪ می‌باشد که نشان‌دهنده آسیب دیدگی جدی سنگ مخزن در فرآیند تزریق گاز می‌باشد. زیرا اساساً هدف از انجام فرآیند تزریق گاز به مخزن افزایش برداشت نفت می‌باشد، در صورتی که تزریق گاز در این آزمایش باعث کاهش ۱۵٪ تراوایی سنگ شده و لذا این مقدار را می‌توان در این فرآیند تخریب قابل ملاحظه در نظر گرفت.

#### آزمایش دوم

در این آزمایش فشار تزریق در حدود ۴۶۰۰ psia در نظر گرفته شده است.

جدول ۵- نتایج مربوط به آزمایشات آسفالتین و محاسبات انجام شده

مقدار گرم آسفالتین رسوبی (gr)	۰/۰۳۵
درصد وزنی آسفالتین در نفت خروجی (%)	۰/۰۱۲۲
حجم آسفالتین رسوب کرده (cc)	۰/۰۴۱
حجم آسفالتین / حجم خالی	۰/۰۰۲
درصد تخلخل نهایی (%)	۱۹/۱۸۶
درصد کاهش تخلخل (%)	۰/۲۲

جدول ۶- نتایج آزمایشات مربوط به قبل و بعد از تزریق گاز

درصد کاهش	بعد از تزریق گاز	قبل از تزریق گاز	تراوایی موثر نفت در مغزه مورد آزمایش (md)
۱۴/۷۳	۰/۸۲۶۷ (md)	۰/۹۶۹۶ (md)	

اما در اینجا  $n$  بین ۱۸ تا ۲۰ به دست آمده است که نشان از تاثیر قابل توجه نشست آسفالتین بر تراوایی دارد و با توجه به این می‌توان گفت مکانیسم عمده رسوب انسداد مکانیکی و قطر کوچک گلوگاه حفره‌ها می‌باشد که باعث تسریع در امر انسداد می‌شود، زیرا در یک حجم مساوی از آسفالتین فرآیند انسداد تاثیر بیشتری بر کاهش تراوایی دارد. لازم به ذکر است جهت به دست آوردن  $n$  از معادله موازنه جرمی بین دو نقطه استفاده گردید. معادله موازنه جرم جهت محاسبه مقدار آسفالتین رسوب کرده بر روی مغزه را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$m_{ac}(t) = (PV) \rho_m w - \int_0^t Q_{out} B_o \rho_{out} w(t) dt \quad (2)$$

در رابطه بالا PV حجم اشغال شده مغزه توسط نفت در ابتدای تزریق،  $m_{ac}(t)$  جرم آسفالتین تجمع یافته بر روی سنگ در هر زمان،  $w$  و  $w(t)$  درصد آسفالتین اولیه در نفت و مقدار آسفالتین در نفت خروجی در هر زمان می‌باشند و به صورت  $gr_{asph} / gr_{oil}$  اندازه‌گیری می‌شود.  $Q_{out}$  دبی تولیدی است و چگالی‌های ورودی و خروجی  $\rho_{si}$  و  $\rho_{out}$  را می‌توان ثابت فرض نمود. با استفاده از حجم آسفالتین رسوبی بر روی سنگ و تفاضل آن با حجم خالی اولیه، حجم خالی در هر زمان محاسبه و از روی آن تخلخل را می‌توان محاسبه نمود. نتایج حاصل از یک نقطه در خصوص این آزمایش در جدول ۵ آورده شده است.

تراوایی سنگ مورد آزمایش شاخص مناسبی جهت

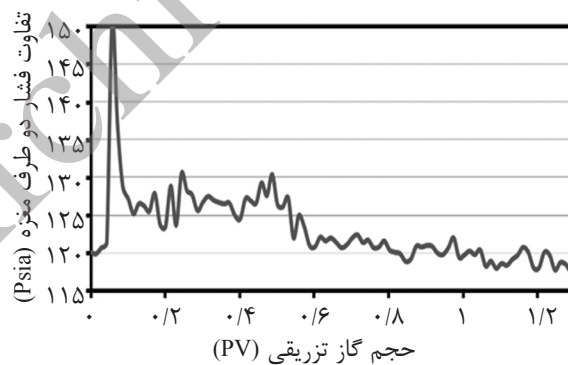


میزان گاز تزریقی در شکل ۶ گزارش شده است. زمانی که حدود ۰/۵۶ از حجم تخلخل گاز تزریق شده است، پدیده میان شکن اتفاق می‌افتد. در اینجا به نسبت حالت قبل میان شکن زودتر اتفاق می‌افتد. در حالتی که فشار تزریق ضمن آن که از حداقل فشار امتزاجی بیشتر است به فشار امتزاجی نزدیک می‌شود، در بخش بیشتری از مغزه حضور دو سیال به صورت مجزا اتفاق بیفتد و بالطبع ناحیه امتزاجی کوچکتری انتظار می‌رود. همچنین با توجه به کاهش فشار گاز، تحرک پذیری افزایش و پدیده میان شکنی سریع تر اتفاق می‌افتد. همان گونه که در شکل ملاحظه می‌گردد پس از تزریق حدود ۰/۶۵ از حجم حفره گاز، مقدار بازیافت حدود ۰/۶۵ نیز مشاهده می‌شود. با توجه به کاهش فشار تزریق اثر تراکم گاز در اینجا مشاهده نمی‌شود. در این آزمایش نیز مقدار آسیب دیدگی سازند که در نتیجه کاهش تراوایی سنگ مخزن قابل اندازه گیری است در جدول ۷ نشان داده شده است که نتایج نشان دهنده کاهش تراوایی به میزان ۱۱٪ است.

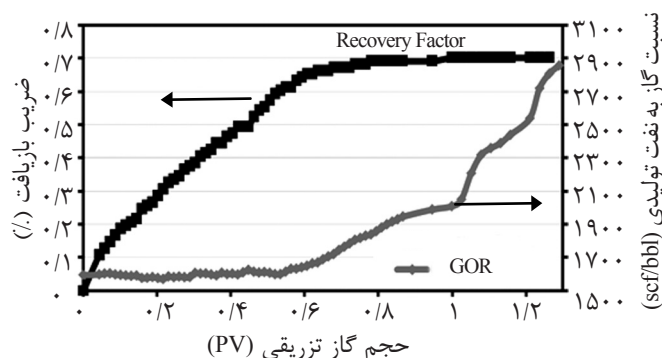
فشار روغن وارد شده در محفظه نگهدارنده مغزه بر غلاف روی آن، در بازه ۵۴۰۰ - ۵۰۰۰ psia متغیر می‌باشد. همچنین، دمای سیستم نیز ۸۵ °C (معادل دمای مخزن) بوده است. بعد از راه اندازی سیستم، تراوایی مطلق آب ( $K_{ra}$ ) معادل ۱/۷۵۶ تعیین گردید.

در ادامه نمودار افت فشار برحسب حجم حفرات گاز تزریقی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که نتایج نشان می‌دهد مقدار فشار اولیه اندکی افزایش یافته است. با توجه به کمتر بودن فشار تزریق نسبت به قبل، مقدار فشار اولیه بیشتری لازم است تا بر نیروی موینگی غلبه کند. همان گونه که قبلاً توضیح داده شد این افزایش ناگهانی فشار، ناشی از زمان بسیار کوتاهی است که سیستم از حالت پایدار خارج و به حالت ناپایدار می‌رسد. در همین زمان کوتاه ممکن است مقداری گاز از سیستم در اثر پدیده انگشتی شدن به بیرون هدایت شود.

نمودار ضریب بازیافت و نسبت گاز به نفت برحسب



شکل ۵- افت فشار در طول تزریق گاز در آزمایش دوم



شکل ۶- نتایج نسبت گاز به نفت و بازیافت در حین تزریق گاز

جدول ۷- نتایج آزمایش قبل و بعد از تزریق گاز

تراوایی موثر نفت در مغزه مورد آزمایش		
درصد کاهش	بعد از تزریق گاز	قبل از تزریق گاز
۱۱/۱۷	۱/۰۲۷ (md)	۱/۱۵۶ (md)

### نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تغییر خواص سنگ مخزن در فرآیند تزریق گاز طبیعی پرداخته شده است. به این منظور تجهیزات آزمایشگاهی سیلاب زنی برپا گردیده و در شرایط مختلف فشار تزریقی، خواص سنگ و خواص سنگ مخزن و خواص سیال مخزن در قبل از تزریق، حین تزریق و بعد از تزریق گاز بررسی شده است. نتایج کلی حاصل از این تحقیق را به صورت زیر می توان خلاصه نمود.

۱- در آزمایشات انجام گرفته هر چند فشار تزریق از حداقل فشار امتزاجی بالاتر بود ولی داده های آزمایشگاهی منحنی افت فشار مغزه بر حسب زمان نشان می دهد که احتمالاً در بعضی از قسمت های مغزه حالت امتزاجی برقرار نشده و به همین علت شاهد نوساناتی در افت فشار سیستم می باشیم که این نوسانات تا نقطه میان شکنی گاز ادامه خواهد داشت. این نوسانات قبل از میان شکنی نشان دهنده وجود دو سیال مجزای نفت و گاز در سیستم است که باعث کاهش و یا افزایش فشار می شود. در عین حال همین عامل باعث می شود که در مقادیر بازیافت حدوداً ۶۰٪ تا ۶۵٪ میان شکنی اتفاق بیفتد و نتوان به بازیافت بالاتر دست یافت.

۲- هر چه فشار تزریق کمتر باشد مقدار فشار لازم برای غلبه بر نیروی موئینگی در ابتدای تزریق بالاتر خواهد بود و شاهد افزایش فشار بالاتری در ابتدای فرآیند خواهیم بود. چون در شرایط برابر با کاهش فشار تزریق، حرکت سیستم به سمت غیرامتزاج پذیری است.

۳- منحنی مقدار آسفالتین موجود در نفت خروجی مغزه نشان دهنده افزایش مقدار رسوب آسفالتین در مغزه با زمان دارد. در نقطه میان شکنی گاز، کاهش نسبی این مقدار دیده می شود که می توان دلیل آن را کنده شدن مقداری از رسوبات ته نشین شده بر روی سنگ و هدایت آن به بیرون مغزه توسط گاز نسبت داد بنابراین در این نقطه مکانیزم حمل ذرات اتفاق می افتد.

۴- براساس آزمایشات انجام شده تراوایی سنگ مخزن در اثر تزریق این گاز کاهش می یابد که با توجه به ارتباط توانی تراوایی با تخلخل حاصل شده که حدود ۲۰-۱۸٪ می باشد می توان نتیجه گرفت که در فرآیند تزریق گاز طبیعی در خصوص این سنگ مکانیسم عمده رسوب انسداد مکانیکی حفرات سنگ می باشد و این مقدار آسیب سازند با کاهش فشار تزریق کاهش می یابد بنابراین شاید بتوان گفت بهتر است حتی الامکان فشار تزریق به حداقل فشار امتزاجی نزدیک تر باشد.

۵- در تمامی آزمایش های تزریق گاز طبیعی با ترکیب مورد نظر ضریب بازیافت حدود ۷۰٪ است و درصد تخریب سازند از ۲۵٪ بیشتر نشده است. در واقع می توان این گاز را در تمامی حالات مناسب برای تزریق دانست.

۶- مشاهدات بصری، پس از اتمام آزمایش و باز نمودن سیستم نگهدارنده مغزه نشان می دهد که بیشترین رسوب آسفالتین در ابتدای مغزه تشکیل می شود. در واقع ناپایداری در ابتدای تماس نفت و گاز بیشتر از زمان های دیگر رخ می دهد.

## مراجع

- [1] Civan F., "Effect of completion damage on well performance", Workshop 18: Contemporary Oil and Gas Well Completion and Work over Jobs, Petroleum Engineering Summer School, the Inter-University Center, Dubrovnik, Croatia, Jun. pp. 13–17, 2005.
- [2]. Bennion B., "Formation Damage-The Impairment of the Invisible, by the Inevitable and Uncontrollable, Resulting in an Indeterminate Reduction of the Unquantifiable," Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 38 No. 2, pp. 11–17, Feb. 1999.
- [3]. Tzimas E. Georgakaki A., Garcia Cortes C. and Peteves S. D., "Enhanced oil recovery using carbon dioxide in the european energy system," DG JRC, Institute for Energy, Petten, The Netherlands, 2005.
- [4]. Zick A. A., "A combined condensing/vaporizing mechanism in the displacement of oil by enriched gases," paper SPE 15493 presented at the SPE 61<sup>st</sup> Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, Oct. 1986.
- [5]. Zick A. A., "A combined condensing/vaporizing mechanism in the displacement of oil by enriched Gases", paper SPE 15493 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Oct. 5-8, 1986.
- [6]. Wang X. and Gu Y., "Oil recovery and permeability reduction of a tight sandstone reservoir in immiscible and miscible CO<sub>2</sub> flooding processes," , Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 50, pp. 2388–2399, 2011.
- [7]. Mousavi Dehghani. S. A., Vafaie Sefti .M, Mirzayi B., and Fasih M., "Experimental investigation on asphaltene deposition in porous media during miscible gas injection", Iran. J. Chem. Chem. Eng. Vol. 26, No. 4, 2007.
- [8]. Takahashi S., Hayashi Y., Takahashi Sh., Yazawa N., and Samra H., "Characteristics and impact of asphaltene precipitation during CO<sub>2</sub> injection in sandstone and carbonate cores: an investigative analysis through laboratory tests and compositional simulation", SPE 84895-MS, SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific, 20-21, Kuala Lumpur, Malaysia, Oct. 2003.
- [9]. Huang S. S. and Dryer S. B., "Miscible displacement in the weyburn reservoir," SPE SS-92-20, Journal of Canadian Petroleum Technology, Regina, Oct. 7 - 9, 1992.
- [10]. Nobakht M., Moghadam S., and Yongan Gu. "Mutual interactions between crude oil and CO<sub>2</sub> under different pressures", journal of Fluid Phase Equilibria Vol. 265, pp. 94–103, 2008.
- [11]. Zekri A. Y., Almehaideb R. A., Shedid S. A., "Displacement efficiency of supercritical CO<sub>2</sub> flooding in tight carbonate rocks under immiscible conditions", SPE 98911-MS, SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition, Vienna, Austria, Jun. 12-15, 2006.
- [12]. Srivastava Raj K. and Huang Sam S., "Asphaltene deposition during CO<sub>2</sub> flooding: a laboratory assessment", SPE 37468, SPE Production Operations Symposium, pp. 9-11, Oklahoma City, Oklahoma, Mar. 1997.
- [13]. McCabe L. and Smith C., "Unit Operation of Chemical Engineering", McGraw Hill Chemical Engineering Series, 3<sup>rd</sup> Edition, 1975