

# تعیین نرخ مناسب تزریق اسید در سازندهای کربناته به منظور افزایش تراوایی

فرناز شیخی بوجانی، احمد رمضانزاده\* و محمد لطفی

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۲۰

## چکیده

تراوایی یکی از پارامترهای دینامیکی مخزن در پروژه‌های ازدیاد برداشت مخازن نفت و گاز می‌باشد. دبی تولید و میزان بازیافت نهایی، شدیداً تحت تأثیر این پارامتر است؛ اما مقدار این پارامتر در برخی از مخازن کربناته اندک بوده و نیازمند اعمال راه حل مناسبی جهت افزایش آن می‌باشد. از طرفی، عملیات اسیدزنی یکی از رایج‌ترین روش‌های افزایش تولید نفت و گاز و ضریب بهره‌دهی مخازن است. در این مقاله با هدف بررسی اثر فشار تزریق و محصورکننده متفاوت، به مطالعه آزمایشگاهی روند تغییرات تراوایی سنگ‌های مخزنی طی عملیات اسیدزنی مغزه پرداخته شده است. از این‌رو، تعداد ۶ نمونه سنگ مخزنی کربناته از یکی از میادین نفتی ایران تهیه شد. پس از تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، روند تأثیر فشار محصورکننده و فشار تزریق بر تغییرات تراوایی و دستیابی به دبی بهینه مورد مطالعه قرار گرفت. این موضوع با تغییر نرخ تزریق سیال از ۳/۶ cc/min تا ۱۵ cc/min در فشار محصورکننده‌های ۷۵۰، ۱۴۵۰ و ۲۹۰۰ psi طراحی و انجام شد و نمونه‌های آزمایش شده پس از اسیدکاری، از طریق آزمایش سی‌تی اسکن مورد ارزیابی دقیق قرار گرفتند. بررسی نتایج آزمایش‌ها و تصاویر سی‌تی اسکن نمونه‌ها نشان می‌دهد که افزایش تراوایی به‌میزان قابل قبولی در نمونه‌ها به‌وجود آمده است. در مقادیر دبی تزریق پایین‌تر که اسید فرصت کافی برای واکنش با سنگ دارد، حفرات کرمی شکل به‌خوبی تشکیل شده و مابقی فضای نمونه، تراکم خود را تا حد زیادی حفظ کرده است. اما با افزایش دبی تزریق اسید، حفرات کرمی شکل جای خود را با تخریب کامل بخش ابتدایی مغزه عوض کرده و تراکم بخش باقی‌مانده نیز کمتر شده است. در حالی که مجدداً با افزایش دبی تا مقدار حداکثر تلفیقی از دو رفتار مذکور دیده می‌شود. این امر سبب افزایش بیش از ۵۳۰ برابری تراوایی نسبت به مقدار اولیه این نمونه شده است. در حالی که از نظر مقایسه زمان تشکیل حفرات کرمی شکل، در نمونه با دبی حداکثر و نمونه با دبی حداقل، تفاوت اندکی وجود دارد. بدین منظور و با توجه به اولویت زمان انجام آزمایش و میزان حجم اسید مصرفی، می‌توان نرخ بهینه تزریق را انتخاب کرد.

**کلمات کلیدی:** اسیدزنی، تراوایی، سی‌تی اسکن، فشار محصورکننده، مخازن کربناته

## مقدمه

عملیات اسیدکاری، یکی از روش‌های متداول در صنایع نفت و گاز جهت انگیزش چاه و افزایش نرخ تولید از چاه‌های تولیدی است. این عملیات در مخازن کربناته این امکان را فراهم می‌سازد که علاوه بر ایجاد گذرگاه در ناحیه آسیب دیده اطراف چاه، باعث بهبود تراوایی در این ناحیه نیز گردد. مطالعات ژئومکانیکی در توسعه روش‌های گوناگون بهره‌برداری از مخازن هیدروکربنی نقش مهمی ایفا می‌کنند. اولین مشاهده و توصیف از شکست هیدرولیکی به وسیله گرب و استوسر انجام گرفت که برای انگیزش چاه نفت در سازند کربناته از اسید استفاده کردند [۱]. بروداس و همکاران برای اولین بار تحقیقاتی را در مورد هدایت شکستگی اسیدی انجام داد تا تأثیر زمان تماس اسید با سنگ، نوع شکل‌گیری و دمای آن را بررسی کند. همچنین نرخ تزریق اسید و فشار محصورکننده در این فرآیند ثابت در نظر گرفته شد [۲]. مک لئود و همکاران تحقیقاتی را بر روی انگیزش چاه و انواع آسیب‌های وارد بر آن انجام دادند که در آن اسیدکاری ماتریس به‌عنوان روشی سودمند در چاه‌های آسیب دیده نفت و گاز معرفی گردید. همچنین جهت شناخت دقیق و کامل چاه برای رسیدن به بیشترین بازدهی از عملیات اسیدکاری ماتریس، با در نظر گرفتن شرایط ثابت نرخ تزریق و فشار محصورکننده، استفاده شده است [۳]. آندرسون آزمایش‌های دینامیکی را برای بررسی عوامل مؤثر بر هدایت هیدرولیکی در عملیات اسیدکاری ترتیب داد که در این آزمایش‌ها نرخ ورودی جریان مقدار مشخصی بود. با افزایش فشار محصورکننده نمونه، میزان هدایت هیدرولیکی نمونه کاهش یافت. همچنین، بررسی شد که تست‌های دینامیکی برای ارزیابی امکان سنجی عملیات اسیدکاری به جهت تعیین ترکیب بهینه اسید برای سازند موردنظر لازم است [۴]. لازم است هوفر نشان داد نرخ انحلال اسید در سنگ آهک بالاتر از سنگ دولومیت بوده و به همین

دلیل، بازدهی انگیزش در سنگ آهک بیشتر است. با افزایش نرخ تزریق، بازدهی انگیزش در سنگ آهک افزایش می‌یابد ولی در نرخ‌های خیلی بالاتر، از میزان بازدهی انگیزش کاسته می‌شود [۵]. وانگ و همکاران با در نظر گرفتن حجم کلریدریک اسید با غلظت ۱۵٪ کمینه برای تعیین نرخ بهینه تزریق در سازندهای کربناته نتیجه گرفتند که سازندهای با دمای بالا به نرخ تزریق بالاتری احتیاج دارند. همچنین، یک مدل برای پیش بینی نرخ تزریق بهینه جهت مقایسه با نتایج آزمایشگاه ارائه شد [۶]. پکالونی، در مقاله‌ای که نتایج گسترده مطالعات و مدل‌سازی بیش از ۶۵۰ عملیات انگیزش ماتریس را ارائه داد، پیشنهاد کرد که شرایط بهینه برای اسیدکاری، تزریق با بیشترین دبی و بیشترین فشار شکست سازند است. از سوی دیگر، فشار و نرخ تزریق ناکافی عامل انگیزش ضعیف چاه قلمداد شد [۷]. فرد مدلی را ارائه کرد که در آن پارامترهایی همچون سرعت تزریق، دما و خصوصیات سیستم سیال و ماده معدنی مورد بررسی واقع شدند. نتایج این مدل هم‌خوانی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت [۸]. بازمین مطالعات آزمایشگاهی را به منظور تعیین نرخ بهینه تزریق از طریق اندرکنش مابین کلریدریک اسید ۱۵٪ و سنگ آهک انجام داد. در این مطالعات مشاهده شد که نرخ تزریق بهینه با افزایش غلظت، دما و تراوایی سنگ افزایش می‌یابد [۹]. پانگا و همکارانش، روشی را برای مدل‌سازی حفره‌های گرمی‌شکل تشکیل شده در طی اسیدکاری مخازن کربناته ارائه دادند. در این مدل که تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت، اثر نفوذ، انتقال جرم از طریق توده سیال و سرعت واکنش در نظر گرفته شد [۱۰]. چن و همکاران ادعا کرد حفره‌های گرمی شکل که روی سطح شکستگی ایجاد شده است، باعث افزایش هدایت شکستگی می‌شود [۱۱]. نویتوگومز و جاویر آزمایش‌های گسترده‌ای بر روی مغزه‌های ماسه سنگ و کربناته را با هدف ارزیابی تأثیر ناهمگنی سنگ و شرایط عملیاتی در سازو کار

گازی با تخلخل و تراوایی پایین پرداختند [۱۹]. ژانگ و همکاران براساس تحقیقات تجربی دریافتند، خواص مکانیک سنگ در تشکیلات کربناته بر اثر اسیدکاری با دو نوع اسید که شامل اسید پاک و اسید ژل شده می‌باشد، تغییرات زیادی کرده است. این امر منجر به این شده است که در اسیدکاری به وسیله اسید ژل، استحکام فشرده‌سازی و نسبت پواسون کاهش یافته و در اسیدکاری توسط اسید پاک، استحکام کششی و مدول یانگ کاهش یابد [۲۰]. محترمی و همکاران با طراحی تست‌های آزمایشگاهی به بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی و نوع اسید بر روی خواص مکانیکی سنگ مخازن هیدروکربنی پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که به‌طور کلی کاربرد اسید باعث کاهش مدول الاستیک، مقاومت تک محوری، چقرمگی و افزایش تخلخل، نفوذپذیری و تغییر شکل‌پذیری سنگ می‌شود [۲۱]. چراغی و همکاران با بررسی انواع اسیدهای آلی در عملیات اسیدکاری به منظور افزایش تولید در مخازن کربناته نشان دادند، استفاده از اسید ترکیبی در مواقعی که نیاز است که هم قدرت اسید زیاد بالا نباشد و هم به آرامی با سنگ واکنش دهد بهترین انتخاب می‌باشد [۲۲]. خدري و همکاران با طراحی شرایط عملیاتی یک فرآیند اسیدزنی ماتریسی که شامل پارامترهایی چون حجم اسید تزریقی مورد نیاز جهت زدودن آسیب سازند، بالاترین حد فشار تزریقی و نیز بالاترین حد دبی تزریق اسید در فرآیند اسیدکاری ماتریس جهت افزایش بهره‌وری مخازن می‌باشد، پرداخته است [۲۳].

بررسی‌ها نشان می‌دهد تحقیقات انجام شده اصولاً بر روی اثر ترکیب شیمی سیال و ماتریس بوده و جنبه‌های ژئومکانیکی آن به دلایل متعدد تا کنون مغفول مانده است. در این مقاله با بررسی اثر توأمان دو پارامتر فشار تزریق و فشار محصورکننده به منظور طراحی شکست اسیدی و انجام آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های سنگ مخزن

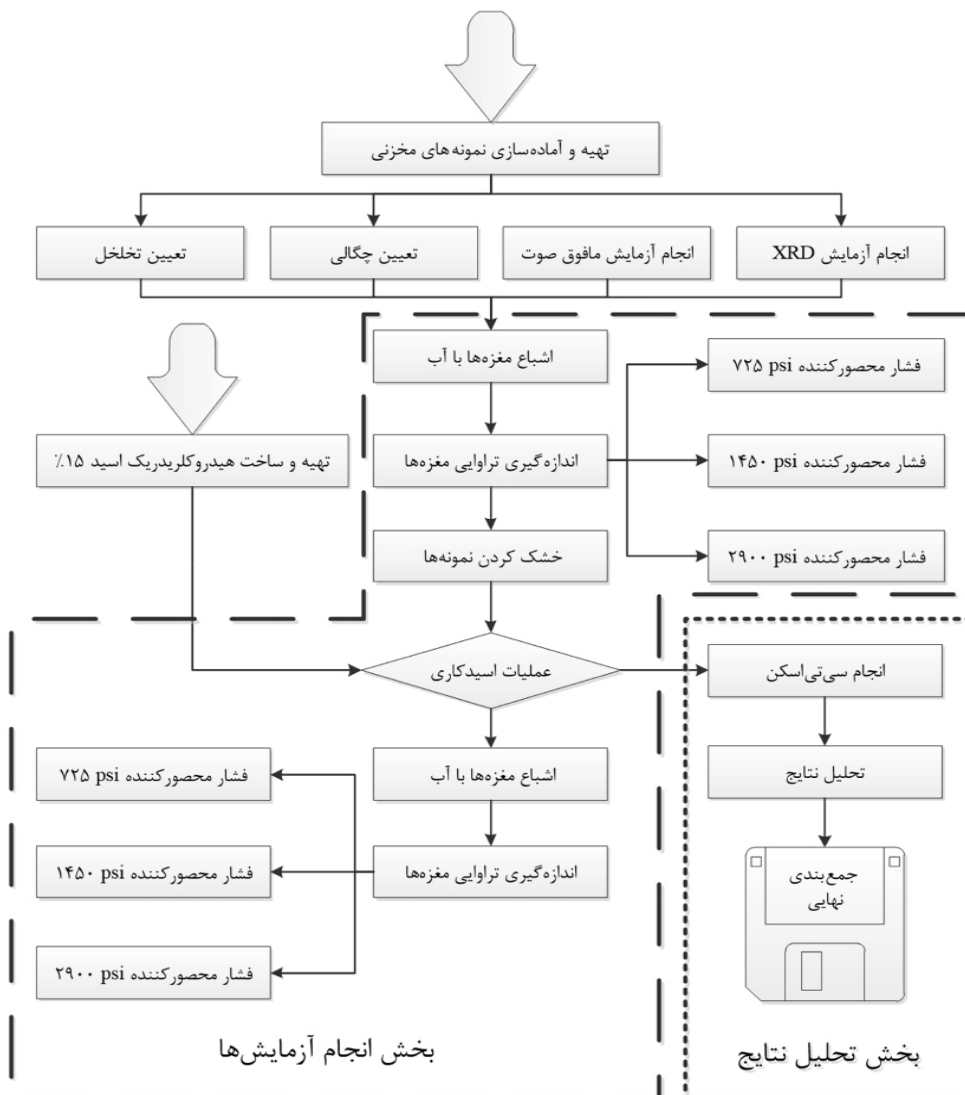
اسیدکاری انجام دادند. یکی از نتایج این بود که در اسیدکاری مغزه‌های سنگ آهک با کلریدریک اسید ۱۵٪ کانال‌ها و شکاف‌های بزرگ‌تر و در نتیجه، تراوایی بالاتری حاصل می‌شود. همچنین در این تحقیق، نشان داده شد که در سنگ‌های کربناته نرخ تزریق بر مقدار اسید مورد نیاز برای ایجاد شکاف تأثیر بسزایی دارد. به‌علاوه، ملاحظه شد کمترین نرخ جریان، الگوی یکنواخت‌تری را در دهانه مغزه شکل می‌دهد [۱۲]. پورنیک و همکاران ادعا کردند غلظت‌های مختلف اسید، منجر به هدایت شکستگی‌های مختلف می‌شود. هر چند که در این مطالعه اثر پارامترهای نرخ تزریق اسید و فشار محصورکننده بررسی نشده است [۱۳]. لونگویتز و همکاران برای جلوگیری از، از بین رفتن اسید و کاهش سرعت واکنش از اسید با ویسکوزیته بالا استفاده کردند که منجر به ایجاد شکاف اسیدی طویل شد [۱۴]. گوما و نصرالدین تأثیر قدرت مکانیک سنگ در هدایت شکستگی اسید را بررسی کردند [۱۵]. آنتلو و همکاران اظهار داشتند که درجه حرارت مختلف الگوی اسیدکاری سطح را تحت تأثیر قرار داده و منجر به هدایت شکستگی متفاوت می‌شود [۱۶]. پورنیک و همکاران آزمایشاتی را برای بررسی تأثیر نوع اسید در الگوی اسیدکاری سطح انجام دادند. آنها دریافتند شکستگی مؤثر اسید نه تنها به هدایت شکستگی بالا احتیاج دارد، بلکه به شکل ظاهری طول شکستگی اسید نیز احتیاج دارد [۱۷]. ژائو و همکاران بیان کرده‌اند، از روش‌های بهبود بهره‌دهی چاه‌ها، اثر گذاشتن بر فیزیک سنگ مخزن می‌باشد که می‌توان به ایجاد شکستگی‌های مصنوعی به وسیله سیال اسیدی و غیراسیدی در سنگ مخزن اشاره کرد. در این میان، میزان دبی، فشارهای موجود اعم از فشار تزریق و محصورکننده و پارامترهای دیگری از این قبیل می‌توانند در چگونگی اثربخشی آن نقش مهمی ایفا نمایند [۱۸]. سروش و همکاران با مطالعه و توسعه مدل‌های ژئومکانیکی به بهبود تولید از مخازن

برای اجرای مجدد آزمایش‌ها در نظر گرفته شود. همچنین با توجه به مخرب بودن و غیرقابل تکرار بودن آزمایش‌های اسیدزنی، طراحی نحوه انجام آزمایش در شرایطی که نمونه‌های مورد مطالعه از حساسیت بالایی مانند تعداد کم، هزینه بالای تهیه و مانند این موارد برخوردار هستند، منجر به اهمیت دوچندان فرآیند طراحی و لزوم انجام آن دارد چرا که در صورت طراحی نادرست آن، هزینه گزافی بابت هزینه و زمان می‌بایست پرداخت گردد. مراحل مرتبط با مطالعات آزمایشگاهی، مطابق با شکل ۱ به دو بخش کلی "انجام آزمایش‌ها" و "تحلیل نتایج" تقسیم می‌شود.

کربناته، به بررسی آزمایشگاهی نحوه تأثیر پارامترهای مذکور بر روی میزان تراوایی سازندهای کربناته با هدف افزایش بهره‌دهی پرداخته شده است.

### طراحی و انجام آزمایش‌ها

عملیات اسیدزنی از جمله عملیات‌های رایج جهت افزایش تراوایی در سازندهای کم‌تراوا می‌باشد. از این‌رو، آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های مخزنی به جهت بررسی آزمایشگاهی نحوه تأثیر این پارامترها بر روی میزان تراوایی سازندهای کربناته طراحی شده است. این روندی است که در صورت دستیابی به نتیجه مطلوب می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب



شکل ۱ روند کلی انجام آزمایش‌ها

کریستال، اندازه و شکل دانه کریستال، فاصله بین لایه های کریستال، تعیین جهت گیری و موقعیت بلور، اندازه گیری درصد کریستالیت نمونه، ترکیب اتم های کریستال و ساختار آن می باشد [۲۵ و ۲۶]. بدین ترتیب، از گراف مربوط به آزمایش XRD در شکل ۲ مشخص شده است که این مغزه ها حاوی کانی های کربنات کلسیم و دی اکسید سیلیسیم می باشند و حدوداً میزان درصد های آن ها به ترتیب ۹۸٪ و ۲٪ می باشد.

### تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی

پیش از انجام آزمایش مخرب اسیدزنی، مجموعه ای از آزمایش های غیرمخرب برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی مغزه ها انجام شد. برای تعیین مشخصات فیزیکی آن ها (چگالی خشک و تر و نیز تخلخل) ابتدا مغزه ها به طور کامل به مدت ۲۴ h در دستگاه دسیکاتور اشباع و سپس با ترازو با دقت ۰/۱ g وزن مغزه ها اندازه گیری شد. به منظور تعیین چگالی خشک آن ها، مغزه ها به مدت ۲۴ h در گرم خانه قرار گرفته و سپس، وزن آنها مشابه مرحله قبل اندازه گیری شد. مقدار حجم مغزه ها، با اندازه گیری قطر و طول مغزه با دقت ۰/۱ mm با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه گیری و محاسبه شد. از آنجا که تعداد مغزه ها محدود بوده و امکان انجام آزمایشات مرسوم مکانیک سنگی (آزمایشات مخرب) وجود نداشت، برای تعیین مشخصات مکانیکی (سرعت گذر امواج طولی و عرضی در سنگ) از آزمایش غیرمخرب مافوق صوت، طبق استاندارد ISRM استفاده شده است. بر این اساس، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مغزه ها به شرح جداول ۲ و ۳ محاسبه شد.

بخش انجام آزمایش ها خود شامل سه مرحله اصلی "اندازه گیری تراوایی پیش از اسیدزنی"، "مرحله اسیدزنی" و "اندازه گیری تراوایی بعد از آن" می باشد [۲۴].

### تهیه و آماده سازی نمونه ها

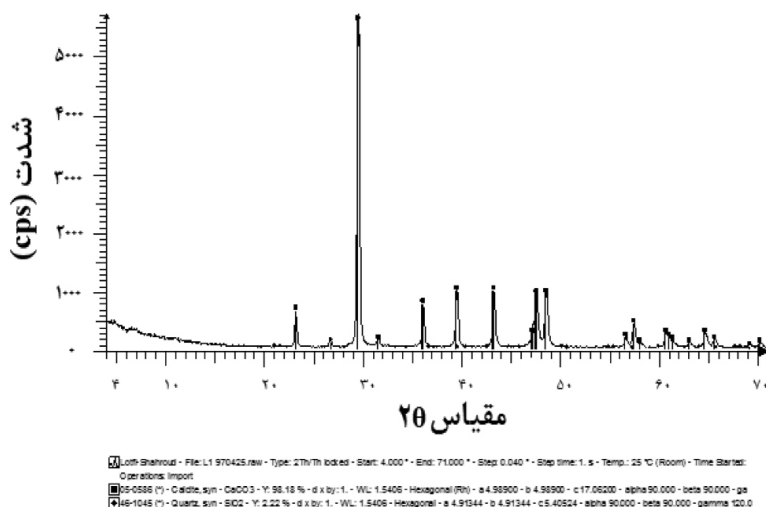
برای انجام آزمایش های اسیدزنی، تعداد ۶ پلاگ سنگ مخزنی کربناته تهیه شده است. مغزه ها مربوط به یکی از میادین نفتی ایران می باشد. در آزمایش های انجام شده سیالات انتخابی اسیدکلریدریک و آب بوده است که میزان ترکیب این دو سیال برای دستیابی به حجم و غلظت مورد نظر در جدول ۱ ذکر شده است. به علت واکنش پذیری مناسب اسیدکلریدریک با سنگ های کربناته و همچنین دسترسی آسان آن، این اسید برای انجام آزمایش بر روی مغزه ها انتخاب شد. پلاگ های تهیه شده جهت انجام آزمایشات، استوانه ای و دارای قطر ۱/۵ inch می باشند. از آنجا که برای انجام تست سیلابزنی به منظور تعیین تراوایی اولیه سنگ های مخزنی کربناته، طول مغزه نهایتاً می بایست ۶ cm باشد (باتوجه به محدودیت طول نگهدارنده)، با استفاده از دستگاه برش دو سر مغزه، طول مغزه ها به این مقدار کاهش یافته و به منظور انجام آزمایشات دو طرف مغزه ها به اندازه کافی صیقل زده شده است.

### کانی شناسی نمونه ها

دستگاه XRD یکی از تجهیزات منحصر بفرد برای آنالیز و تعیین مشخصات کریستال ها در آزمایشگاه می باشد. از جمله مواردی که می توان در آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) تعیین کرد تشخیص فاز

جدول ۱ اطلاعات سیال مورد استفاده

سیالات	غلظت (%wt)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	حجم (mL)
اسید کلریدریک صنعتی	۳۵	۱/۱۷	۲۸۵
آب	-	۱/۰۰	۴۶۵
اسید کلریدریک ساخته شده جهت آزمایش	۱۵	۲/۱۴	۷۵۰



شکل ۲ نمودار تعیین درصد کانی‌های تشکیل دهنده مغزه مورد آزمایش

جدول ۲ مشخصات هندسی مغزه‌ها

نمونه	نام نمونه	D (mm)	L (mm)	W <sub>wet</sub> (g)	W <sub>dry</sub> (g)	W <sub>sat</sub> (g)
الف	۲۶۹۱/۶۶	۳۶/۷	۶۷/۲	۱۴/۹۹	۱۴۷/۸۱	۱۶۲/۸
ب	۲۹۵۷/۸۶	۳۶/۸۸	۶۵/۵	۱۵/۱۰	۱۴۷/۸۲	۱۶۲/۹۲
ج	۲۷۲۰/۱۸	۳۷/۱	۶۹/۳	۱۵/۹۰	۱۵۳/۹۱	۱۶۹/۸۱
د	۲۷۱۲/۱۹	۳۷/۱	۶۶/۷	۱۳/۰۱	۱۳۴/۹۲	۱۴۷/۹۳
ه	۲۶۸۵/۳۹	۳۶/۷	۸۰/۳	۱۷/۲۶	۱۶۸/۳۴	۱۸۵/۶۰
ی	۲۹۸۰/۵۵	۳۷/۰	۶۹/۳	۱۶/۲۰	۱۵۵/۴۵	۱۷۱/۶۵

جدول ۳ مشخصات مکانیکی و برخی خصوصیات فیزیکی مغزه‌ها

نمونه	نام نمونه	تخلخل (%)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	سرعت موج طولی ((V <sub>p</sub> (m/s))	سرعت موج عرضی ((V <sub>s</sub> (m/s))
الف	۲۶۹۱/۶۶	۲۱/۱	۲۰۷۹/۲۸	۴۹۶۶	۲۵۸۶
ب	۲۹۵۷/۸۶	۲۱/۴	۲۱۱۱/۳۲	۵۰۷۳	۲۷۵۳
ج	۲۷۲۰/۱۸	۲۱/۵	۲۳۰۵	۳۹۶۱	۲۸۶۰
د	۲۷۱۲/۱۹	۱۸/۱	۲۰۰۱	۲۴۶۴	۲۵۳۶
ه	۲۶۸۵/۳۹	۲۰/۲	۲۲۵۳	۲۹۵۹	۲۸۰۶
ی	۲۹۸۰/۵۵	۲۱/۶	۲۱۵۱	۲۸۲۳	۲۶۸۹

### اندازه‌گیری تراوایی

در آزمایشگاه سنگ و سیال دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شد. پمپ دستگاه با دقت ۰/۱ mL/min سیال را درون مغزه تزریق کرده و بدین ترتیب فشار تزریق، در دو طرف مغزه ثبت می‌گردد. همچنین، فشار محصورکننده نیز با تزریق روغن در اطراف مغزه به صورت یکنواخت اعمال می‌شود.

در طراحی برنامه مطالعات آزمایشگاهی، تراوایی در دو مرحله شامل قبل و بعد از اسیدزنی اندازه‌گیری شد. این کار به منظور پایش میزان اثرگذاری عملیات اسیدزنی بر روی مغزه‌ها انجام گرفت. بدین منظور، از دستگاه سیلابزنی مغزه مدل SP مستقر

دو سیستم تزریق مجزا از یکدیگر با دو نگهدارنده مغزه می‌باشد. با استفاده از این دستگاه می‌توان اسید طراحی شده را تا حداکثر دمای  $100^{\circ}\text{C}$  و فشار حداکثر  $10000\text{ psi}$  به مغزه‌های مستقر در نگهدارنده مغزه تزریق نمود. این فرآیند را می‌توان به‌طور همزمان برای دو مغزه و به‌طور موازی با شرایط فشار محصورکننده ثابت اجرا کرد. در این سیستم به منظور اعمال دما از گرمکن حرارتی با قابلیت تماس مستقیم و یکنواخت با نگهدارنده مغزه استفاده می‌شود. این ساختار منجر به اتلاف کمتر دمایی و دقت بیشتر در بازه‌های مختلف دمایی است. علاوه بر این، ساختار هر دو نگهدارنده مغزه به‌گونه‌ای طراحی شده است که بتوان مغزه‌های مطالعاتی را تا حداکثر طول  $6\text{ inch}$  با قطر  $1/5\text{ inch}$  مورد آزمایش قرار داد. کنترل دستگاه و فرآیند تزریق به‌وسیله پمپ‌های با دقت و قدرت بالا انجام می‌گیرد. همچنین، می‌توان از طریق رایانه متصل به دستگاه، آزمایش‌ها را پایش و کنترل نمود. آزمایش‌ها در شرایط دمای محیط، غلظت ثابت (کلریدریک اسید  $15\%$ ) و فشار و دبی تزریق مختلف انجام شد. با توجه به توان دستگاه و محدودیت تعداد مغزه، عملیات تزریق در  $6$  نرخ مطابق با جدول ۴ تعیین و تزریق اسید با شرایط مذکور برای دستیابی به شرایط بهینه انجام شد. با توجه به محدودیت تعداد مغزه‌های مخزنی موجود و عدم امکان تهیه مجدد مغزه‌های کربناته مخزنی مشابه، فشار محصورکننده در طراحی آزمایشات در محدوده مطمئنی در نظر گرفته شد. چرا که طی واکنش اسید با فضای داخلی مغزه‌ها در زمان انجام آزمایش، مغزه‌ها به مرور سست شده و استحکام خود را از دست می‌دهند. این موضوع باعث می‌شود تا در صورت بالا بودن مقدار فشار محصورکننده نمونه در هنگام انجام آزمایش در سلول آزمایشگاهی خرد شود و این موضوع به روند طراحی و تحلیل فرآیند اسیدزنی آسیب جبران ناپذیری وارد می‌کند.

پیش از انجام آزمایش، مغزه‌ها به‌طور کامل در دستگاه اشباع مغزه، اشباع و آماده قرارگیری در دستگاه سیلاب‌زنی شدند. سپس، مغزه در محفظه مخصوص به خود قرار گرفته و ابتدا و انتهای آن محکم بسته می‌شود. فشار جانبی توسط پمپ دستی تأمین فشار به مغزه اعمال می‌شود. تزریق سیال به داخل مغزه توسط پمپ HPLC با دبی مشخص انجام می‌شود. پس از به تعادل رسیدن فشار سیال قبل و بعد از مغزه، مقدار تراوایی طبق رابطه داری (رابطه ۱) قابل محاسبه است. به منظور دقت بیشتر و کاهش خطای اندازه‌گیری، آزمایش‌ها در چندین دبی مختلف انجام می‌شود و نهایتاً مقدار تراوایی از طریق میانگین‌گیری به‌دست می‌آید. پس از تنظیمات اولیه دستگاه سیلاب‌زنی، تراوایی مغزه‌ها در فشارهای محصورکننده  $225\text{ psi}$ ،  $1450\text{ psi}$  و  $2900\text{ psi}$  در یک روند افزایشی مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت، نتایج به‌دست آمده به‌صورت مقایسه‌ای در دو بخش قبل و بعد از انجام آزمایش اسیدزنی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

(۱)

در این رابطه،  $L$  طول نمونه (ft)،  $A$  مساحت سطح مقطع ( $\text{ft}^2$ )،  $\mu_w$  گرانیروی ( $\text{bbl}/\text{Day}$ )،  $Q$  (cp) میزان دبی تزریق شده،  $\Delta p$  افت فشار (psi) و  $K$  تراوایی (mD) می‌باشد.

#### سیلاب‌زنی با اسید

اسیدزنی سازند، عملیاتی است که در فشاری کمتر از فشار شکست سازند انجام می‌شود. این عملیات در سازندهای کربناته بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در خلال تزریق اسید در این سازندها، فضاهای خالی کرمی شکل ایجاد می‌گردد که به‌علت نرخ بالای واکنش بین سطح سنگ و اسید است. در این آزمایش، عملیات تزریق اسید و آزمایش طراحی شده با استفاده از دستگاه اسیدزنی مدل CA-S30 (شکل ۳) مستقر در آزمایشگاه سنگ و سیال دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. این دستگاه مجهز به



شکل ۳ دستگاه اسیدزنی مغزه مدل CA-S30 و اجزای آن: (۱) چارچوب کلی دستگاه (۲) نگهدارنده مغزه (۳) حسگرهای ثبت فشار (۴) سیستم اعمال فشار معکوس (۵) نگهدارنده سیال تزریق (۶) پمپ پایی (۷) پمپ‌های تک سیلندری (۸) مخزن مخصوص جمع‌آوری پساب اسیدی [۲۷]

جدول ۴ حداکثر/حداقل نرخ تزریق اسید در آزمایش‌های طراحی شده

ردیف	نام نمونه	L (mm)	تخلخل (%)	Q (cc/min)	فشار محصورکننده (psi)
۱	۲۶۹۱/۶۶	۶۵/۵	۲۱/۴	۳/۶	۲۹۰۰
۲	۲۹۵۷/۸۶	۶۹/۳	۲۱/۶	۵/۸	۲۹۰۰
۳	۲۷۲۰/۱۸	۶۹/۳	۲۱/۵	۸/۱	۲۹۰۰
۴	۲۷۱۲/۱۹	۸۰/۳	۲۰/۲	۱۰/۴	۲۹۰۰
۵	۲۶۸۵/۳۹	۶۶/۷	۱۸/۱	۱۲/۷	۲۹۰۰
۶	۲۹۸۰/۵۵	۶۷/۲	۲۱/۱	۱۵/۰	۲۹۰۰



### تحلیل آزمایش‌ها

آزمایشات طراحی شده شامل اندازه‌گیری تراوایی قبل و پس از عملیات اسیدزنی بوده است. مجموع این آزمایش‌ها به همراه تحلیل تصاویر حاصل از سی‌تی اسکن مغزه‌ها پس از عملیات اسیدزنی، به منظور بررسی کیفی آزمایشات انجام شده مورد تفسیر قرار گرفته است. میزان نرخ تزریق اسید به درون مغزه‌ها به صورتی تنظیم شد که تمامی محدوده توان دستگاه را در برگیرد. بنابراین، عملیات اسیدزنی در شرایطی مشابه انجام شد. بدین ترتیب با ایجاد حفرات کرمی شکل و گسترش آن‌ها درون مغزه، میزان تراوایی پس از آن مورد اندازه‌گیری و مقایسه با مقدار اولیه قرار گرفت. این نتایج در ادامه به تفکیک در سه دسته کلی نتایج آزمایش تراوایی پیش از اسیدزنی، انجام عملیات تزریق اسید و اندازه‌گیری تراوایی پس از آن مورد تحلیل قرار

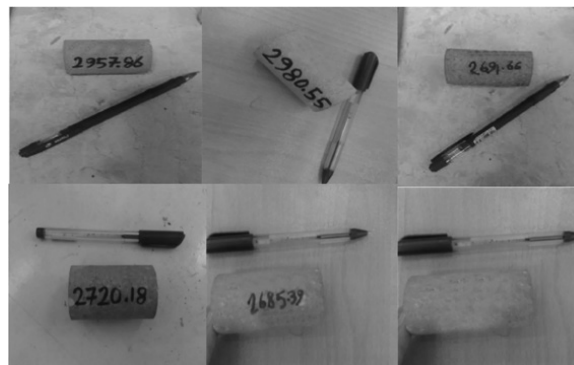
گرفته است.

### نتایج آزمایش تراوایی پیش از عملیات اسیدزنی

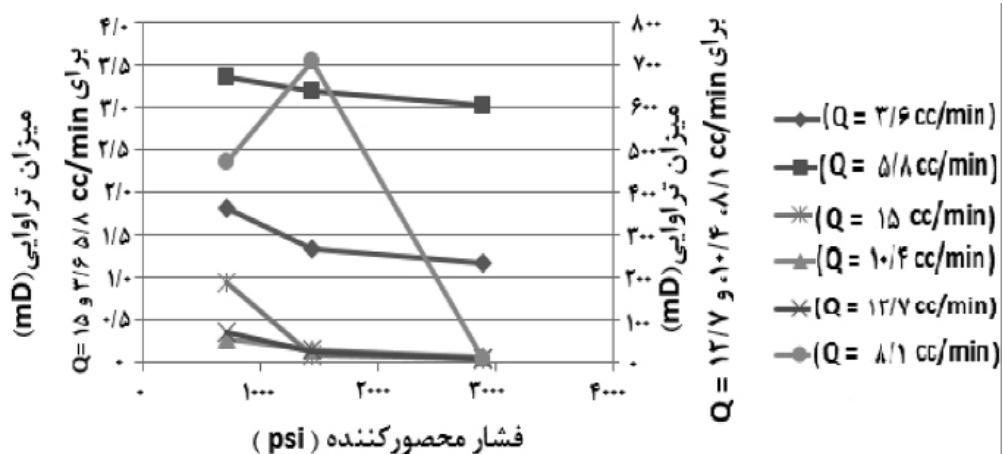
با انجام آزمایشات سیلاب‌زنی، تراوایی اولیه مغزه‌ها برای تمامی نمونه‌ها شکل ۴ در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi اندازه‌گیری شد. همچنین، مقادیر به دست آمده برای هر یک از نمونه‌ها در فشارهای محصورکننده مذکور بررسی گردید.

### تراوایی اولیه مغزه‌ها

به منظور بررسی اثر فشار محصورکننده بر روی تراوایی نمونه و تعیین ارتباط آنها، نمودار تغییرات تراوایی بر حسب فشار محصورکننده در شکل ۵ ترسیم شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، هر چه فشار محصورکننده افزایش می‌یابد، فضای خالی در نمونه سنگ متراکم می‌گردد.



شکل ۴ تصاویر مغزه‌های مورد آزمایش قبل از عملیات اسیدزنی



شکل ۵ روند کاهش تراوایی با افزایش مقدار فشار محصورکننده در مقادیر مختلف پیش از عملیات اسیدزنی

بررسی شد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

### اسیدزنی مغزه ۱

در شکل ۶، نمودار افت فشار دو سر نمونه نسبت به زمان ملاحظه می‌گردد. با توجه به دبی تزریق ۳/۶ cc/min، اسید ضمن تزریق در فرصت مناسبی ساختار کرمی شکل را در نمونه ایجاد کرده و به انتها رسانده است (شکل ۷). همچنین میزان افت فشار حدوداً در مدت زمان ۳۰۰ s اتفاق افتاده است. همان‌طور که در نتیجه سی‌تی اسکن نمونه نیز مشاهده می‌شود شکل ۱۹ دبی پایین تزریق باعث شده که در اطراف ساختار کرمی شکل، تراکم سنگ تقریباً به میزان قابل ملاحظه‌ای حفظ شده و انسجام نمونه در حد مناسبی باشد.

### اسیدزنی مغزه ۲

در شکل ۸ با افزایش دبی تا میزان ۵/۸ cc/min، ساختار کرمی شکل ایجاد شده در نمونه شکل ۹، مشابه با تزریق در دبی قبلی است با این تفاوت که افزایش دبی باعث تخریب اولیه نمونه به مقدار بیشتری شده است. این موضوع حاکی از تغییر سینتیک واکنش ناشی از افزایش فشار تزریق است. این فرآیند، در سی‌تی اسکن نیز به خوبی نمایان است شکل ۹ به علاوه، افت فشار در دو سر این نمونه پس از حدود ۹۰۰ s رخ داده است.

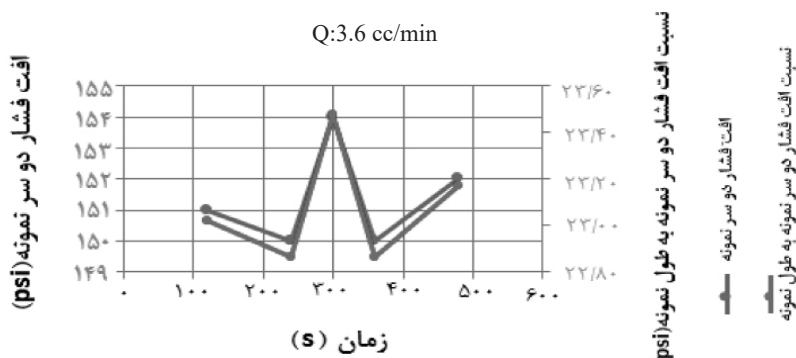
### اسیدزنی مغزه ۳

در شکل ۱۰ رفتاری متفاوت با دو نمونه قبل مشاهده می‌شود.

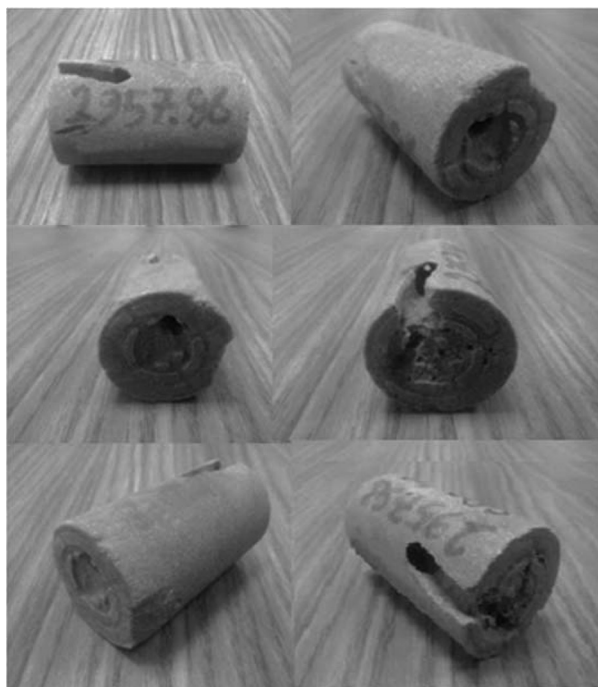
نهایتاً کاهش عبور سیال در مغزه و کاهش تراوایی در آن قابل ملاحظه است. همان‌طور که در نمودار تراوایی نمونه ۳ ( $Q=8.1\text{cc/min}$ ) ملاحظه می‌گردد، افزایش فشار محصورکننده بر روی میزان تراوایی اثر متفاوتی با سایر نمونه‌ها داشته است. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود میکروشکستگی‌هایی درون نمونه سنگ با قرارگیری در جهات مختلف باشد چرا که در برخی شرایط خاص که فشار محصورکننده و همه جانبه در مقادیر نه چندان بالایی اعمال می‌گردد، برآیند آن با نیروی شبه‌محوری حاصل از تزریق سیال، می‌تواند منجر به فشردن صفحات شکستگی عمود بر راستای جریان شود درحالی‌که می‌تواند چنین اثری در صفحات موازی با راستای اعمال نیرو مشاهده نگردد؛ اما با افزایش فشار همه جانبه در شرایط آماده‌سازی فازهای بعدی تزریق، امکان به هم پیوستن آنها و برقراری روابطی هرچند کم وجود دارد. همچنین، وجود ذرات متحرک درون نمونه نیز می‌تواند منجر به افزایش فشار و تغییر در تراوایی شود. علاوه بر این، خطاهای غیرقابل اجتناب در انجام آزمایش نیز عامل دیگری است که می‌تواند وجود داشته باشد.

### نتایج سیلاب‌زنی اسیدی مغزه‌ها

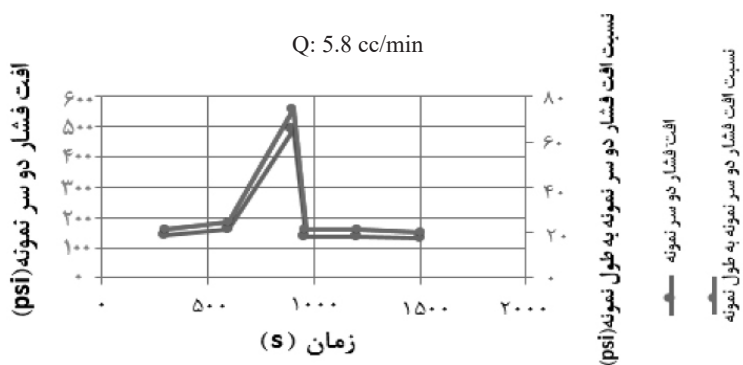
پس از تعیین تراوایی اولیه هر یک از نمونه‌ها، آزمایش سیلاب‌زنی اسیدی در دبی‌های مشخص شده با توجه به شرایط و محدودیت‌های دستگاه انجام شد. سپس، نحوه عملکرد اسید به وسیله تصاویر سی‌تی اسکن نمونه‌ها پس از اسیدزنی،



شکل ۶ نمودار اسیدزنی مغزه ۱ در دبی تزریق ۳/۶ cc/min



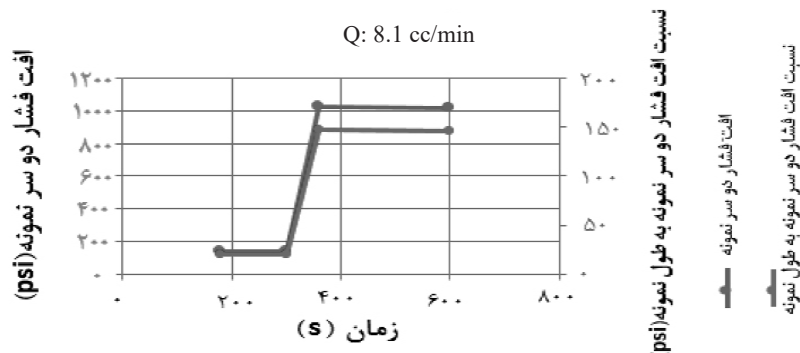
شکل ۷ تصویر مغزه ۱ بعد از عملیات اسیدزنی



شکل ۸ نمودار اسیدزنی مغزه ۲ در دبی تزریق ۵/۸ cc/min



شکل ۹ تصویر مغزه ۲ بعد از عملیات اسیدزنی



شکل ۱۰ نمودار اسیدزنی مغزه ۳ در دبی تزریق ۸/۱ cc/min

دبی با دو دبی قبل در شدت تخریبی است که در مغزه رخ داده است (شکل ۱۵). عملاً در این نمونه، تخریب صورت گرفته به ابتدای آن محدود نشده و بخش زیادی از آن را از بین برده است. تصویر سی تی اسکن مغزه نیز حاکی از تراکم کم نمونه در بخش‌های باقی‌مانده آن است (شکل ۲۱). همچنین، افت فشار در نمونه در زمان حدوداً ۳۰۰ s مشاهده می‌گردد.

#### اسیدزنی مغزه ۶

در نمونه ۶ شکل ۱۶ که تراوایی اولیه کمتری به نسبت سایر نمونه‌ها دارد، افزایش دبی تا حداکثر میزان قابل تزریق توسط پمپ دستگاه باعث شده تا تلفیقی از تخریب حاصل از هجوم اولیه اسید در قالب اثرگذاری آن در متن ماتریس سنگ و همچنین ایجاد ساختار کرمی شکل در مغزه اسیدزنی شده مشاهده شود (اشکال ۱۷ و ۲۱). همچنین، میزان افت فشار در این نمونه نیز حدوداً پس از گذشت ۳۶۰ s رخ داده است. بعد از آن در زمان حدوداً ۴۸۰ s تا ۶۰۰ میزان فشار افزایش می‌یابد و این امر احتمالاً به دلیل وجود رسوبات داخل نمونه و جابه‌جایی آن‌ها می‌باشد که موجب مسدود شدن مسیر عبور سیال و به دنبال آن افزایش فشار شده است.

#### نتایج آزمایش‌های تراوایی بعد از عملیات اسیدزنی

پس از تکمیل آزمایش‌های اسیدزنی با توجه به شرایط مذکور، مجدداً آزمایشات سیلاب‌زنی برای بررسی اثر اسیدزنی بر روی تراوایی مغزه‌ها انجام شده است.

به این صورت که در اثر تزریق اسید به درون نمونه، ساختار کرمی شکل تشکیل نشده است. در حقیقت، اسید تزریق شده از تمام فضای ماتریس سنگ عبور کرده است (شکل ۲۰). همچنین، افزایش حجم اسید ناشی از افزایش دبی، منجر به تخریب آشکارتر ابتدای مغزه نسبت به دو مغزه قبلی شده است که در تصویر شکل ۱۱ نیز به خوبی نشان داده می‌شود. این موضوع به دلیل تراوایی اولیه نسبتاً بالاتر این نمونه به نسبت سایر مغزه‌ها بوده و عملاً باعث رخ دادن چنین رفتاری شده است. به علاوه، افت فشار در دو سر نمونه در زمان حدوداً ۲۰۰ s حادث شده است.

#### اسیدزنی مغزه ۴

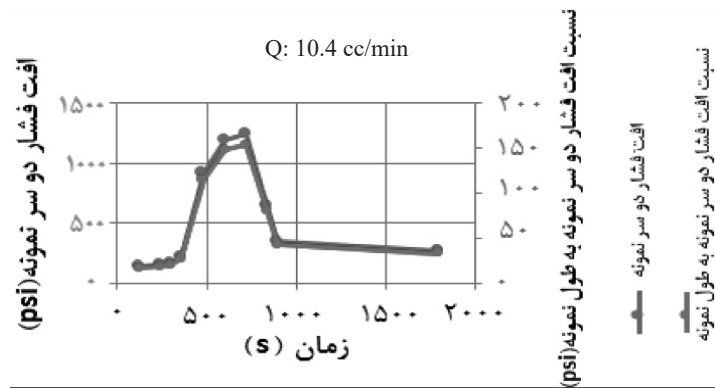
در نمونه ۴ شکل ۱۲ همانند مغزه ۳، آثار هجوم اسید در ابتدای مغزه مشاهده می‌شود (شکل ۱۳). این مغزه نیز عملاً بدون ساختار کرمی شکل واضح، اسید را از تمام فضای خود عبور داده است. در قیاس با نمونه ۳ که تراوایی اولیه بالاتری نسبت به نمونه ۴ دارد، در مغزه ۴ این اتفاق به دلیل افزایش فشار ناشی از افزایش دبی است. این امر باعث شده تا ساختار کرمی شکل پنهان موجود در سنگ (شکل ۲۰) نیز به انتهای آن نرسد. در این نمونه هم میزان افت فشار در زمان حدوداً ۷۰۰ s اتفاق افتاده است.

#### اسیدزنی مغزه ۵

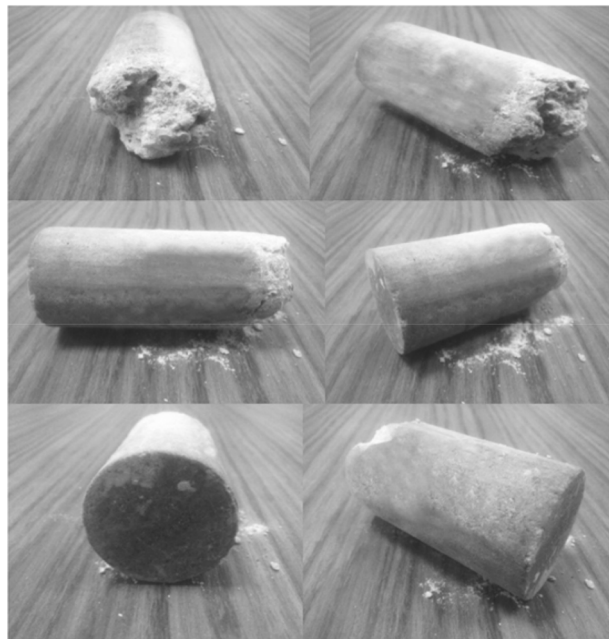
در نمونه ۵ شکل ۱۴ در اثر تزریق اسید همانند دو مغزه قبلی اشکال ۱۱ و ۱۳ ساختار کرمی شکل مشاهده نمی‌شود. تفاوت نتیجه رخ داده در این



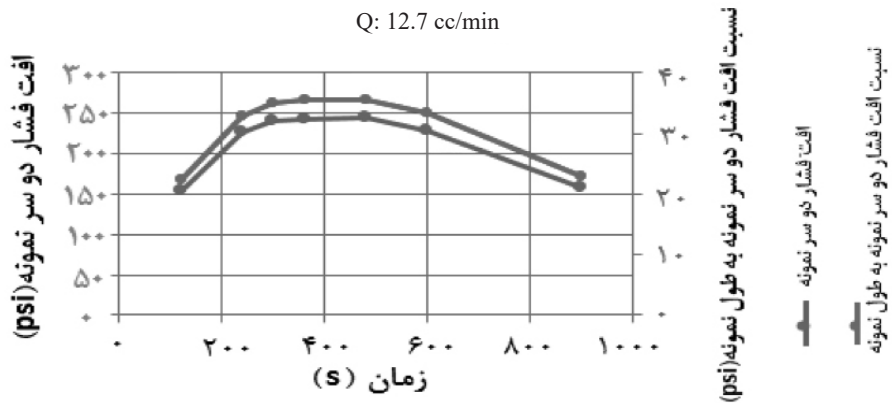
شکل ۱۱ تصویر مغزه ۳ بعد از عملیات اسیدزنی



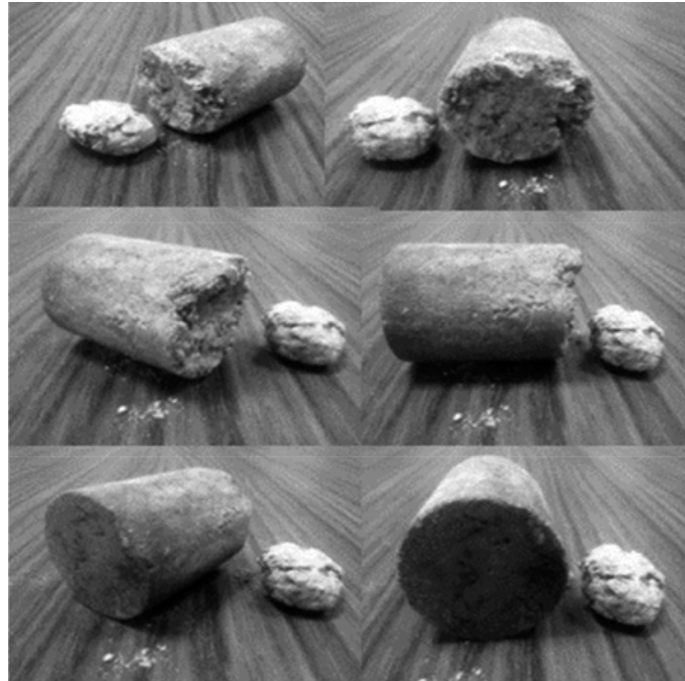
شکل ۱۲ نمودار اسیدزنی مغزه ۴ در دبی تزریق ۱۰/۴ cc/min



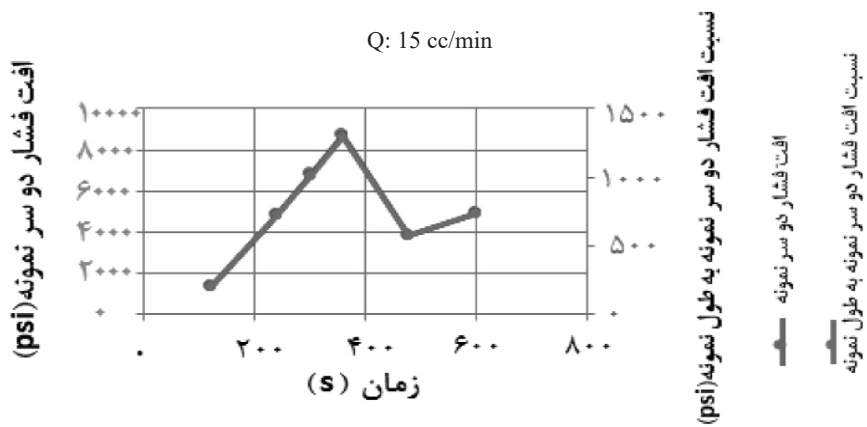
شکل ۱۳ تصویر مغزه ۴ بعد از عملیات اسیدزنی



شکل ۱۴ نمودار اسیدزنی مغزه ۵ در دبی تزریق ۱۲/۷ cc/min



شکل ۱۵ تصویر مغزه ۵ بعد از عملیات اسیدزنی



شکل ۱۶ نمودار اسیدزنی مغزه ۶ در دبی تزریق ۱۵ cc/min



شکل ۱۷ تصویر مغزه ۲۶۹۱/۶۶ بعد از عملیات اسیدزنی

جز مغزه ۵ پس از عملیات اسیدزنی کاهش یافته است که این کاهش قابل پیش‌بینی بود. در مغزه ۵، این افزایش را می‌توان ناشی از خطاهای غیرارادی و یا وجود برخی عوامل طبیعی کاهنده تراوایی که پیش از این اشاره شد دانست. در مورد برخی نمونه‌ها مقدار تراوایی نسبت به سایر نمونه‌ها بالاست. این مقدار احتمالاً به دلیل ذات تراوایی آنها به دلیل برداشت از مناطق خاصی از مخزن می‌باشد.

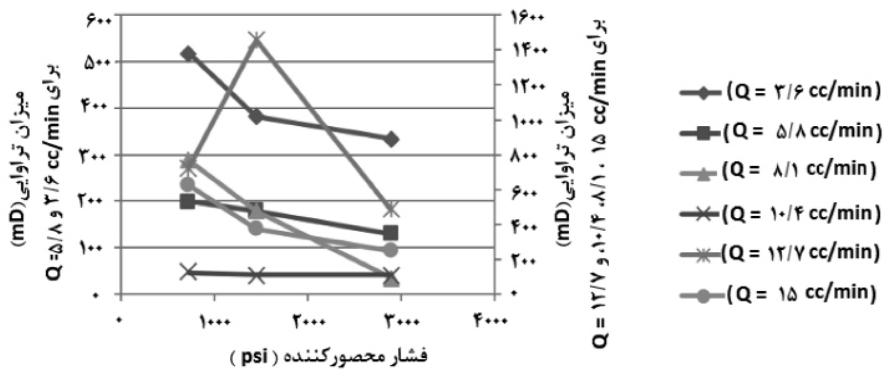
#### تصاویر سی‌تی اسکن مغزه‌ها

پس از اتمام آزمایش‌های اسیدزنی، جهت مطالعه ساختار داخلی مغزه‌ها، شناسایی شکستگی‌ها، نحوه ارتباط فضای متخلخل و نحوه توزیع طول حفره کرمی شکل در اثر عملیات اسیدزنی تصاویر سی‌تی اسکن در سه جهت مختلف و در مقاطع طولی و عرضی فراهم شده است. در نهایت با تصاویری که از سی‌تی اسکن انجام شده در تعداد ۳۵۰ برش در جهت طولی و ۱۸۰ برش در دو جهت عرضی مغزه به دست آمده است و همچنین در نظر گرفتن زمان عملیات اسیدزنی و طول حفره کرمی شکل ایجاد شده، مناسب‌ترین نرخ تزریق فشار در این آزمون ارائه شده است.

و نتایج آن به ترتیب در نمودارهای شکل ۱۸ مورد اشاره و تحلیل قرار خواهند گرفت.

#### تراوایی ثانویه مغزه‌ها

با توجه به شکل ۱۸، میزان تراوایی‌ها بعد از عملیات اسیدزنی افزایش یافته است؛ اما با افزایش فشارهای محصورکننده، مقدار تراوایی کاهش می‌یابد که این امر احتمالاً به علت بسته شدن برخی خلل و فرج در نمونه و در نتیجه کاهش تراوایی آن می‌باشد. همچنین، افزوده شدن گاز در خلال فرآیند انحلال، منجر به ورود فاز گازی شکل به بخش مایع می‌شود که می‌تواند منجر به فاصله گرفتن مایع از رفتار عادی آن گردد. در نمودار مغزه ۵ ( $Q=12.7\text{cc/min}$ ) افزایش فشار محصورکننده در مقدار ۱۴۵۰ psi سبب افزایش میزان تراوایی در مقایسه با فشار محصورکننده ۲۹۰۰ psi شده است. علت این امر می‌تواند به دلیل تغییر در ساختار داخلی سنگ پس از اسیدزنی باشد. چرا که در طی عملیات اسیدزنی، رسوبات ایجاد شده با حرکت خود در نقاط جدیدتری نسبت به نمونه قرار می‌گیرند. در نهایت، نتایج به دست آمده از انجام آزمایشات نشان می‌دهد که میزان تراوایی در تمامی نمونه‌ها به



شکل ۱۸ روند کاهش میزبان تراوایی با افزایش مقدار فشار محصورکننده در مقادیر مختلف پس از عملیات اسیدزنی

باعث رخ دادن چنین رفتاری شده است. با مشاهده شکل‌های مغزه ۴، آثار هجوم اسید در ابتدای نمونه کاملاً واضح است. این نمونه نیز عملاً بدون ساختار کرمی شکل، اسید را از تمام فضای خود عبور داده است. این اتفاق به دلیل افزایش فشار ناشی از افزایش دبی تزریق است که منجر شده تا ساختار کرمی شکل پنهان موجود در سنگ تا انتهای نمونه حفظ نشود. در شکل ۲۱ مغزه ۵، نیز در اثر تزریق اسید همانند دو نمونه قبلی در دبی‌های تزریق  $8/1 \text{ min}$  و  $10/4 \text{ cc/min}$ ، حفره کرمی شکل مشاهده نمی‌شود. عملاً در این نمونه تخریب صورت گرفته به ابتدای آن محدود نشده و بخش زیادی از آن را از بین برده است. شواهد موجود در تصاویر مذکور نیز حاکی از تراکم کم نمونه در بخش‌های باقی‌مانده آن است. همان‌گونه که در شکل ۲۱ مغزه ۶ ملاحظه می‌گردد، با توجه به مقدار تراوایی اولیه کمتری که نسبت به سایر نمونه دارد، افزایش دبی تا حداکثر میزان قابل تزریق توسط پمپ دستگاه ( $15 \text{ cc/min}$ ) باعث شده تا تلفیقی از تخریب حاصل از هجوم اولیه اسید و همچنین، ایجاد ساختار کرمی شکل در نمونه اسیدزنی شده مشاهده شود.

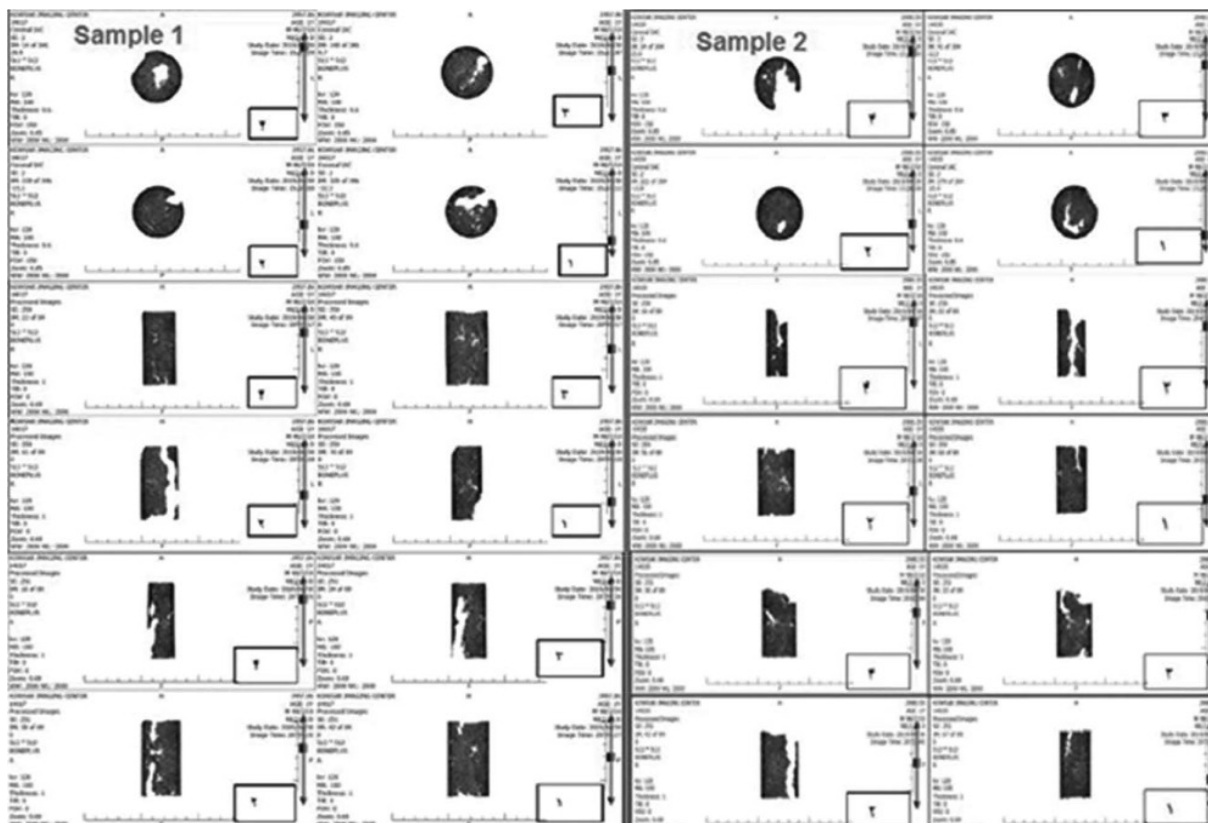
### بحث و بررسی

با توجه به تزریق اسید در دبی‌های مختلف به درون مغزه‌ها، ساختار نفوذپذیر ایجاد شده در نمونه‌ها به اشکال متفاوتی ایجاد شده است.

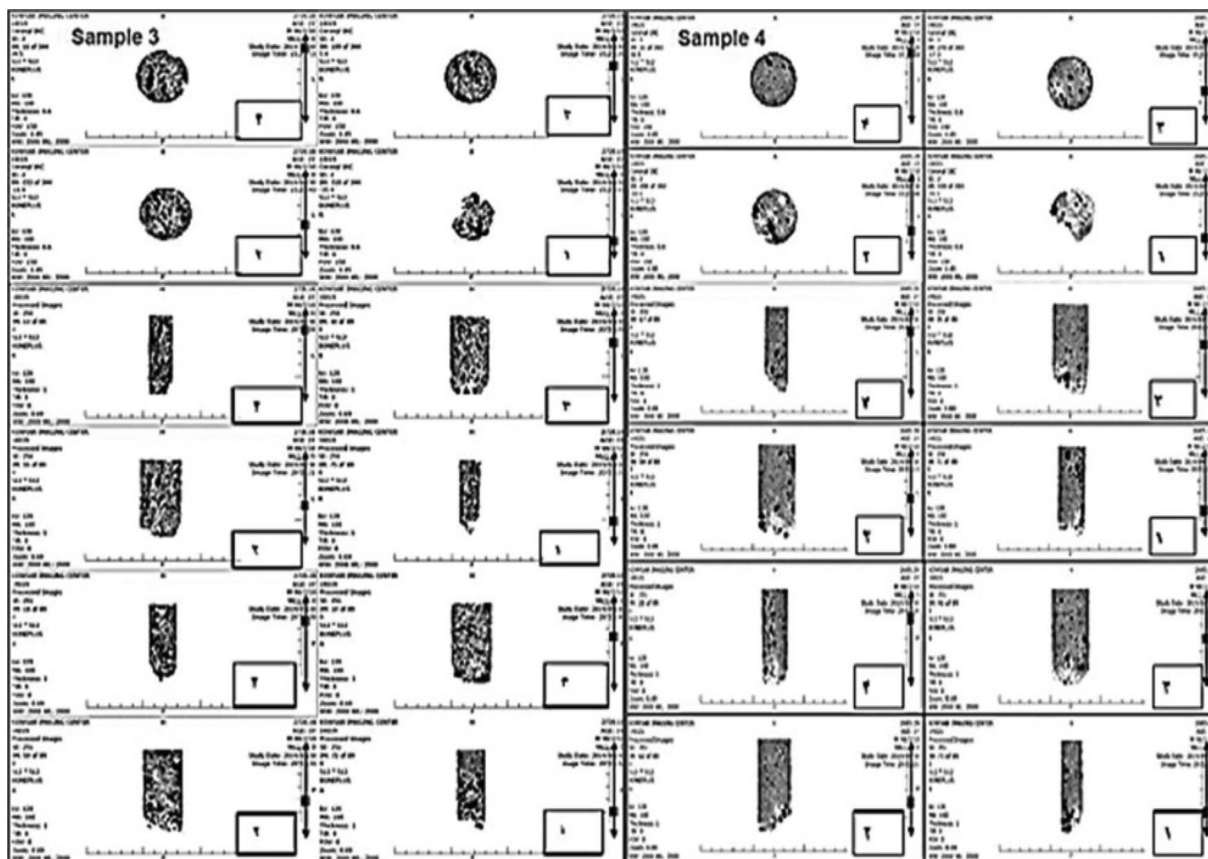
### تحلیل تصاویر سی تی اسکن مغزه‌ها

در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ تصاویر سی تی اسکن نمونه بعد از فرآیند اسیدزنی در سه جهت مختلف آورده شده است. تصاویر به ترتیب از شماره ۱ تا ۴ مسیر حرکت اسید در حین تزریق به نمونه را نشان می‌دهند. در شکل ۱۹ مغزه ۱، نمونه در جهت محور طولی قرار داده شده و تصویر شماره ۱ از برش شماره ۲۱، در یک سوم ابتدایی طول نمونه، تصویری واضح از چگونگی فرآیند تشکیل حفره کرمی شکل را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به مقاطع برشی در جهات محور  $Y$  و  $Z$ ، دبی پایین تزریق ( $3/6 \text{ cc/min}$ ) باعث شده که در اطراف ساختار کرمی شکل، تراکم سنگ تقریباً به میزان قابل ملاحظه‌ای حفظ شود. همان‌گونه که در تصاویر مغزه ۲ ملاحظه می‌گردد، با افزایش دبی تزریق ( $5/8 \text{ cc/min}$ ) ساختار کرمی شکل ایجاد شده مشابه با دبی تزریق  $3/6 \text{ cc/min}$  می‌باشد با این تفاوت که در این نمونه تخریب بیشتری ایجاد شده است که می‌تواند به دلیل تغییر سینتیک واکنش ناشی از افزایش فشار تزریق باشد. مطابق با شکل ۲۰ مغزه ۳، رفتاری متفاوت با دو نمونه قبلی دارد. به این صورت که در اثر تزریق اسید ساختار کرمی شکل ایجاد نشده است. همچنین، اسید تمام فضای ماتریس سنگ را تحت تأثیر قرار داده و افزایش حجم اسید ناشی از افزایش دبی منجر به تخریب آشکارتری در یک سوم ابتدایی نمونه شده است. این موضوع به دلیل تراوایی اولیه بالاتر این نمونه به نسبت سایر نمونه‌ها بوده و

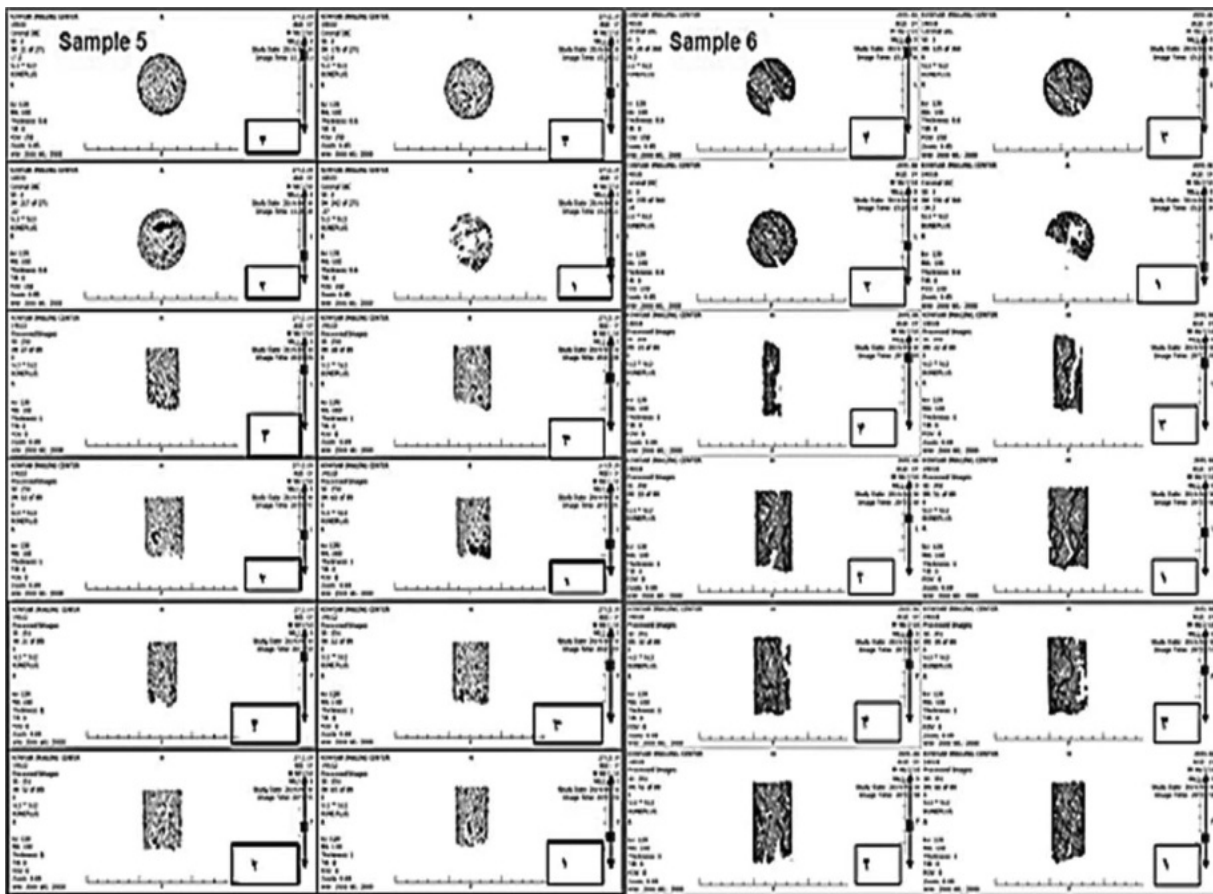




شکل ۱۹ تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۱ و ۲ عمود بر محور  $x, y$  و  $z$  بعد از عملیات اسیدزنی



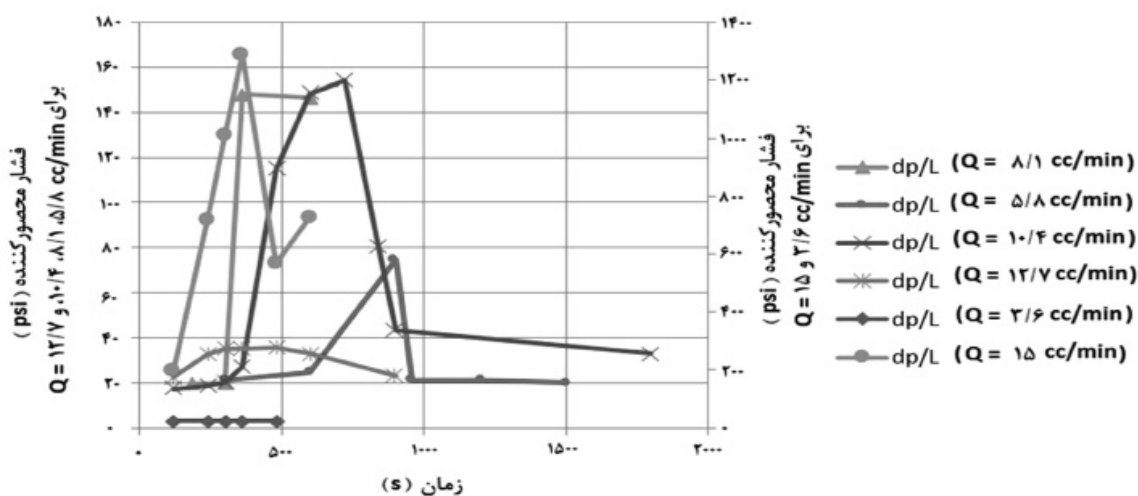
شکل ۲۰ تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۳ و ۴ عمود بر محور  $x, y$  و  $z$  بعد از عملیات اسیدزنی



شکل ۲۱ تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۵ و ۶ عمود بر محور  $x, y$  و  $z$  بعد از عملیات اسیدزنی

مورد سه نمونه ۱، ۲ و ۶، نمودار افت فشار مربوط به دو سر مغزه نسبت به زمان است. در مورد نمونه ۱ که متناظر با دبی تزریق  $3/6 \text{ cc/min}$  می‌باشد، افت فشار حدوداً در زمان  $300 \text{ s}$  رخ می‌دهد. در مورد نمونه ۲، این اتفاق پس از حدوداً  $900 \text{ s}$  حادث می‌شود و در مورد نمونه ۶، پس از حدوداً  $360 \text{ s}$  این اتفاق رخ می‌دهد (شکل ۲۲). بنابراین، شرایط تزریق طبق برنامه اجرا شده برای دو نمونه ۱ و ۶، مناسب‌تر از نمونه ۲ می‌باشد. این درحالی است که اگر میزان افزایش تراوایی نیز برای هر یک از مغزه‌ها مورد محاسبه قرار گیرد، می‌توان به معیار مناسبی جهت مقایسه نتایج با یکدیگر دست یافت (جدول ۵). بدین منظور از مقادیر میانگین برای محاسبه تراوایی اولیه جدول ۶ و ثانویه جدول ۷ می‌توان استفاده کرد.

همان‌طور که اشاره شد عوامل متفاوتی در عملیات اسیدزنی مانند دما، فشار و غلظت اسید نقش دارند. با توجه به یکسان بودن شرایط انجام آزمایش برای مغزه‌ها، عملاً با تغییر دبی تزریق، میزان فشار وارده به نمونه‌ها نیز تغییر می‌کند. به این صورت می‌توان تغییرات فشاری رخ داده در هر یک نمونه‌ها را (در بازه فشار کم تا زیاد) به‌طور مناسبی مشاهده کرد. همچنین، افزایش تراوایی مغزه‌ها به‌میزان قابل قبولی در تمامی آنها مشاهده می‌شود. اما در سه نمونه ۱، ۲ و ۶، آثار ایجاد ساختار کرمی شکل به‌وضوح دیده می‌شود. در سه نمونه دیگر، این ساختار یا ایجاد نشده و یا به‌صورت پنهان و ناقص و ضعیف ایجاد شده است. این مواردی است که در مقاطع سی تی اسکن تهیه شده از مغزه‌ها پس از آزمایش اسیدزنی نیز به‌وضوح ملاحظه می‌گردد. نکته قابل توجه در



شکل ۲۲ مقایسه آثار هجوم اسید در دبی‌های تزریق متفاوت

جدول ۵ مقایسه میانگین تراوایی مغزه‌ها قبل و بعد از عملیات اسیدزنی

ردیف	نمونه	دبی تزریق (cc/min)	میانگین تراوایی اولیه (k1)	میانگین تراوایی ثانویه (k2)	k2/k1
۱	۲۹۵۷/۸۶	۳/۶	۱/۴۴	۴۱۱/۲۶	۲۸۵/۵۹
۲	۲۹۸۰/۵۵	۵/۸	۳/۱۸	۱۶۹/۸۵	۵۳/۴۱
۳	۲۷۲۰/۱۱۸	۸/۱	۳۹۶/۰۵	۴۴۷/۰۷	۱/۱۳
۴	۲۶۸۵/۳۹	۱۰/۴	۳۲/۹۸	۱۱۶/۵۰	۳/۵۳
۵	۲۷۱۲/۱۹	۱۲/۷	۳۵/۵۰	۸۸۸/۸۲	۲۵/۰۴
۶	۲۶۹۱/۶۶	۱۵/۰	۰/۷۸	۴۱۶/۵۸	۵۳۴/۰۷

جدول ۶ مقایسه تراوایی مغزه‌ها قبل از عملیات اسیدزنی در فشارهای محصورکننده مختلف

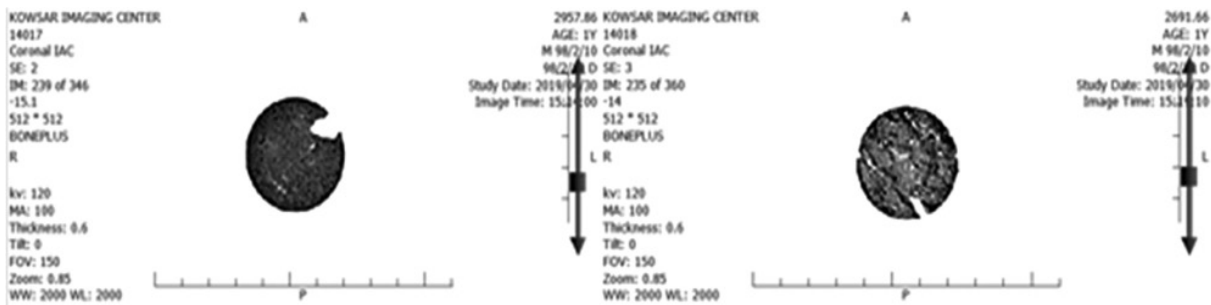
ردیف	نمونه	مقادیر تراوایی در فشارهای محصورکننده مختلف		
		فشار محصورکننده ۷۲۵ Psi	فشار محصورکننده ۱۴۵۰ Psi	فشار محصورکننده ۲۹۰۰ Psi
۱	۲۹۵۷/۸۶	۱/۸۲	۱/۳۴	۱/۱۷
۲	۲۹۸۰/۵۵	۳/۳۵	۳/۱۸	۳/۰۱
۳	۲۷۲۰/۱۱۸	۴۷۱/۷۳	۷۰۷/۵۹	۸/۸۴
۴	۲۶۸۵/۳۹	۵۴/۴۴	۳۱/۴۳	۱۳/۰۸
۵	۲۷۱۲/۱۹	۷۱/۶۲	۲۷/۸۵	۷/۰۳
۶	۲۶۹۱/۶۶	۰/۹۳	۰/۰۹	۰/۰۵

جدول ۷ مقایسه تراوایی مغزه‌ها بعد از عملیات اسیدزنی در فشارهای محصورکننده مختلف

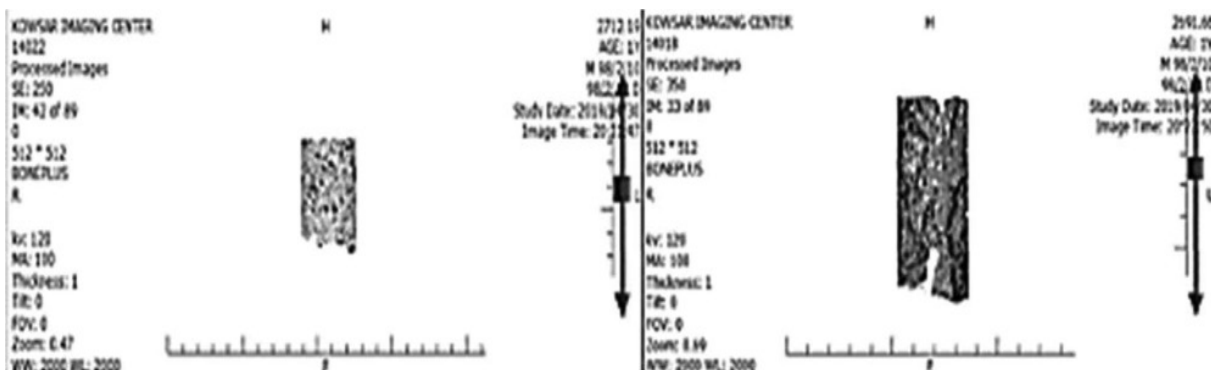
مقادیر تراوایی در فشارهای محصورکننده مختلف			نمونه	ردیف
فشار محصورکننده ۲۹۰۰ Psi	فشار محصورکننده ۱۴۵۰ Psi	فشار محصورکننده ۷۲۵ Psi		
۳۳۴/۴	۳۸۱/۷	۵۱۷/۷	۲۹۵۷/۸۶	۱
۱۳۰/۴۳	۱۷۸/۷۳	۲۰۰/۴۰	۲۹۸۰/۵۵	۲
۹۶/۵۳	۴۷۶/۹۵	۷۶۷/۷۳	۲۷۲۰/۱۸	۳
۱۱۲	۲۵/۱۱۲	۱۲۵	۲۶۸۵/۳۹	۴
۴۸۴/۸۱	۱۴۵۴/۴۳	۷۲۷/۲۲	۲۷۱۲/۱۹	۵
۲۴۹/۹۵	۳۷۴/۹۲	۶۲۴/۸۷	۲۶۹۱/۶۶	۶

مورد، به‌صورت کاهش شدت رنگ و نمایش فضای متخلخل در نمونه به‌وضوح قابل مشاهده است. همچنین با توجه به شکل ۲۴ و قیاس با ساختار مشابه ایجاد شده در نمونه ۵، در اثر هجوم اسید طول نمونه آسیب خیلی کمتری دیده و حفره کرمی شکل به‌وضوح در آن تشکیل شده است.

ضمناً درخصوص نمونه ۶ ذکر این نکته لازم است که تأثیر اسید، به تشکیل حفرات کرمی شکل محدود نمی‌شود؛ بلکه نتایج سی‌تی اسکن در شکل ۲۳ نشان می‌دهد. که در قیاس با ساختار مشابه رخ داده نسبت به نمونه ۱، تراکم فضای اطراف حفره اصلی نیز به مراتب کاهش یافته است. این



شکل ۲۳ مقایسه تراکم فضای اطراف حفره کرمی شکل ایجاد شده در مغزه‌های ۱ و ۶ که میزان آسیب تحمیل شده به مغزه ۶ و کاهش میزان تراکم آن کاملاً مشهود است



شکل ۲۴ مقایسه آثار هجوم اسید در اثر تزریق و تشکیل حفره کرمی شکل

## نتیجه گیری

در نتیجه، کاهش فضاهای خالی مابین آن‌ها دانست. مقایسه تراوایی اولیه و ثانویه نمونه‌ها حاکی از افزایش ۵۳۰ برابری تراوایی نمونه ۶ است که درخور توجه می‌باشد. این افزایش همراه با ساختار غالب حفره شکل گرفته در ماتریس اثر پذیرفته از اسید است. بنابراین، افزایش تراوایی با شکل‌گیری حفره غالب اتفاق افتاده که کاملاً مورد پذیرش می‌باشد. نکته دیگری که در زمان عبور اسید از نمونه‌ها می‌توان مطرح نمود این است که مقایسه این زمان‌ها از طول نمونه‌ها نشان می‌دهد زمان تأثیر اسید تزریق شده با نرخ ۱۵ cc/min با توجه به افزایش تراوایی کاملاً مطلوب است. درحقیقت نتایج اسیدکاری نشان می‌دهد که افزایش تراوایی با توجه به الگوی حفره کرمی شکل تشکیل شده در ساختار سنگ در مورد دو نمونه ۶ و ۱ کاملاً قابل قبول بوده و حفره کرمی شکل به‌صورت مناسبی در هر دو تشکیل شده است. این ساختار درخصوص نمونه ۶ با نرخ تزریق ۱۵ cc/min بیانگر ساختار غالب می‌باشد که با نتایج سایر پژوهش‌ها [۶] نیز مطابقت دارد.

نتایج آزمایشات نشان می‌دهد در تمامی نمونه‌ها افزایش تراوایی به‌میزان قابل توجهی رخ داده است. این افزایش حتی در نمونه ۳ که تراوایی اولیه بالایی از خود نشان داده نیز به روشنی دیده می‌شود. در نمونه ۶، تراوایی بیش از ۵۳۰ برابر و تراوایی نمونه ۱ بیش از ۲۸۵ برابر افزایش داشته است. این میزان برای نمونه ۲ بیش از ۵۳ برابر بوده و درخصوص مابقی نمونه‌ها، مقدار بسیار کمتری دارد. این موارد نشان می‌دهد که تشکیل حفرات کرمی شکل کامل درون نمونه‌ها در افزایش تراوایی آنها نقش مهمی ایفا کرده است. با مقایسه روند تراوایی نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات اسیدزنی می‌توان به این نتیجه دست یافت که افزایش فشار محصورکننده در هر دو بخش قبل و بعد از اسیدزنی منجر به کاهش تراوایی شده است. این موضوع حتی در شرایطی که تزریق اسید منجر به از بین رفتن بخش‌هایی از نمونه شده است، به‌وضوح دیده می‌شود. دلیل این امر را می‌توان نزدیک شدن ذرات تشکیل‌دهنده سنگ به یکدیگر و

## مراجع

- [1]. Gereb j j, Stosser S M (1968) Assignee the Dow chemical CO. Treatment of Deep wells, Issued April 23, 1: 1935.
- [2]. Broaddus G C, Knox J A, Fredrickson S E (1968) Dynamic etching tests and their use in planning acid treatments, In: SPE 2362 Presented at the Oklahoma Regional Meeting of SPE of AIME, Stillwater, Oklahoma, October 25.
- [3]. McLeod H O (1984) Matrix acidizing, Journal of Petroleum Technology, 36.12: 2-055.
- [4]. Anderson M S, Fredrickson S E (1987) Dynamic etching tests aid fracture acidizing treatment design low permeability reservoirs symposium, Society of Petroleum Engineers, OnePetro.
- [5]. Hoefner M L, H S Fogler (1989) Fluid-velocity and reaction-rate effects during carbonate acidizing: application of network model, SPE production engineering, 4, 01: 56-62.
- [6]. Wang Y, Hill A D, Schechter R S (1993) The optimum injection rate for matrix acidizing of carbonate formations, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- [7]. Paccaloni G, Mauro T (1993) Advances in matrix stimulation technology, Journal of Petroleum Technology 45.03: 256-263.
- [8]. Fredd C N (2000) Dynamic model of wormhole formation demonstrates conditions for effective skin reduction during carbonate matrix acidizing, SPE 59537, Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, OnePetro.
- [9]. Bazin B (2001) From matrix acidizing to acid fracturing: a laboratory evaluation of acid/rock interactions, SPE Production and Facilities 16, 01: 22-29.
- [10]. Panga M, Balakotaiah V, Ziauddin M (2002) Modeling, simulation and comparison of models for wormhole formation during matrix stimulation of carbonate, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro.
- [11]. Chen C, Guo J, Zhao J (2005) Novel Calculation method of the acid leak-off considering the effect of acid wormhole, Drilling & Production Technology, 27, 5: 78-80.

- [12]. Nevito Gomez J (2006) Design, set up, and testing of a matrix acidizing apparatus (Doctoral dissertation, Texas A&M University).
- [13]. Pournik M, Zou C, Malagon Nieto C, Melendez M G, Zhu D, Hill A D (2007) Smallscale fracture conductivity created by modern acid fracture fluids, In: SPE 106272 Presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, College Station, Texas, U.S.A., January 29–31.
- [14]. Lungwitz B, Fredd C, Brady M, Miller M, Ali S, Hughes K (2007) Diversion and cleanup studies of viscoelastic surfactant based self-diverting acid, SPE Production and Operations, 22, 01, 121-127.
- [15]. Gomaa A M, Nasr-El-Din H A (2009) Acid fracturing: the effect of formation strength on fracture conductivity, In: Paper SPE 119623 Presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, the Woodlands, Texas, USA, January 19–21.
- [16]. Antelo L F, Pournik M, Zhu D, Hill A D (2009) Surface etching pattern and its effect on fracture conductivity in acid fracturing, 119743 Presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, Texas, USA. January 19-21.
- [17]. Pournik M, Gomaa A, Nasr-El-Din H A (2010) Influence of acid-fracture fluid properties on acid-etched surfaces and resulting fracture conductivity, In: SPE 128070 Presented at the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, February 10–12.
- [18]. Zhao W Z, Shen A J, Hu S Y, Zhang B M, Pan W Q, Zhou J G, Wang Z C (2012) Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China, 39, 1: 1-14.
- [19]. Soroush H, Ginty W, Pan C (2018) Geomechanics-based hydraulic fracturing modelling for tight gas carbonates: case study of naushahro feroz field in pakistan, ARMA 18-1385, American Rock Mechanics Association, OnePetro.
- [20]. Zhang R, Hou B, Zhou B, Liu Y, Xiau Y, Zhang K (2020) Effect of acid fracturing on carbonate formation in southwest China based on experimental investigations, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 73: 103057.

[۲۱]. محترمی الف، باغبانان ع، "شبییه‌سازی تجربی فرآیند اسیدکاری و تأثیرات آن بر خصوصیات مکانیکی سنگ مخزن"، همایش و نمایش ملی تجهیزات و مواد آزمایشگاهی صنعت نفت ایران، دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۹۵.

[۲۲]. چراغی ر، باغبانان ح، "بررسی اسیدهای آلی مورد استفاده در عملیات اسید کاری به‌منظور افزایش تولید در مخازن کربناته"، سومین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربنی و صنایع بالا دستی، تهران، ایران، ۱۳۹۳.

[۲۳]. خدروی س، صمدی ف، "طراحی فرآیند اسیدکاری ماتریس در مخازن کربناته"، اولین کنفرانس ملی فن‌آوری‌های نوین در شیمی و مهندسی شیمی، مرکز همایش‌های بین‌المللی آگینه تهران، ایران، ۱۳۹۲.

[۲۴]. شیخی ف، "مطالعه آزمایشگاهی بررسی تأثیرتراوایی اولیه سنگ کربناته در تعیین نرخ بهینه تزریق اسید"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران، ۱۳۹۸.

[۲۵]. شرکت مهرگام پرتوشار، (۱۳۷۱) مقالات آنالیز دستگاہی پراش پرتو <https://partoshar.com>.

[26]. Shinjiro H, Yuki H, Shan Q, Hirofumi N, Takeshi H (2008) Characterization of calcium carbonate polymorphs with ca k edge x-ray absorption fine structure spectroscopy, Analytical Sciences, 24, 7: 835-837.

[۲۷]. لطفی م، تخم‌چی ب، "افزایش تاب‌آوری دستگاہ‌های سیلاب‌زنی و اسیدزنی مغزه آزمایشگاه سنگ و سیال با رویکرد کاهش هزینه"، همایش ملی و مدیریت مدیریت ریسک و تاب‌آوری در صنایع معدنی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران، صفحه ۴ و ۵، ۱۳۹۸.

# Determining the Appropriate Rate of Acid Injection in Carbonate Formations to Increase Permeability

Farnaz Sheikhi Boojani, Ahmad Ramezanzadeh\*, Mohammad Lotfi  
 Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Iran  
 aramezanzadeh@shahroodut.ac.ir  
 DOI: 10.22078/pr.2021.4175.2893

Received: May/19/2020

Accepted: November/10/2020

## Introduction

Acidizing operations in carbonate reservoirs make it possible to improve permeability in addition to creating a passageway in the damaged area around the well. The first observations and descriptions of hydraulic fracturing were made by Stoesser and Grebe in 1935, who used acid to stimulate the oil well in the carbonate formation [1]. It was shown by Anderson in 1987 that the hydraulic conductivity of the sample decreased as the sample confining pressure increased by designing experiments with a specific flow rate [2]. Bazin in 2001 conducted laboratory studies to determine the optimal injection rate through the interaction between 15% hydrochloric acid and limestone. In these studies, it was observed that the optimal injection rate increases with an increase in concentration, temperature and rock permeability [3]. Zhang et al in 2020 experimentally found out that the rock mechanics properties change a lot after acidizing clean acid and gelled acid. Gelled acid reduces compression strength and Poisson's ratio, but clean acid decreases tensile strength and Young's modulus [4].

## Materials and Methods

Acidizing experiments on reservoir samples were designed for laboratory study of how these parameters affect the permeability of carbonate formations. These steps are divided into two sections: "performing experiments" and "analyzing the results" (Figure 1).

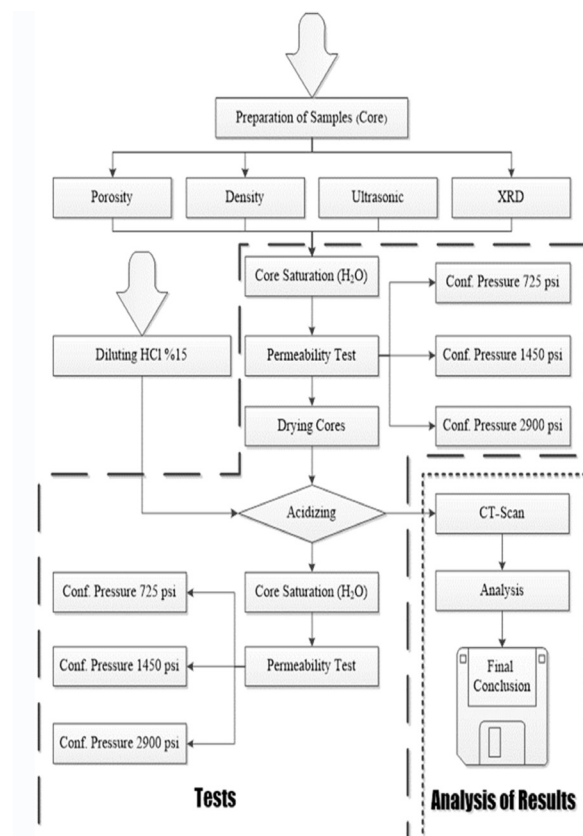


Fig. 1 General process of conducting experiments.

To do this, six carbonate cores with a diameter of 1.5 in from one of Iran's oil fields were prepared.

The selected fluids were 15% hydrochloric acid and water. The XRD was also used to determine the percentage of minerals that make up the cores.

Prior to the destructive acid testing experiment, a series of non-destructive tests were performed to determine the physical and mechanical characteristics of the cores.

In order to monitor the effectiveness of acidizing operations during the experiment, permeability was measured in two stages, including before and after acid injection. For this purpose, the SP model core drainage device located in the stone and fluid laboratory of Shahrood University of Technology was used. Confining pressure is applied by a hand pump to supply pressure to the core. After balancing the fluid pressure before and after the core, the amount of permeability can be calculated according to Darcy's relation, as presented in Equation 1 [6].

$$K.A.\Delta P = Q.L.\mu w \quad (1)$$

In this regard, L is the length of sample A, (ft) of cross-sectional area ( $ft^2$ ),  $\mu W$  of viscosity (cP), Q (bbl / day) of injection rate,  $\Delta p$  of pressure drop (psi) and K of permeability (mD). After initial flooding, the core drain was tested in an incremental process at confining pressures of 725 psi, 1450 psi, and 2900 psi. Finally, the results were compared comparatively in the two sections before and after the acid test.

## Results and Discussion

Due to the same testing conditions for the cores, with the change in injection flow, the amount of pressure applied to the samples also changes. In this way, the pressure changes in each sample (in the low to high pressure range) can be properly observed. Examination of the results shows that an increase in core permeability is acceptable in all of them. But in three samples, 1, 2, and 6, the effects of the wormhole structure are clearly

visible. In the other three examples, this structure is either not created or is hidden, incomplete, and weak. These are also clearly seen in the CT scans of the cores after acidizing. A noteworthy feature of the three samples 1, 2, and 6 is the pressure drop diagram for the two ends of the core over time. In the case of sample 1, which corresponds to the injection dose of 3.6, the pressure drop occurs in approximately 300 seconds.

In the case of sample 2, this happens after about 900 seconds, and in the case of sample 6, it occurs after about 360 seconds (Figure 2). Therefore, the injection conditions are more suitable than the 2 samples according to the program implemented for both samples 1 and 6. However, if the rate of permeability increase for each core is also calculated, a suitable criterion for comparing the results with each other can be achieved (Table 1).

For this purpose, mean values can be used to calculate the primary permeability and the secondary (Table 2). In addition, the effect of acid in sample 6 is not limited to the formation of wormhole cavities, but the positive results of CT-scan in Figure 3 show that compared with similar structure compared to sample 1, the density of the space around the main wormhole has been greatly reduced.

Also, according to Figure 4 and the analogy with the similar structure created in sample 5, the length of the sample is much less damaged due to acid leakage, and the wormhole is clearly formed in it.

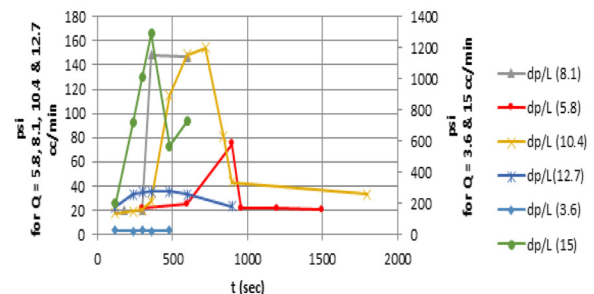


Fig. 2 Comparison of the effects of acid infiltration in different injection rates.

Table 1 Comparison of the average permeability cores before and after the acidizing.

No	sample	Injection rate (cc/min)	Average permeability		K2/k1
			k1	k2	
1	2957.86	3.6	1.44	411.26	285.59
2	2980.55	5.8	3.18	169.85	53.41
3	2720.18	8.1	396.05	447.07	1.13
4	2685.39	10.4	32.98	116.50	3.53
5	2712.19	12.7	35.50	888.82	25.04
6	2691.66	15.0	0.78	416.58	534.07