

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن

گروه مکانیک سنگ

مطالعه آزمایشگاهی بررسی تأثیر تراوایی اولیه سنگ‌های کربناته در تعیین نرخ بهینه تزریق اسید

نگارنده

فرناز شیخی بوجانی

استاد راهنما

دکتر احمد رمضانزاده

تیر ۱۳۹۸

تقدیم

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به خانواده‌ام، آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است
هرچه آموختم در مکتب عشق آنها آموختم و هرچه بلوغم توانم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانی‌شان را پاس گویم.

امروز، هستی‌ام به امید آنهاست و فردا کلید باغ به‌شتم رضای آنها

حاصل تمامی تلاشم را صمیمانه به وجود ارزشمندشان تقدیم می‌کنم.

مشکر و قدردانی

(ویزیکیم وی علمم الکتاب و الحکمہ)

خداوند منان را سپاس می گویم که بار دیگر به من فرصت آموختن داد. به عنوان وظیفه از خانواده عزیزم به جهت زحماتی که در طول زندگی و در راستای پیشبرد موفقیت آسزیدافتم به جان خریدند، پاسکزارم. به رسم ادب از جناب آقای دکتر رمضان زاده که با سه صدر، راهنمایی این پایان نامه را متقبل شدند مشکر می کنم؛ خصوصاً از دیدر فنی آزمایشگاه سنگ و سیال جناب آقای دکتر لطفی که با پذیرش مسؤلیت مشاوره فنی این پژوهش از بچگونه کجک و بهکاری به اینجانب دروغ نفرمودند نیز صمیمانه مشکر و قدردانی می نمایم؛ همچنین از ریاست وقت آزمایشگاه مرکزی جناب آقای دکتر واعظیان و هیات محترم داوران نیز کمال مشکر و قدردانی دارم. این پژوهش با همکاری شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب ایران انجام شده است. بر خود لازم می دانم تا مراتب تقدیر و تشکر خود را از سرپرست محترم تحصیلات تکمیلی و ارتباط صنعت با دانشگاه، جناب آقای مهندس عالیوند و همچنین مشاور صنعتی خود جناب آقای مهندس ملخانی که زمینه های لازم برای انجام امور پژوهشی صنعتی و کاربردی را برای بنده فراهم نمودند اعلام نمایم. در انتها از تمام بزرگوارانی که در طول این مسیر بهکاری صادقانه ای نمودند مشکر می کنم.

تعهد نامه

اینجانب فرناز شیخی بوجانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، رشته مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی مطالعه آزمایشگاهی بررسی تأثیر تراوایی اولیه سنگ کربناته در تعیین نرخ بهینه تزریق اسید تحت راهنمایی دکتر احمد رمضان زاده متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

تراوایی یکی از پارامترهای دینامیکی مخزن در محاسبات عملکرد 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. در این میان عملیات اسیدزنی یکی از رایج‌ترین روش‌های افزایش تولید نفت و گاز و ضریب بهره‌دهی مخازن است. از اینرو در این پژوهش با هدف بررسی اثر فشار تزریق و محصورکننده متفاوت به مطالعه آزمایشگاهی روند تغییرات تراوایی سنگ‌های مخزنی طی عملیات اسیدزنی مغزه پرداخته شده است. با در نظر گرفتن این رویکرد، تعداد ۶ نمونه سنگ مخزنی کربناته از یکی از میادین نفتی ایران تهیه شده است. 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. بررسی نتایج آزمایش‌ها و همچنین تصاویر سی‌تی اسکن نمونه‌ها پس از عملیات اسیدزنی نشان می‌دهد که افزایش تراوایی به میزان قابل قبولی در تمامی نمونه‌ها به وجود آمده است. در مقادیر دبی تزریق پایین‌تر که اسید فرصت کافی برای واکنش با سنگ دارد، حفرات کرمی شکل به خوبی 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 باقی مانده نیز کمتر شده است. این درحالیست که مجدداً با افزایش دبی تا مقدار حداکثر (۱۵ سی‌سی بر دقیقه) تلفیقی از دو رفتار مذکور دیده می‌شود. این امر منجر به افزایش بیش از ۵۳۰ برابری تراوایی نسبت به مقدار اولیه‌ی این نمونه شده است. در حالیکه از نظر مقایسه زمان تشکیل حفرات کرمی شکل در نمونه تزریقی با دبی حداکثر و نمونه تزریق شده با دبی حداقل (۳/۶ سی‌سی بر دقیقه) 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، حفرات کرمی‌شکل، تزریق اسید، فشار محصورکننده، مخازن کربناته

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- شیخی بوجانی، ف. رمضانزاده، ا. لطفی، م. (۱۳۹۷) " بررسی چگونگی تأثیر فشارمحصورکننده بر تراوایی سنگ‌های کربناته در عملیات سیلاب زنی"، سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، تهران.

فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۵	۲-۱ بیان مسئله
۶	۳-۱ ضرورت انجام تحقیق
۷	۴-۱ روش انجام تحقیق
۸	۵-۱ معرفی ساختار پایان نامه
۹	فصل دوم: سابقه تحقیق
۱۰	۱-۲ مقدمه
۱۰	۲-۲ مروری بر مطالعات مدل‌سازی عملیات اسیدزنی
۱۸	۳-۲ مروری بر مطالعات آزمایشگاهی عملیات اسیدزنی
۲۵	۴-۲ جمع بندی
۲۷	فصل سوم: تئوری اسیدزنی در سنگ‌های مخزنی کربناته
۲۸	۱-۳ مقدمه
۲۹	۲-۳ اسیدزنی در سنگ‌های کربناته
۳۰	۳-۳ تشکیل و رشد حفرات کرمی شکل
۳۸	۴-۳ نوع اسید و غلظت آن
۳۹	۱-۴-۳ اسیدهای آلی

- ۴۰-۳-۴-۱-۱ اسید استیک (CH_3COOH) -----
- ۴۰-۳-۴-۱-۲ اسید فرمیک (HCOOH) -----
- ۴۱-۳-۴-۲ اسیدهای معدنی -----
- ۴۱-۳-۴-۱-۲ اسید کلریدریک (HCL) -----
- ۴۴-۳-۴-۲-۲ مخلوط اسید کلریدریک و اسید فلوئوریدریک -----
- ۴۴-۳-۵ واکنش‌های اسیدها با سازندهای کربناته -----
- ۴۵-۳-۵-۱ استوکیومتری واکنش کربناته - اسید -----
- ۴۵-۳-۵-۲ ترکیب شیمیایی سازندهای کربناته -----
- ۴۶-۳-۵-۳ تعادل در واکنش اسیدها با سازندهای کربناته -----
- ۴۸-۳-۶ حجم اسید و دبی تزریق -----
- ۴۸-۳-۷ لایه شکافی اسیدی -----
- ۴۹-۳-۸ نفوذ اسید در شکافها -----
- ۵۲-۳-۹ جمع بندی -----
- ۵۳ فصل چهارم: تأثیر اسیدزنی بر خصوصیات سنگ‌های کربناته به همراه معادلات حاکم -----
- ۵۴-۴-۱ مقدمه -----
- ۵۵-۴-۲ فاکتورهای مؤثر در عملیات اسیدزنی -----
- ۵۵-۴-۲-۱ فشار -----
- ۵۶-۴-۲-۲ غلظت اسید -----
- ۵۷-۴-۲-۳ دما -----
- ۵۸-۴-۲-۴ نوع اسید -----
- ۵۹-۴-۲-۵ تخلخل -----
- ۵۹-۴-۲-۶ تراوایی -----
- ۶۱-۴-۲-۷ روابط حاکم بر عملیات اسیدزنی -----
- ۶۲-۴-۲-۸ تعادل شیمیایی -----
- ۶۳-۴-۲-۹ نسبت سطح تماس سنگ مخزن به حجم اسید مصرفی -----
- ۶۴-۴-۲-۱۰ خصوصیات سنگ مخزن -----

۶۶	۳-۴ جمع بندی
۶۷	فصل پنجم: انجام آزمایش‌ها
۶۸	۱-۵ مقدمه
۶۸	۲-۵ نمای کلی آزمایش‌ها
۷۰	۳-۵ تهیه و آماده سازی نمونه‌ها
۷۱	۴-۵ کانیشناسی نمونه‌ها
۷۲	۵-۵ تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی
۷۶	۷-۵ انجام آزمایش سیلاب‌زنی با اسید
۷۹	۸-۵ جمع بندی
۸۱	فصل ششم: بحث و بررسی نتایج آزمایش‌ها
۸۲	۱-۶ مقدمه
۸۲	۲-۶ نتایج آزمایش تراوایی پیش از عملیات اسیدزنی
۸۴	۱-۲-۶ تراوایی اولیه مغزه ۲۹۵۷/۸۶
۸۵	۲-۲-۶ تراوایی اولیه مغزه ۲۹۸۰/۵۵
۸۶	۳-۲-۶ تراوایی اولیه مغزه ۲۷۲۰/۱۸
۸۸	۴-۲-۶ تراوایی اولیه مغزه ۲۶۸۵/۳۹
۸۹	۵-۲-۶ تراوایی اولیه مغزه ۲۷۱۲/۱۹
۹۰	۶-۲-۶ تراوایی اولیه مغزه ۲۶۹۱/۶۶
۹۲	۳-۶ نتایج سیلاب‌زنی اسیدی مغزه‌ها
۹۲	۱-۳-۶ اسیدزنی مغزه ۲۹۵۷/۸۶
۹۴	۲-۳-۶ اسیدزنی مغزه ۲۹۸۰/۵۵
۹۵	۳-۳-۶ اسیدزنی مغزه ۲۷۲۰/۱۸
۹۷	۴-۳-۶ اسیدزنی مغزه ۲۶۸۵/۳۹
۹۹	۵-۳-۶ اسیدزنی مغزه ۲۷۱۲/۱۹

۱۰۰	-----	۶-۳-۶ اسیدزنی مغزه ۲۶۹۱/۶۶
۱۰۲	-----	۴-۶ نتایج آزمایش‌های تراوایی بعد از عملیات اسیدزنی
۱۰۳	-----	۱-۴-۶ تراوایی ثانویه مغزه ۲۹۵۷/۸۶
۱۰۴	-----	۲-۴-۶ تراوایی ثانویه مغزه ۲۹۵۰/۵۵
۱۰۵	-----	۳-۴-۶ تراوایی ثانویه مغزه ۲۷۲۰/۱۸
۱۰۶	-----	۴-۴-۶ تراوایی ثانویه مغزه ۲۶۸۵/۳۹
۱۰۷	-----	۵-۴-۶ تراوایی ثانویه مغزه ۲۷۱۲/۱۹
۱۰۸	-----	۶-۴-۶ تراوایی ثانویه مغزه ۲۶۹۱/۶۶
۱۱۰	-----	۵-۶ تحلیل تصاویر سی تی اسکن مغزه‌ها
۱۱۰	-----	۱-۵-۶ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۹۵۷/۸۶
۱۱۲	-----	۲-۵-۶ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۹۸۰/۵۵
۱۱۳	-----	۳-۵-۶ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۷۲۰/۱۸
۱۱۵	-----	۴-۵-۶ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۶۸۵/۳۹
۱۱۶	-----	۵-۵-۶ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۷۱۲/۱۹
۱۱۸	-----	۶-۵-۶ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۶۹۱/۶۶
۱۱۹	-----	۶-۶ بحث و بررسی
۱۲۲	-----	۷-۶ جمع بندی
۱۲۳	-----	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۲۴	-----	۱-۷ نتیجه گیری
۱۲۵	-----	۲-۷ پیشنهادها
۱۲۷	-----	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱- ۱. نمای کلی از عملیات اسیدزنی برگرفته از بخش آموزشی دانشگاه پنسیلوانیا ----- ۳
- شکل ۱- ۲. نفوذ اسید و خورده شدن سازند در عملیات اسیدزنی ماتریس ----- ۴
- شکل ۱- ۳. اعمال فشار و ایجاد شکاف در سازند توسط اسید در عملیات شکاف‌دهی با اسید ----- ۴
- شکل ۲- ۱. روابط حفرات کرمی شکل مؤثر تولید شده با استفاده از داده‌های تجربی و منحنی برازش شده بر آن‌ها با استفاده از مدل بوگشه و گلسبرگن ----- ۱۵
- شکل ۲- ۲. داده تجربی مناسب برای روابط مدل وانگ و همکاران (۱۹۹۳) ----- ۱۶
- شکل ۲- ۳. داده تجربی مناسب برای روابط مدل فرد و فوگلر (۱۹۹۹) ----- ۱۶
- شکل ۲- ۴. داده تجربی مناسب برای روابط مدل بازین (۲۰۰۱) ----- ۱۷
- شکل ۲- ۵. الگوهای ریزش در مقادیر مختلف تزریق در کربنات‌ها ----- ۲۲
- شکل ۲- ۶. ساختار حفره کرمی شکل سه بعدی در سرعت تزریق بهینه ----- ۲۲
- شکل ۲- ۷. مقادیر ضریب پوسته پس از اسیدزنی ----- ۲۳
- شکل ۲- ۸. منحنی بازده کربنات برای انواع مختلف سنگ کربنات بر اساس کسر جریان آن‌ها ---- ۲۴
- شکل ۳- ۱. حفرات کرمی شکل ایجاد شده در اثر انحلال آهک در اسید ----- ۳۰
- شکل ۳- ۲. انتشار حفرات کرمی شکل ایجاد شده در یک سازند کربناته. ----- ۳۱
- شکل ۳- ۳. شبیه سازی مدل شبکه‌های الگوهای حفره کرمی شکل ----- ۳۳

- شکل ۳-۴. حجم اسید لازم برای انتشار حفرات کرمی شکل در مغزه‌های آهنی خطی ----- ۳۵
- شکل ۳-۵. حجم اسید برای انتشار حفرات کرمی شکل در مغزه‌های دولومیتی خطی ----- ۳۵
- شکل ۳-۶. ایده آل سازی یک حفره کرمی شکل ----- ۳۷
- شکل ۳-۸. انتقال اسید در شکافی با نفوذ و هرزروی سیال ----- ۵۰
- شکل ۳-۹. منحنی‌های میانگین غلظت اسید در یک شکاف ----- ۵۱
- شکل ۴-۱. سرعت فعل و انفعالات اسید بر حسب غلظت اسید ----- ۵۹
- شکل ۴-۲. شماتیک مقیاس‌های مختلف در محیط متخلخل ----- ۶۰
- شکل ۴-۳. اسید مصرفی بر حسب گذشت زمان ----- ۶۴
- شکل ۴-۴. دبی قابل تزریق به چاه بر حسب عمق ----- ۶۵
- شکل ۵-۲. دستگاه برش دو سر مغزه مدل CC-R30. ----- ۷۱
- شکل ۵-۳. دستگاه XRD یا پراش پرتو ایکس. ----- ۷۱
- شکل ۵-۴. نمودار تعیین درصد کانی‌های تشکیل دهنده مغزه مورد آزمایش. ----- ۷۲
- شکل ۵-۵. تعیین مشخصات فیزیکی مغزه‌ها. ----- ۷۳
- شکل ۵-۶. آزمایش تعیین سرعت عبور امواج. ----- ۷۳
- شکل ۵-۸. دستگاه اشباع مغزه. ----- ۷۶
- شکل ۵-۹. دستگاه اسیدزنی مغزه مدل CA-S30 و اجزای آن ----- ۷۸
- شکل ۶-۱. تصاویر مغزه‌های مورد آزمایش قبل از عملیات اسیدزنی. ----- ۸۳
- شکل ۶-۲. تراوایی مغزه ۲۹۵۷/۸۶ در فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ----- ۸۴

- شکل ۶-۳. تراوایی مغزه ۲۹۵۷/۸۶ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۸۵
- شکل ۶-۴. تراوایی مغزه ۲۹۸۰/۵۵ در فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ۸۶
- شکل ۶-۵. تراوایی مغزه ۲۹۸۰/۵۵ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۸۶
- شکل ۶-۶. تراوایی مغزه ۲۷۲۰/۱۸ در فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ۸۷
- شکل ۶-۷. تراوایی مغزه ۲۷۲۰/۱۸ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۸۷
- شکل ۶-۸. تراوایی مغزه ۲۶۸۵/۳۹ در فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ۸۸
- شکل ۶-۹. تراوایی مغزه ۲۶۸۵/۳۹ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۸۹
- شکل ۶-۱۰. تراوایی مغزه ۲۷۱۲/۱۹ در فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ----- ۸۹
- شکل ۶-۱۱. تراوایی مغزه ۲۷۱۲/۱۹ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۹۰
- شکل ۶-۱۲. تراوایی مغزه ۲۶۹۱/۶۶ در فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ----- ۹۱
- شکل ۶-۱۳. تراوایی مغزه ۲۶۹۱/۶۶ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۹۱
- شکل ۶-۱۴. روند کاهشی میزان تراوایی با افزایش مقدار فشار محصورکننده در مقادیر مختلف پیش از عملیات اسیدزنی. ----- ۹۲
- شکل ۶-۱۵. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۹۵۷/۸۶ در دبی تزریق ۳/۶ سی سی بر دقیقه. ----- ۹۳
- شکل ۶-۱۶. تصویر مغزه ۲۹۵۷/۸۶ بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۹۳
- شکل ۶-۱۷. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۹۸۰/۵۵ در دبی تزریق ۵/۸ سی سی بر دقیقه. ----- ۹۴
- شکل ۶-۱۸. تصویر مغزه ۲۹۸۰/۵۵ بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۹۵

- شکل ۶- ۱۹. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۷۲۰/۱۸ در دبی تزریق ۸/۱ سی سی بر دقیقه. ----- ۹۶
- شکل ۶- ۲۰. تصویر مغزه ۲۷۲۰/۱۸ بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۹۷
- شکل ۶- ۲۱. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۶۸۵/۳۹ در دبی تزریق ۱۰/۴ سی سی بر دقیقه. ----- ۹۸
- شکل ۶- ۲۲. تصویر مغزه ۲۶۸۵/۳۹ بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۹۸
- شکل ۶- ۲۳. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۷۱۲/۱۹ در دبی تزریق ۱۲/۷ سی سی بر دقیقه. ----- ۹۹
- شکل ۶- ۲۴. تصویر مغزه ۲۷۱۲/۱۹ بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۰۰
- شکل ۶- ۲۵. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۶۹۱/۶۶ در دبی تزریق ۱۵ سی سی بر دقیقه. ----- ۱۰۱
- شکل ۶- ۲۶. تصویر مغزه ۲۶۹۱/۶۶ بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۰۲
- شکل ۶- ۲۷. تراوایی مغزه ۲۹۵۷/۸۶ در فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ----- ۱۰۳
- شکل ۶- ۲۸. تراوایی مغزه ۲۹۵۷/۸۶ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۱۰۴
- شکل ۶- ۲۹. تراوایی مغزه ۲۹۵۰/۵۵ در فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ----- ۱۰۴
- شکل ۶- ۳۰. تراوایی مغزه ۲۹۵۰/۵۵ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۱۰۵
- شکل ۶- ۳۱. تراوایی مغزه ۲۷۲۰/۱۸ در فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ----- ۱۰۵
- شکل ۶- ۳۲. تراوایی مغزه ۲۷۲۰/۱۸ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۱۰۶
- شکل ۶- ۳۳. تراوایی مغزه ۲۶۸۵/۳۹ در فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ----- ۱۰۶

شکل ۶-۳۴. تراوایی مغزه ۲۶۸۵/۳۹ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۱۰۷

شکل ۶-۳۵. تراوایی مغزه ۲۷۱۲/۱۹ بر حسب فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ----- ۱۰۷

شکل ۶-۳۶. تراوایی مغزه ۲۷۱۲/۱۹ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۱۰۸

شکل ۶-۳۷. تراوایی مغزه ۲۶۹۱/۶۶ در فشارهای محصورکننده PSI 725، PSI 1450 و PSI 2900. ----- ۱۰۸

شکل ۶-۳۸. تراوایی مغزه ۲۶۹۱/۶۶ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف. ----- ۱۰۹

شکل ۶-۳۹. روند کاهشی میزان تراوایی با افزایش مقدار فشار محصورکننده در مقادیر مختلف پس از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۰۹

شکل ۶-۴۰. امتداد سه راستای درنظر گرفته شده برای سی تی اسکن مغزه‌ها. ----- ۱۱۰

شکل ۶-۴۱. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۵۷/۸۶ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۱

شکل ۶-۴۲. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۵۷/۸۶ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۱

شکل ۶-۴۳. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۵۷/۸۶ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۱

شکل ۶-۴۴. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۸۰/۵۵ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۲

شکل ۶-۴۵. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۸۰/۵۵ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۲

شکل ۶-۴۶. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۸۰/۵۵ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۳

- شکل ۶-۴۷. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۲۰/۱۸ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۴
- شکل ۶-۴۸. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۲۰/۱۸ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۴
- شکل ۶-۴۹. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۲۰/۱۸ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۵
- شکل ۶-۵۰. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۸۵/۳۹ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۵
- شکل ۶-۵۱. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۸۵/۳۹ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۶
- شکل ۶-۵۲. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۸۵/۳۹ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۶
- شکل ۶-۵۳. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۱۲/۱۹ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۷
- شکل ۶-۵۴. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۱۲/۱۹ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۷
- شکل ۶-۵۵. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۱۲/۱۹ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۷
- شکل ۶-۵۶. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۹۱/۶۶ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۸
- شکل ۶-۵۷. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۹۱/۶۶ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۱۸

- شکل ۶-۵۸. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۹۱/۶۶ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی ----- ۱۱۹
- شکل ۶-۵۹. مقایسه آثار هجوم اسید در دبی‌های تزریق متفاوت. ----- ۱۲۰
- شکل ۶-۶۰. مقایسه تراکم فضای اطراف حفره گرمی شکل ایجاد شده در مغزه. ----- ۱۲۱
- شکل ۶-۶۱. مقایسه آثار هجوم اسید در اثر تزریق و تشکیل حفره گرمی شکل. ----- ۱۲۲

فهرست جداول

- جدول ۲-۱. خصوصیات پتروفیزیکی نمونه‌های مورد استفاده برای آزمایش‌های اسیدزنی ----- ۲۰
- جدول ۳-۱. راهنمای کاربرد اسیدزنی کربناته ----- ۴۴
- جدول ۳-۲. ضریب فعالیت اسید کلریدریک ----- ۴۷
- جدول ۴-۱. مقایسه اسیدزنی کربنات‌ها ----- ۵۷
- جدول ۴-۲. اسیدهای متداول جهت کاربرد سنگ آهک ----- ۵۸
- جدول ۴-۳. درصد اسید مصرفی بعد از رسیدن به تعادل شیمیایی برای ۴ نمونه اسید ----- ۶۳
- جدول ۴-۴. مشخصات نمونه‌های مورد استفاده جهت انجام آزمایش ----- ۶۴
- جدول ۵-۱. اطلاعات سیال مورد استفاده. ----- ۷۰
- جدول ۵-۲. مشخصات هندسی مغزه‌ها. ----- ۷۴
- جدول ۵-۳. مشخصات مکانیکی و برخی خصوصیات فیزیکی مغزه‌ها. ----- ۷۴
- جدول ۵-۴. حداکثر / حداقل نرخ تزریق اسید در آزمایش‌های طراحی شده. ----- ۷۸
- جدول ۶-۱. مقایسه میانگین تراوایی مغزه‌ها قبل و بعد از عملیات اسیدزنی. ----- ۱۲۰
- جدول ۶-۲. مقایسه تراوایی مغزه‌ها قبل از عملیات اسیدزنی در فشارهای محصورکننده مختلف. - ۱۲۱
- جدول ۶-۳. مقایسه تراوایی مغزه‌ها بعد از عملیات اسیدزنی در فشارهای محصورکننده مختلف. - ۱۲۱

فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه

نفوذپذیری پایین سنگ مخزن، یک محدودیت طبیعی تولید محسوب می‌شود؛ به این معنی که جریان سیال نمی‌تواند به سرعت از مخزن به سمت چاه حرکت کند. علاوه بر این، صدمات وارد شده به سازند در طی عملیات حفاری، سیمان‌زنی و تولید نیز از دیگر محدودیت‌های جریان سیال از مخزن به چاه می‌باشد. روش‌هایی که برای مرتفع نمودن این مشکلات مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های انگیزش چاه^۱ نام دارند.

انگیزش سازند به روش اسیدزنی به منظور برطرف کردن آسیب دیدگی سازند اطراف چاه در سازندهای ماسه سنگی یا ایجاد کانال‌های هادی در اطراف چاه برای سازندهای کربناته، انجام می‌شود. در این روش سیال (اسید) با فشار کمتر از فشار حد شکست سنگ مخزن به داخل سازند تزریق می‌شود. بطور کلی، به منظور انگیزش سازند تولیدی، از دو روش اسیدزنی ماتریس و شکافدهی با اسید استفاده می‌شود (Nevito Gomez. 2006).

کاربرد اسیدها به منظور انگیزش و بهبود رفتار تولیدی چاه به سه دسته تقسیم بندی می‌شوند:

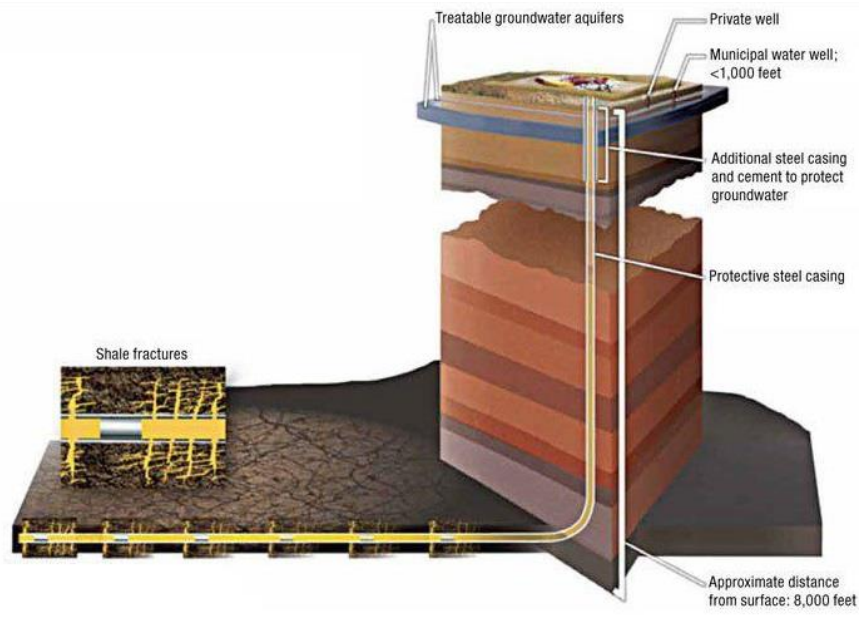
۱- شستشو با اسید^۲

۲- اسیدزنی ماتریس^۳

۳- شکافدهی با اسید^۴

دسته اول عملیاتی است که به منظور رفع رسوبات از چاه یا باز کردن حفرات مسدود شده بکار می‌رود. این عملیات ممکن است با استفاده از مقدار کمی اسید در محل مطلوب چاه انجام گیرد تا زمان کافی برای واکنش اسید با رسوبات موجود در دیواره چاه فراهم گردد (شکل ۱-۱).

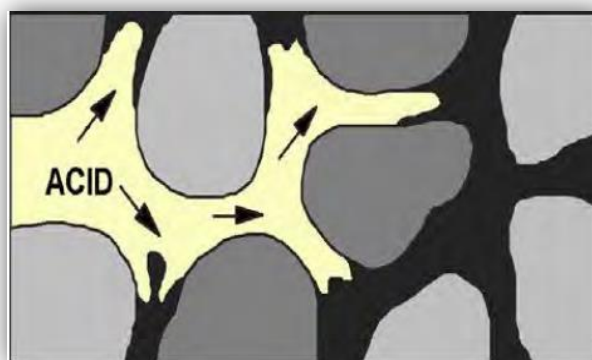
1- Stimulation
2-Acidizing
3-Matrix acidizing
4- Acid fracturing



شکل ۱-۱. نمای کلی از عملیات اسیدزنی ابرگرفته از بخش آموزشی دانشگاه پنسیلوانیا (Frac focus.org).

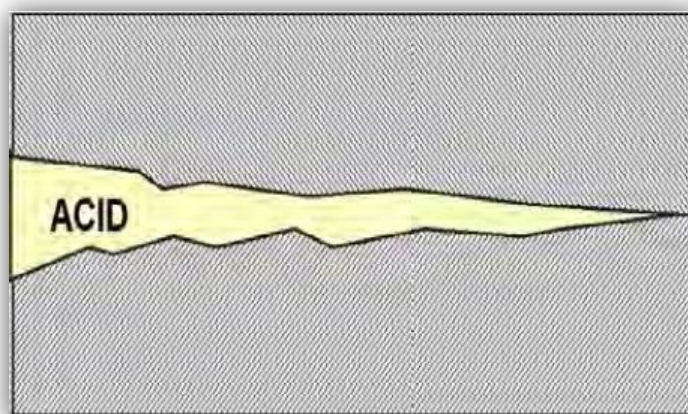
در دسته دوم، اسیدزنی ماتریس منجر به تمیزکاری دهانه اطراف چاه و نفوذ اسید به مناطق نزدیک دهانه آن^۱ می‌شود. در این فرآیند اسید در فشاری کمتر از فشار ایجاد شکاف در سازند به چاه تزریق می‌شود (شکل ۱-۲). اسید تزریق شده به درون سازند نفوذ کرده و کانال‌هایی را ایجاد می‌کند. هدف از این فرآیند، ازدیاد تراوایی در سازند و افزایش میزان تولید از چاه می‌باشد. اسیدزنی ماتریس همچنین انگیزش چاه را از طریق رفع کاهش در نفوذپذیری سازند در مجاورت چاه، با مکانیزم‌های افزایش قطر حفره‌ها و حل کردن موادی که حفره‌ها را مسدود می‌کنند (مواد تشکیل دهنده آسیب سازند)، به ارمغان می‌آورد.

1-Near wellbore



شکل ۱-۲. نفوذ اسید و خورده شدن سازند در عملیات اسیدزنی ماتریس (چراغی، ۱۳۹۳).

دسته سوم یا همان اسیدزنی به منظور ایجاد شکاف، در این حالت اسید در فشاری بالاتر از فشار شکست سازند به سازند تزریق می‌شود. انگیزش زمانی حاصل می‌شود که کانال‌های جریانی با هدایت پذیری بالا ایجاد شده و این کانال‌ها پس از عملیات، باز نگه داشته شوند. این کانال‌ها از واکنش اسید بر روی دیواره‌های شکاف (که در اسید قابل حل می‌باشند) ایجاد می‌شوند، با توجه به شکل ۱-۳ هنگامی که اسید از داخل شکاف ایجاد شده عبور می‌کند با دیواره شکاف واکنش داده و آن را در خود حل می‌کند. نفوذپذیری زیاد در کانال جریانی ایجاد شده زمانی حاصل می‌شود که پس از برداشتن فشار از روی سازند سطح شکاف‌ها کاملاً به هم نچسبد (Williams et al. 1979).



شکل ۱-۳. اعمال فشار و ایجاد شکاف در سازند توسط اسید در عملیات شکافدهی با اسید (چراغی، ۱۳۹۳).

نمونه‌های موفق زیادی از عملیات اسیدزنی در میادین گوناگون با خصوصیات مخزنی متفاوت در مناطق مختلف دنیا گزارش شده است. موفقیت در عملیات انگیزش چاه منجر به ادامه حیات یک چاه و در نهایت یک میدان نفتی می‌شود.

همچنین انجام موفق عملیات، نیازمند تدوین روش مناسبی جهت طراحی و ارزیابی عملیات اسیدزنی می‌باشد. تجربه نشان داده است با طراحی مناسب عملیات می‌توان بهبود چشمگیری در تولید یک سازند حاصل کرد. یک رویکرد نظامند که متضمن موفقیت عملیات انگیزش باشد باید شامل مراحل انتخاب چاه کاندیدای مناسب، شناسایی آسیب سازند، انتخاب روش انگیزش مناسب، طراحی صحیح، اجرا و ارزیابی عملیات باشد (Gdanski.1994).

۱-۲ بیان مسئله

عملیات اسیدزنی 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. بازده عملیات اسیدزنی به عوامل مختلفی همچون ویژگی‌های سازند، انواع سیالات انگیزشی و سناریوی تزریق وابسته است. در سازندهای کربناته به منظور ازدیاد برداشت از چاه می‌توان عملیات اسیدزنی ماتریس و شکافدهی با اسید را پیاده‌سازی کرد. سنگ‌های کربناته مانند سنگ آهک و دولومیت که در میادین نفتی جنوب ایران بخش قابل توجهی از مخازن هیدروکربوری را در خود جای داده‌اند، مستعد ایجاد آسیب در سازند هستند. حذف این آسیب‌ها و افزایش برداشت، نیازمند فرآیندهایی چون اسیدزنی ماتریس و شکافدهی با اسید است. اسیدزنی ماتریس برای ایجاد مسیرهای جریان از طریق حل کردن ماتریس سنگ، افزایش شکاف‌های موجود و ایجاد ارتباط مؤثر فضاهای بین دانه‌ای (تخلخل) به یکدیگر می‌باشد. هدف از این نوع اسیدزنی، افزایش تراوایی و نیز افزایش تخلخل سازندهای تولیدی است. شکافدهی با اسید اغلب بدلیل تراوایی پایین یا عدم وجود تراوایی در سازند،

ضروری است؛ بدین ترتیب با اعمال شکستگی مصنوعی و همچنین اسید به کار رفته مسیر عبور سیال را به طرف چاه باز می‌کند. از اسید کلریدریک^۱ غالباً در اسیدزنی سنگ‌های کربناته استفاده می‌شود. این امر بدلیل هزینه پایین و واکنش فعال با این نوع از سنگ‌ها است (Russell, 2004). چاه‌های نفت عمق بالایی دارند و با افزایش عمق میزان تنش‌های برجای زمین بیشتر خواهد شد. این تنش‌ها بر تراوایی سنگ تأثیر بسزایی دارد به نحوی که با افزایش تنش بدلیل فشرده شدن منافذ موجود در سنگ تراوایی کاهش می‌یابد. بنابراین ارزیابی میزان تأثیرپذیری تراوایی از فشار محصورکننده در مخازن اهمیت فراوانی دارد. از طرف دیگر میزان فشار تزریق اسید برای دستیابی به تراوایی مورد انتظار نیز بایستی به‌گونه‌ای تعیین گردد تا نتیجه قابل انتظار بدست آید. در این تحقیق با انجام آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های کربناته مخزنی، ضمن بررسی اثر اسیدزنی در فشار مختلف تزریق، اثر فشار محصورکننده بر میزان تغییر تراوایی حاصل از این عملیات نیز مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

استحصال نفت و گاز از مخازن هیدروکربنی در بسیاری از موارد با کاهش بازدهی تولید چاه همراه است. کاهش تولید از چاه می‌تواند بدلیل پایین بودن یا عدم وجود تراوایی کافی سازند و یا آسیب‌های وارده به سازند در محدوده نزدیک چاه رخ دهد. سازندهای کربناته فاقد شکستگی، ممکن است دارای تراوایی پایینی باشند. برای افزایش تراوایی این سازندها با انگیزش چاه، معمولاً از روش‌های اسیدزنی و شکافدهی با اسید استفاده می‌شود. با توجه به افزایش تقاضای انرژی، صنعت نفت و گاز به صورت پیوسته سعی در گسترش فناوری‌های نوین در میادین نفتی دارد. یکی از مهم‌ترین این فناوری‌ها اسیدزنی است که می‌تواند منجر به افزایش تخلخل و تراوایی در سازند و اطراف چاه شود. بنابراین با توسعه فناوری‌های ازدیاد برداشت نفت، اسیدزنی به صورت عمده در صنعت نفت نقش آفرینی

می‌کند. بدیهی است طراحی یک عملیات اسیدزنی موفق، (شامل مباحث فشار محصورکننده، تراوایی اولیه، وجود یا عدم وجود شکستگی در نمونه و همچنین تأثیر مقیاس) بدون انجام مطالعات آزمایشگاهی دقیق میسر نخواهد بود.

۴-۱ روش انجام تحقیق

برای انجام این تحقیق، پس از انجام مطالعات کتابخانه‌ای، نمونه پلاگ‌هایی به قطر ۳۸ میلی‌متر از یکی از مخازن نفتی ایران تهیه شد. جنس این نمونه‌ها آهکی و فاقد هرگونه شکستگی ظاهری بوده است. آنها پس از آماده‌سازی در طول‌های مختلف مورد آزمایش اسیدزنی قرار گرفتند. این عملیات با استفاده از دستگاه مدل CA-S30 مستقر در آزمایشگاه پژوهشی سنگ و سیال دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است. از این دستگاه علاوه بر عملیات اسیدزنی و سیلاب‌زنی، می‌توان برای مطالعه تأثیر دما و نرخ جریان بر روی مغزه‌ها نیز استفاده نمود. بدین منظور خصوصیات فیزیکی هر یک شامل تخلخل، تراوایی اولیه، وزن مخصوص و آزمایشات کانی‌شناسی^۱ برای شناسایی دقیق میزان کانی‌های کربناته بررسی شدند؛ و نهایتاً ارزیابی روند اسیدزنی با سی تی اسکن^۲ کردن نمونه‌ها انجام شد.

در مرحله سوم آزمایش‌ها به مرحله اجرایی خواهند رسید. برنامه‌ریزی آزمایشات با دو هدف بررسی تغییر تراوایی در فشارهای محصورکننده مختلف و همچنین فشارهای تزریق متفاوت انجام شد. با تغییر فشار محصورکننده و فشار ورودی جریان در دستگاه اسیدزنی مغزه تحت دمای محیط و همچنین با ثابت در نظر گرفتن غلظت اسید، میزان تخلخل سنگ و در نتیجه تراوایی سنگ تغییر خواهد کرد.

در مرحله بعدی، داده‌های حاصل از آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای تغییرات تراوایی نسبت به فشار محصورکننده و تغییرات تراوایی نسبت به فشار تزریق ارائه شده است. سپس با تحلیل

1-X-Ray Diffraction
2-CT-Scan

نمودارهای بدست آمده و ارزیابی تراوایی ثانویه، نرخ بهینه تزریق تعیین شده است. در نهایت تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین پیشنهادات ارائه شده است.

۱-۵ معرفی ساختار پایان نامه

تحقیق حاضر با موضوع مطالعه آزمایشگاهی بررسی تأثیر تراوایی اولیه سنگ کربناته در تعیین نرخ بهینه تزریق اسید در هفت فصل به شرح زیر تدوین شده است:

فصل اول به کلیات موضوع تحقیق اختصاص دارد. در این فصل مقدمه، اهداف و روش تحقیق، ضرورت انجام تحقیق و ساختار پایان نامه معرفی شده است. در فصل دوم، سوابق مطالعات گذشته به تفصیل گردآوری و بیان شده است. در فصل سوم، در ابتدا تعاریف جامعی از انواع اسید، خواص و واکنش‌های آن‌ها در عملیات اسیدزنی ارائه شده است. همچنین در ادامه، روش اسیدزنی ماتریس در کربنات‌ها و عوامل مؤثر در فرآیند اسیدزنی مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم به بررسی اثر پارامترهای اسیدزنی بر خواص مکانیکی و همچنین به بررسی فاکتورهای فیزیکی مؤثر بر عملیات اسیدزنی و فرضیات حاکم بر آن پرداخته شده است. در فصل پنجم به تفصیل به معرفی دستگاه مورد نظر برای آزمایش، معرفی شرایط آزمایشگاهی، توضیح چگونگی روند انجام آزمایش و خصوصیات مغزه‌های سنگی جهت آزمایش پرداخته شده است. در فصل ششم، داده‌های حاصل از آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای تغییرات تراوایی نسبت به فشار محصورکننده و تغییرات تراوایی نسبت به فشار تزریق ارائه شده است. سپس با تحلیل نمودارهای بدست آمده و ارزیابی تراوایی ثانویه نرخ بهینه تزریق برای هر نمونه تعیین شده است. در نهایت در فصل هفتم، نتیجه‌گیری‌های کلی به همراه پیشنهادات برای کارهای تحقیقاتی آینده ارائه شده است.

فصل دوم: سابقہ تحقیق

۱-۲ مقدمه

اسیدزنی در مفهوم عام معمولاً با استفاده از برخی مشخصه‌های فیزیکی مخصوصی توصیف می‌گردد. این فرآیند که بعضاً به صورت اسیدزنی در ماتریس توصیف می‌شود، نیازمند شناخت مفاهیمی است که حین انجام عملیات مشاهده می‌گردد. از جمله این موارد می‌توان به واکنش پذیری اسید و میزان اثرگذاری آن بر سنگ و همچنین نرخ تزریق آن اشاره کرد. مطالعات آزمایشگاهی و مدلسازی گسترده‌ای توسط پژوهشگران مختلف در این زمینه و در خصوص سایر پارامترهای وابسته به آن صورت گرفته که در ادامه به اختصار مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲ مروری بر مطالعات مدلسازی عملیات اسیدزنی

اولین مشاهده و توصیف از شکافت هیدرولیکی بوسیله‌ی گرب^۱ در سال ۱۹۳۵ میلادی انجام گرفت که برای انگیزش چاه نفت در سازند کربناته از اسید استفاده کردند. با توسعه عملیات شکافت هیدرولیکی در ماسه سنگ‌های حاوی نفت در اواخر سال ۱۹۴۰ میلادی، شکافدهی با اسید به سازندهای کربناته محدود شد و میزان پیشرفت آن با شکافت هیدرولیکی همخوانی نداشت. تا سال ۱۹۷۰ میلادی، شکافت هیدرولیکی در سازندهای کربناته و ماسه سنگی به دلیل شناخت بیشتر و سهولت در مدلسازی محبوبیت پیدا کرد. پس از سال ۱۹۷۰ میلادی نیز پیشرفت‌هایی در مدلسازی شکافدهی با اسید و تئوری انگیزش چاه بوسیله آن رخ داد (Grebe, 1935).

ویلیامز و همکاران^۲ (۱۹۷۹) مطالعات تجربی و نظری را به منظور مدلسازی و درک مکانیزم رشد حفره کرمی شکل در مخازن کربناته و دولومیتی انجام دادند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد برای جلوگیری از انحلال سطح در نزدیکی منطقه چاه، اسیدزنی کربناته، باید با حداکثر میزان ممکن بدون ایجاد شکستگی انجام شود (Williaams et al. 1979).

1-Grebe

2-Williaams

مک‌لئود^۱ (۱۹۸۴) تحقیقاتی را بر روی انگیزش چاه و انواع آسیب‌های وارد بر آن انجام داد که در آن اسیدزنی 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 اسیدزنی ماتریس استفاده شده است (McLeod, 1984).

هوفنر و فوگلر^۲ (۱۹۸۸) اولین کسانی بودند که برای بررسی اثر ساختار حفره کرمی شکل در مطالعه خود از رویکرد شبکه‌ای شکل استفاده کردند. آنها انحلال دولومیت و کلسیت را با اسید کلریدریک مورد مطالعه قرار دادند و مشخص کردند که عدد دامکالر^۳، شکل‌گیری حفره کرمی شکل را مدیریت می‌کند. عدد دامکالر یک مقدار بدون بعد تعریف شده به‌عنوان نسبت سرعت واکنش اسید به میزان جذب اسید^۴ است. مقادیر مختلف دامکالر در ساختارهای حفرات کرمی شکل متفاوت است (Hoefner and Fogler, 1988).

داکورد و همکاران^۵ (۱۹۸۹) یک روش طراحی را پیشنهاد کردند که به میزان تزریق اسید کمی نیاز دارد تا تحریک مطلوب با حجم اسید مورد نیاز، صورت پذیرد. آنها با گسترش تحقیقات خود، مدل انتشار حفره کرمی شکل را توسعه دادند که در آن حفره‌ها با طول هیدرولیکی معادل آن اندازه‌گیری می‌شوند. علاوه بر این، آنها نتیجه‌گیری کردند که میزان تزریق اسید در این زمینه بسیار بالا بوده است (Daccord and Lenormand, 1989).

هانگ و همکاران^۶ (۱۹۸۹) جریان شبیه‌سازی شده با واکنش شیمیایی را در مجموعه‌ای از منافذ استوانه‌ای موازی بررسی کردند. این مدل، تشکیل حفره کرمی شکل ناشی از انحلال حاصل از واکنش با اسید را پیش‌بینی می‌کند؛ اما از آنجا که در آن میزان هدررفت اسید به درستی ارزیابی نمی‌شود، این مدل مفید نبوده است (Hung et al. 1989).

1-McLeode
2- Hoefner and Fogler
3- Damköhler number
4- Acid convection rate
5-Daccord and Lenormand
6-Hung

وانگ و همکاران^۱ (۱۹۹۳) یک مدل برای پیش بینی نرخ تزریق بهینه جهت مقایسه با نتایج آزمایشگاه ارائه کردند. نظریه منافذ انتقال^۲ ارائه شده توسط آنها با بیان ارتباط میان سرعت حرکت سیال و ابعاد منافذ، سرعت بهینه برای دستیابی به حفرات کرمی شکل غالب^۳ را بدست می‌دهد (سرعت بینابینی^۴). این ابعاد بحرانی منافذ انتقال سیال با محاسبه توابع نرخ رشد در منافذ بزرگ (کنترل شده توسط انتقال جرم) و کوچک (محدود شده توسط واکنش سطحی) بدست می‌آید؛ اما استفاده از این روش مستلزم دانستن ابعاد حفرات است که برای اندازه‌گیری دشوار است. مدل لوله‌های مویین از معادلات انتقال حرارت برای واکنش کمپلکس‌های لوله‌ای اسید استفاده می‌کند. این معادلات را می‌توان با تخمین تراکم حفره کرمی شکل ترکیب کرد تا میزان رشد و حجم اسید مورد نیاز برای حفرات کرمی شکل تعیین شود. ترکیب این روش تراکم با مدل انتشار در تعیین حجم اسید مورد نیاز بسیار مهم است (Wang et al. 1993).

پکالونی و همکاران^۵ (۱۹۹۳) در مقاله‌ای که نتایج گسترده مطالعات و مدلسازی بیش از ۶۵۰ عملیات انگیزش ماتریس را ارائه دادند، پیشنهاد کردند که شرایط بهینه برای اسیدزنی، تزریق با بیشترین دبی و بیشترین فشار شکست سازند است. از سوی دیگر فشار و نرخ تزریق ناکافی، عامل انگیزش ضعیف چاه قلمداد شد (Pacaloni et al. 1993).

فریک و همکاران^۶ (۱۹۹۴) سیلابزنی را با جریان شعاعی در میدان انجام دادند. آنها دریافتند که سرعت بهینه به مراتب پایین‌تر از شرایط بهینه مشاهده شده در میدان است. همچنین دریافتند با وجود دشواری بیشتری که سیلابزنی شعاعی نسبت به خطی دارد، شرایط میدان را بهتر بیان می‌کند (Frick et al. 1994).

1-Wang

2-Transition Pore

3- Dominate Wormhole

4 - interstitial velocity

5- Pacaloni

6- Frick

مستوفی زاده و اکونوماید^۱ (۱۹۹۴) نیز آزمایش‌های سیلاب‌زنی شعاعی را انجام دادند و یک روش برای افزایش مقیاس نتایج آزمایشگاهی به شرایط میدانی ارائه کردند. این مدل، مقدار ظرفیت اسید را که مقدار ماده معدنی حل شده در فضای خالی نسبت به مقدار موجود در مواد معدنی است را محاسبه کرده است (Mostofizadeh and Economides, 1994).

بوگشه^۲ (۱۹۹۷) دو فرآیند را برای مدلسازی مکانیزم‌های حفرات کرمی شکل توضیح داد. اولین فرآیند شامل مصرف اسید و واکنش با منافذ سنگ می‌شود. این موضوع شامل انتقال (که بطور مستقیم توسط سرعت تزریق اسید صورت می‌گیرد)، سرعت واکنش سطحی و انتشار مولکولی می‌باشد. با توجه به سرعت واکنش بین اسید کلریدریک و کربنات‌ها، انتشار حفرات کرمی شکل از یک واکنش محدود منتشر می‌شود. فرآیند دوم شامل اثر توزیع و هدررفت سیال است. این موضوع، بطور مستقیم هندسه حفرات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدر رفتن سیال سازند، طول حفره کرمی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، درحالی‌که توزیع سیال بر تراکم حفرات کرمی شکل اثر می‌گذارد (Buijse, 1997).

فرد و فوگلر^۳ (۱۹۹۹) به بررسی وابستگی حفرات کرمی شکل به مقدار دامکلی در طیف وسیعی از سیستم‌های سیال، از جمله اسیدهای قوی، اسیدهای ضعیف و عوامل شیمیایی پرداختند. آنها تعیین کردند که مقدار دامکلی بهینه برابر با ۰/۲۹، مربوط به نرخ بهینه تزریق برای انواع مختلف سیالات و سازندها است (Fredd and Fogler, 1999).

در این زمینه گولفیر و همکاران^۴ (۲۰۰۱) و پانگا و همکاران^۵ (۲۰۰۴) مطالعات بیشتری از عدد دامکلی همراه با عوامل دیگر برای ایجاد مدل‌های دقیق‌تر انجام داده‌اند (Golfier et al. 2001, Panga et al. 2004).

1- Mostofizadeh and Economides

2- Buijse

3- Fredd and Fogler

1- Golfier

2- Panga

در سال ۲۰۰۵ میلادی، بوگشه و گلسبرگن^۱ تفاوت بین هندسه خطی^۲ و شعاعی^۳ را با یکدیگر مقایسه نموده و به اینصورت نتیجه‌گیری کردند که در هندسه شعاعی، «سرعت بینابینی» بصورت تابعی از «فاصله از چاه» کاهش می‌یابد. در هندسه خطی، هدررفت سیال مستقل از طول حفره کرمی شکل است. درحالیکه در هندسه شعاعی، سطح مقطع در مقابل حفره کرمی شکل افزایش می‌یابد. این امر باعث افزایش هدررفت سیال با افزایش طول حفره کرمی شکل می‌شود. بنابراین سرعت رشد حفره کرمی شکل با افزایش طول کاهش می‌یابد. بدین‌منظور آنها یک روش تلفیقی برای تعیین عمق نفوذ حفره کرمی شکل ارائه کردند که بر اساس آن، نرخ رشد حفره کرمی شکل را در جریان شعاعی می‌توان محاسبه و در مدل نیمه تجربی از آن استفاده کرد. این درحالیست که آزمایش‌های سیلابزنی جریان شعاعی اطلاعاتی در مورد مکانیزم رشد حفره کرمی شکل در دو بعد ارائه می‌دهد (Buijse and Glasbergen, 2005). در واقع مدل ارائه شده توسط آنها، یک مدل نیمه تجربی است که طیف گسترده‌ای از پارامترها را شامل می‌شود (شکل ۲-۱). آنها بر این اساس، سرعت رشد حفره کرمی شکل را به عنوان یک عامل سرعت بینابینی نشان دادند. شکل ۲-۱ نشان دهنده روابط بدست آمده از داده‌های تجربی برای حفرات کرمی شکل مؤثر با استفاده از برازش مدل بر داده‌های تجربی است. این مدل نشان دهنده وجود شرایط بهینه در مدل اسیدزنی ماتریسی سنگ‌های کربناته است و به دو پارامتر سرعت بینابینی و حجم فضای متخلخلی که به شکاف مبدل شده نیاز دارد. این موارد را می‌توان با انجام آزمایش بر روی مغزه تهیه نمود. همچنین دما، نفوذپذیری، کانی‌شناسی و غلظت اسید در این دو پارامتر تجربی بررسی شده است. نتایج به دست آمده از این مدل برای بدست آوردن یک مدل یکپارچه است و برای تعیین شرایط بهینه، چندین آزمایش خطی بر روی مغزه‌ها در شرایط مختلف انجام شده است (Buijse and Glasbergen, 2005).

3- Buijse and Glasbergen

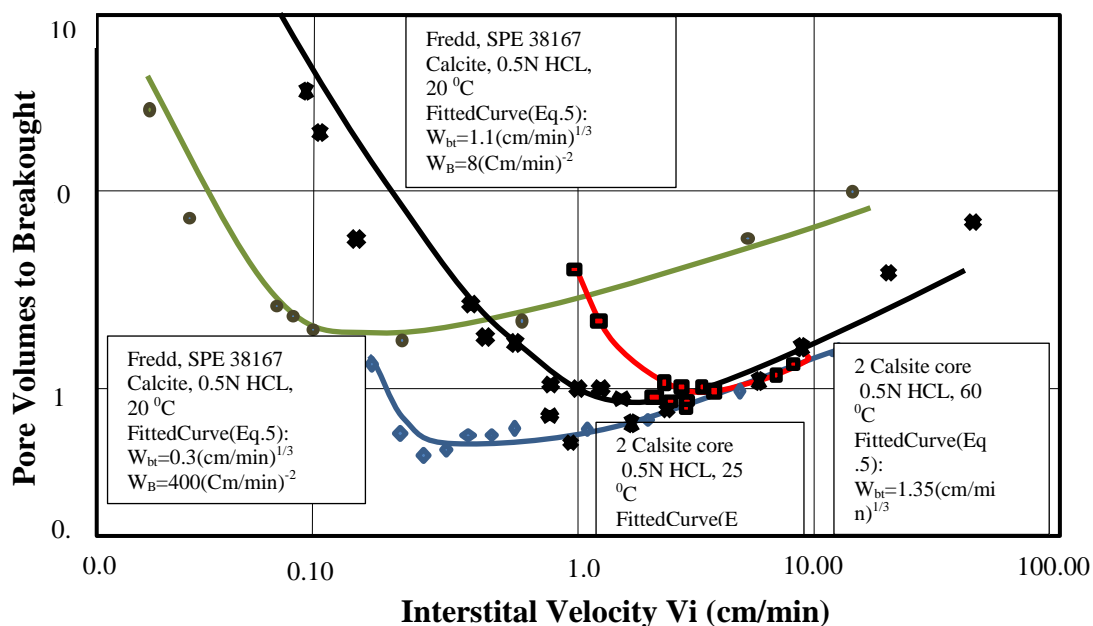
4- Linear geometry

5- radial geometry

مازل و همکاران^۱ (۲۰۰۷) در خصوص چاه‌های جهتدار و اثرات آن (شامل زمان وقفه بین عملیات پمپاژ و دریافت پاسخ از سازند) مطالعه کردند. آنها معتقدند با وجود گسترش دانش اسیدزنی ماتریسی، هنوز مدل‌های دقیق‌تری برای بررسی شرایط میدان نیاز است (Mazel et al. 2007).

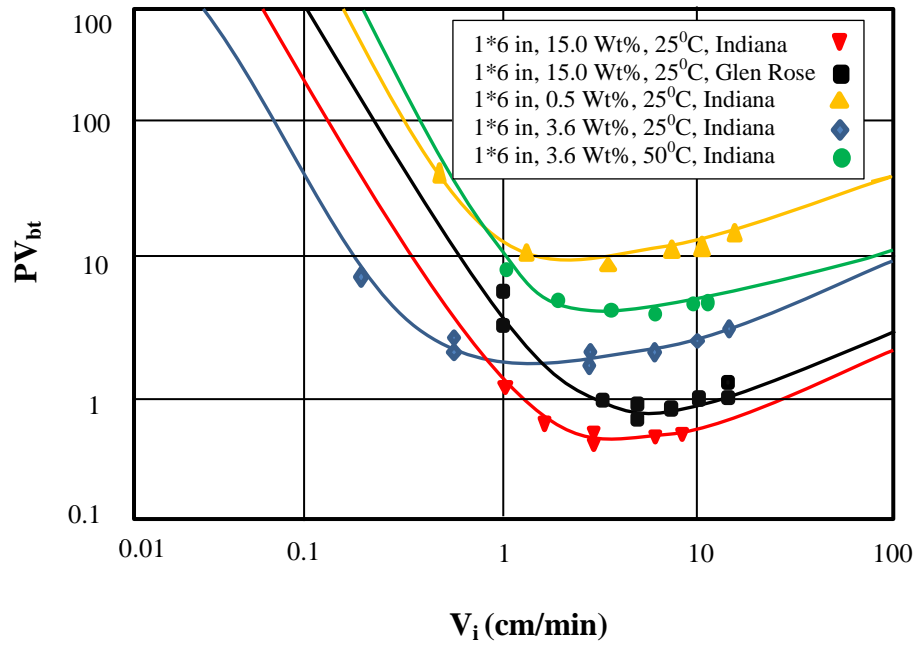
تالбот و گدانسکی^۲ (۲۰۰۸) بر اساس مدل بوگشه و گلسبرگن، منحنی برخی از داده‌های تجربی را برای تعیین شرایط حفرت کرمی شکل بهینه مطابق با اشکال ۲-۲، ۳-۲ و ۴-۲ تنظیم کردند (Talbot and Gdanski, 2008).

فوری و همکاران^۳ (۲۰۱۲) به این نتیجه رسیدند که سرعت گسترش حفره کرمی شکل غالب در شکل‌گیری آن بسیار مهم است. بدین منظور بسیاری از مطالعات انجام شده برای آزمایش مکانیزم رشد حفرت کرمی شکل، در شکل‌گیری کربنات‌ها انجام شده است (Furui et al. 2012).

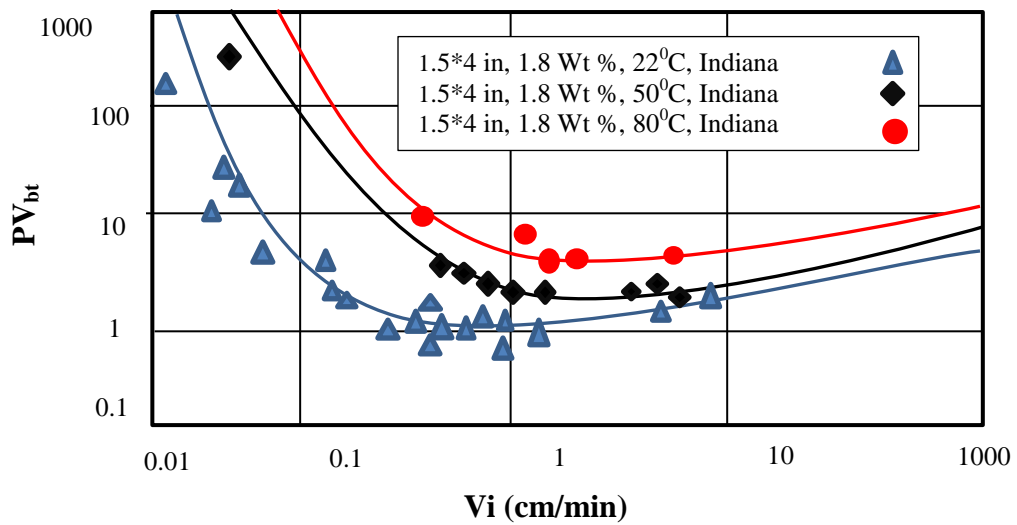


شکل ۲-۱. روابط حفرت کرمی شکل مؤثر تولید شده با استفاده از داده‌های تجربی و منحنی برازش شده بر آنها با استفاده از مدل بوگشه و گلسبرگن (گلسبرگن و بوگشه، ۲۰۰۵).

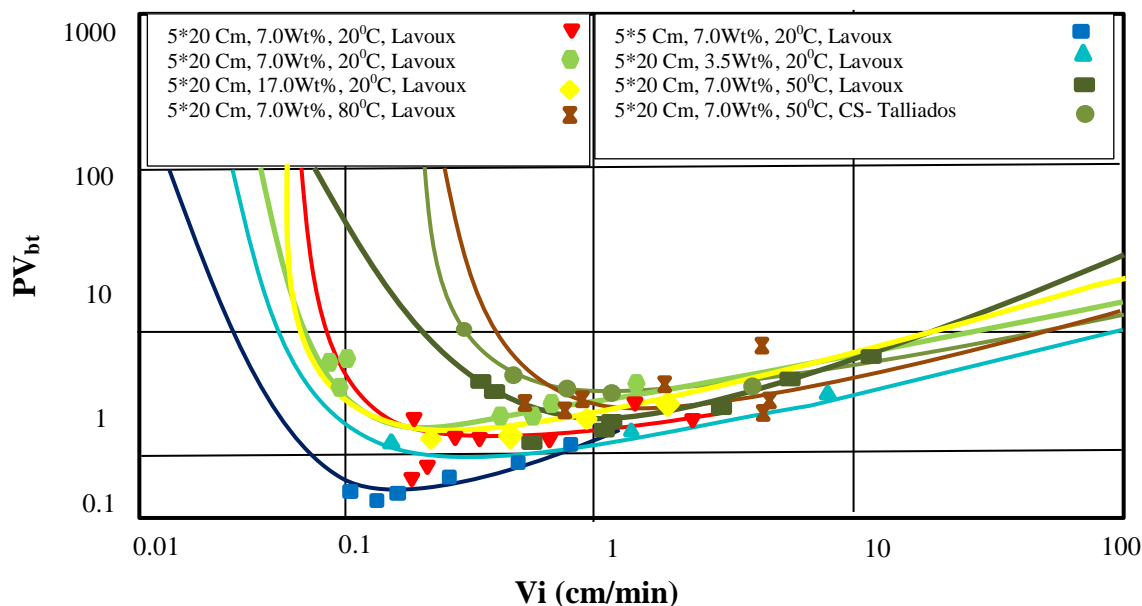
-
- 1- Mazel
 - 2- Talbot and Gdanski
 - 3- Furui



شکل ۲-۲. داده تجربی مناسب برای روابط مدل وانگ و همکاران (۱۹۹۳) (تالبوت و گدانسکی، ۲۰۰۸).



شکل ۲-۳. داده تجربی مناسب برای روابط مدل فرد و فوگلر (۱۹۹۹) (تالبوت و گدانسکی، ۲۰۰۸).



شکل ۲-۴. داده تجربی مناسب برای روابط مدل بازین (۲۰۰۱) (تالبوت و گدانسکی، ۲۰۰۸).

اکونوماید و همکاران^۱ (۲۰۱۳) در مطالعات خود حجم اسید مورد نیاز برای سرعت بهینه تزریق را در مدل جریان شعاعی تعیین کردند. سرعت بهینه تزریق میدان از طریق یک نسبت حجمی ساده محاسبه می‌شود. آنها در این مطالعه نشان دادند که پمپاژ اسید در نرخ بالاتر جهت استفاده مؤثر ارجحیت دارد. همچنین، چندین مدل جریان شعاعی دیگر نیز توسعه یافته است (Economides et al. 2013).

فوری و همکاران (۲۰۱۲) و کومار و همکاران^۲ (۲۰۱۴) اذعان کردند که داده های آزمایشگاهی اندکی در حداکثر سرعت تزریق ۳۰ سی سی بر دقیقه در دسترس است. اکثر آنها برای پیش بینی فاکتور ضریب پوسته، میزان نفوذ شعاعی در نرخ تزریق بالاتر و یا به عنوان سرعت بینابینی افزایش مقیاس داده شده است (Furui et al. 2012, Kumar et al. 2014).

1- Economides
2- Kumar

۲-۳ مروری بر مطالعات آزمایشگاهی عملیات اسیدزنی

آندرسون و همکاران^۱ (۱۹۸۷) آزمایش‌هایی را به منظور بررسی عوامل مؤثر بر هدایت هیدرولیکی در عملیات اسیدزنی انجام دادند. در این آزمایش‌ها نرخ تزریق جریان ثابتی بوده و با افزایش فشار محصورکننده، میزان هدایت هیدرولیکی نمونه کاهش یافت. آنها همچنین نتیجه‌گیری کردند که برای ارزیابی عملیات اسیدزنی، تعیین ترکیب بهینه اسید در سازند مورد نظر ضروری است (Anderson et al. 1987).

داکورد^۲ (۱۹۸۷) به منظور دستیابی به شرایط مطلوب توصیه کرده است، حداقل مقدار اسید باید به سازند تزریق شود و آنها را با تزریق آب به گچ تأیید کرد. الگوهایی که در هنگام تزریق آب شکل می‌گیرند شبیه به شکل‌هایی است که در طی تزریق اسید به سنگ مخزن ایجاد شده است. او آب را به گچ تزریق کرده و الگوی انحلال حفرات کرمی شکل مختلف را با سرعت تزریق متفاوت مشاهده کرد. سرعت تزریق اسید یک عامل تعیین‌کننده است که می‌تواند الگوهای واکنش‌های مختلفی از قبیل انحلال سطح (فشرده)، حفره کرمی شکل غالب و حفره کرمی شکل تفکیک شده ایجاد کند (Daccord, 1987).

هوفنر و فوگلر^۳ (۱۹۸۹) نشان دادند نرخ انحلال^۴ 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 آن کاسته می‌شود. در این سنگ انحلال بصورت یکنواخت است بنابراین احتمال شکل یافتن حفره کرمی شکل کمتر است. به دلیل نرخ انحلال پایین در دولومیت که از ایجاد حفره کرمی شکل جلوگیری می‌کند حجم اسید مورد نیاز برای دست‌یابی به شکاف^۵ در شرایط تزریق یکسان، ممکن است برای

1- Anderson

2- Daccord,

3- Hoefner and Fogler

4-Dissolution rate

5-Breakthrough

دولومیت ده برابر بزرگ‌تر از سنگ آهک باشد (Hoefner and Fogler, 1989).

شتچر^۱ (۱۹۹۲) بیان کرد، در بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ میلادی شکافدهی با اسید در کربنات‌ها با پیشرفت‌هایی در تنوع سیستم‌های سیال و فرآیندهای گام‌های چندگانه تا به امروز افزایش یافته است. همچنین از انگیزش چاه، با حل شدن سنگ و ایجاد کانال‌هایی در اطراف چاه به عنوان تکنیکی برای افزایش جریان نفت و گاز از مخزن استفاده شده است (Schechter, 1992).

وانگ و همکاران^۲ (۱۹۹۳) اثر پارامترهای مختلف مانند غلظت اسید، کانی‌شناسی و دما را بر نرخ تزریق بهینه مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیقات آنها میزان تزریق بهینه‌ای که در نتیجه تشکیل یک حفره گرمی شکل بهینه می‌شود مورد بررسی قرار گرفت. آنها با در نظر گرفتن حجم اسید کلریدریک کمینه برای تعیین نرخ بهینه تزریق در سازندهای کربناته، با غلظت ۱۵ درصد نتیجه گرفتند که سازندهای با دمای بالا به نرخ تزریق بالاتری احتیاج دارند. همچنین آنها آزمایش‌هایی بر روی نمونه مغزه‌ها انجام دادند و به این نتیجه رسیدند نقطه‌ای که در آن یک حفره گرمی شکل غالب وجود دارد، نشان دهنده نرخ بهینه تزریق است. این نرخ به بهترین نتایج انگیزش در حالی که به حداقل میزان اسید نیاز است، مربوط می‌شود. همچنین به اثر خواص سیال و سنگ وابسته است. بنابراین این نرخ بهینه، آغاز بسیاری از مطالعات آزمایش‌های اسیدزنی است (Wang et al. 1993).

در مطالعاتی که توسط هالیبرتون^۳ (۲۰۰۰) بر روی انگیزش چاه انجام گرفت مشاهده شد که در شکافت هیدرولیکی، سیالات تزریق شونده باید دارای فشاری بیشتر از فشار سازند باشند تا امکان ایجاد کانال‌ها و مسیرهای جدید عبور نفت و گاز فراهم شود (Haliburton, 2000).

بازین^۴ (۲۰۰۱) مطالعات آزمایشگاهی را با استفاده از خصوصیات مندرج در جدول ۱-۲، به منظور تعیین نرخ بهینه تزریق از طریق اندرکنش اسیدکلریدریک ۱۵ درصد و سنگ آهک انجام داد که در

1- Schechter

2- Wang

3- Haliburton

4- Bazin

آن اثر غلظت اسید، درجه حرارت، نفوذپذیری و طول مغزه بررسی شده است. بر این اساس اشاره شده که نرخ تزریق بهینه با افزایش غلظت، دما و تراوایی سنگ افزایش می‌یابد (Bazin, 2001).

جدول ۲-۱. خصوصیات پتروفیزیکی نمونه‌های مورد استفاده برای آزمایش‌های اسیدزنی بازین (۲۰۰۱).

Core No.	Weight (g)	Length (cm)	Dimeter (cm)	Prosity (%)	Permeability (md)	Density (g/cm ³)
1	628.54	9.97	6.28	18.95	5.052	2.664
2	658	9.905	6.53	21.78	7.429	2.665
3	654.09	9.93	6.36	20.26	11.606	2.680
4	624.01	9.72	6.4	20.43	9.466	2.669
5	632.75	9.77	6.285	21.26	4.212	2.653
6	633.86	10.03	6.275	16.34	4.227	2.657
7	685.95	9.94	6.41	14.5	5.344	2.659
8	650.17	9.98	6.34	19.72	12.263	2.658

وی همچنین مشاهده کرد که با افزایش نفوذپذیری، سرعت بینابینی بهینه و حجم منافذ مربوط به حفره کرمی شکل افزایش می‌یابد. در کار او دو نمونه مغزه، یکی با دامنه نفوذپذیری ۲/۹-۲/۱ میلی‌داری و دیگری با دامنه ۱۷۰-۲۲۰ میلی‌داری مورد بررسی قرار گرفتند (Bazin, 2001). نویتو گومز^۱ (۲۰۰۶) آزمایش‌های گسترده‌ای بر روی مغزه‌های ماسه‌سنگی و کربناته با هدف ارزیابی تأثیر ناهمگنی سنگ و نیز شرایط عملیاتی در مکانیزم اسیدزنی انجام دادند. یکی از نتایج مطالعات این بوده که در اسیدزنی مغزه‌های سنگ آهک با اسید کلریدریک دارای غلظت ۱۵ درصد کانال‌ها و شکاف‌های بزرگ‌تر و در نتیجه تراوایی بالاتری حاصل می‌شود. همچنین در این تحقیق نشان داده شده که در سنگ‌های کربناته، نرخ تزریق بر مقدار اسید مورد نیاز برای ایجاد شکاف تأثیر بسزایی دارد. همچنین ملاحظه شده که کمترین نرخ جریان، الگوی یکنواخت‌تری را در دهانه مغزه شکل می‌دهد (Nevito Gomez, 2006).

1- Nevito Gomez

ضیاء‌الدین و بیزه^۱ (۲۰۰۷) اثر نفوذ خواص سنگی، خصوصاً ناهمگنی در مقادیر منافذ رفتار اسیدی ماتریس را بررسی کردند. بر اساس این مطالعه، هشت نوع مختلف سنگ آهک (با نفوذپذیری ۰/۲ تا ۸۰ میلی‌داری)، را در انواع مخازن طبقه بندی کردند. این طبقه‌بندی بر اساس توزیع فضایی تخلخل، کانی‌شناسی، بافت و مواد سنگی آنها بوده است. آزمایشات تکمیلی شامل رزونانس مغناطیسی مغزه (NMR)^۲، اسکن کامپیوتری، اسکن میکروسکوپ الکترونی (SEM)^۳، آزمون مقاومتی و تزریق جیوه با فشار بالا بوده است. نمونه‌های سنگی با توزیع فضایی تخلخل مشابه، روند مشابهی را در حجم منافذ تا حد معقول نشان دادند (Ziauddin and Bize, 2007).

طبق مطالعات گلسبرگن و همکاران^۴ (۲۰۰۹)، با توجه به سطح آهسته سرعت واکنش با سازند، انحلال بصورت یکنواخت رخ می‌دهد که باعث رفع آسیب در منافذ نزدیک چاه می‌شود. از سوی دیگر، اسیدزنی ماتریس می‌تواند باعث ایجاد ضریب پوسته منفی شود. بدیهی است، بهبود بهره‌وری بر اثر ایجاد حفرات کرمی شکل در مخازن کربناته خواهد بود (Glasbergen et al. 2009).

کالیا و همکاران^۵ (۲۰۰۹) اثرات اندازه دامنه (طول یا ارتفاع) را بر میزان تزریق و حجم بهینه مطالعه کرده و دریافته‌اند که تغییر پارامترهای دامنه به پارامترهای مطلوب، تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. همانطور که اندازه دامنه افزایش یافته است (بزرگتر از ۱ اینچ در ۶ اینچ)، به نظر می‌رسد سرعت بهینه و حجم شکاف مربوط به آن کاهش می‌یابد. این نتایج با مشاهدات توسط بازین (۲۰۰۱) مطابقت داشت. با این حال، تحقیقات گسترده‌ای در میزان تزریق نسبتاً کم انجام شده است. وی اظهار داشته تاکنون هیچ کار آزمایشی در میزان تزریق بالای ۵۰ سی‌سی بر دقیقه (۳۰۰۰ سی‌سی بر ساعت)، در شرایط مخزن گزارش نشده است (Kalia and Balakotaiah, 2009).

شکل ۲-۵ تصاویر سی‌تی اسکن از الگوهای انحلال حفرات کرمی شکل مختلف را نشان می‌دهد. در نرخ تزریق کم (۱)، انحلال فشرده در ورودی مغزه رخ می‌دهد و منجر به استفاده ناکارآمد از اسید

1- Ziauddin and Bize

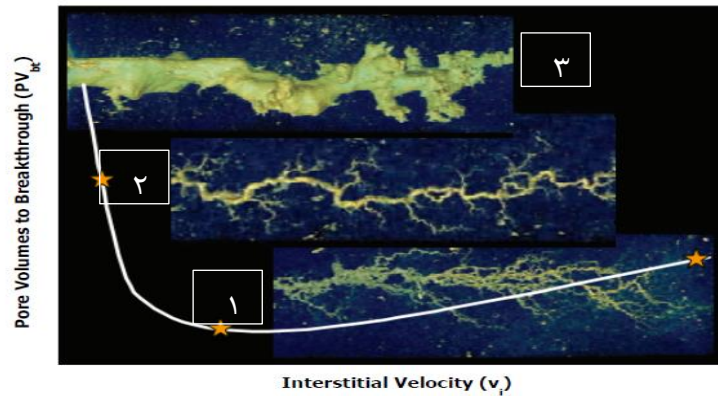
2-Nuclear Magnetic Resonance

3-Scanning Electron Microscope

4- Glasbergen

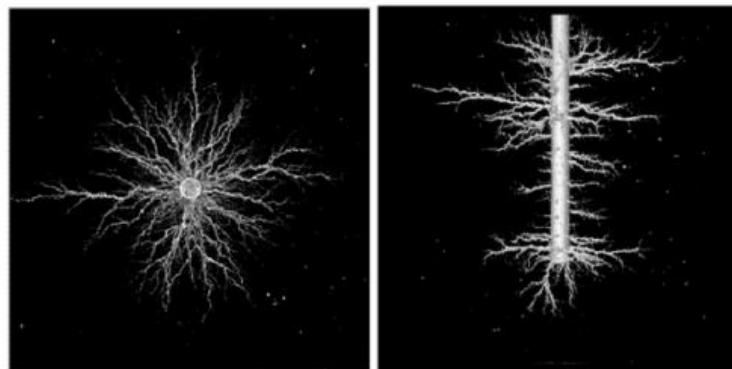
5- Kalia and Balakotaiah

می‌شود. در مقایسه با سرعت تزریق بالا (۲)، حفره های کرمی شکل یکنواخت، ساختار بسیار شاخه‌ای شکل می‌گیرند. این امر همچنین منجر به استفاده ناکارآمد از اسید به عنوان مایع به منافذ کوچکتر و ایجاد چند کانال کوچک شده است. به عنوان نمونه در نرخ تزریق بالا (۳)، یک حفره کرمی شکل غالب وجود دارد. (McDuff et al. 2010).



شکل ۲-۵. الگوهای ریزش در مقادیر مختلف تزریق در کربنات‌ها (مک داف و همکاران، ۲۰۱۰).

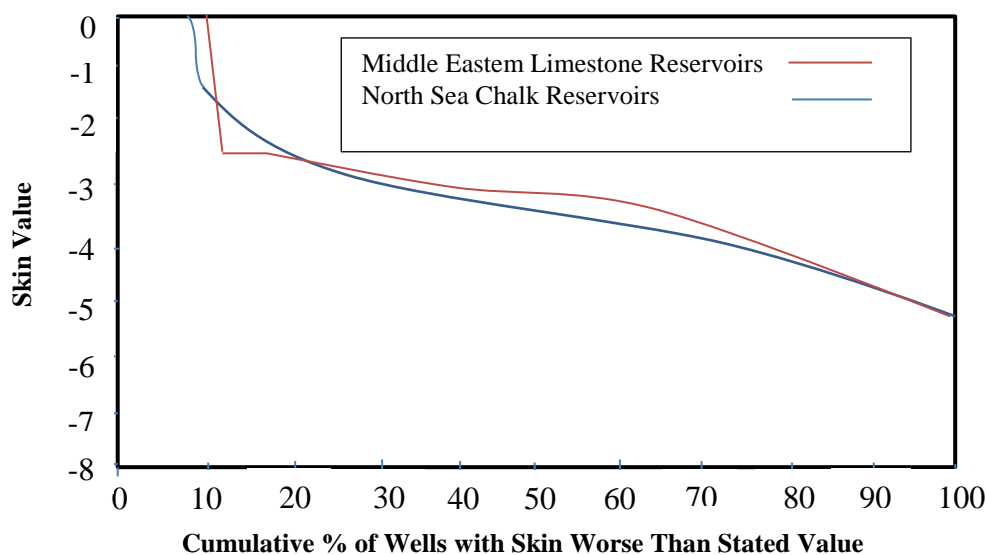
مک‌داف و همکاران^۱ (۲۰۱۰) با انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس، الگوهای انتشار حفرات کرمی شکل سه بعدی را ارائه دادند (شکل ۲-۶). در این کار، نمونه‌های سنگی ۱۴ فوت مکعب، در ۳ حجم اسیدزنی شدند و با استفاده از یک دستگاه سی‌تی اسکن تصویر برداری شدند.



شکل ۲-۶. ساختار حفره کرمی شکل سه بعدی در سرعت تزریق بهینه (مک داف و همکاران، ۲۰۱۰).

به علاوه از طریق آزمایشات سیلابزنی می توان اطلاعات ارزشمندی در مورد انتشار حفرات کرمی شکل دست آورد. همچنین عوامل دیگری مانند غلظت اسید، نوع اسید، دما و ابعاد مغزه نیز در این زمینه نقش خواهند داشت (McDuff et al. 2010).

فوری و همکاران^۱ (۲۰۱۲) حدود ۴۰۰ چاه در مخازن سنگ آهک خاورمیانه و مخازن گچ دریای شمال را مورد بررسی قرار دادند. همانطور که در شکل ۲-۷ دیده می شود، کار آنها به طور متوسط برای ضریب پوسته مقداری برابر با ۴- نشان می دهد. این نشان می دهد که با طراحی صحیح عملیات تحریک، اسیدزنی ماتریس می تواند به طور مؤثر ضریب پوسته را کاهش داده و بهره وری چاه را افزایش دهد.

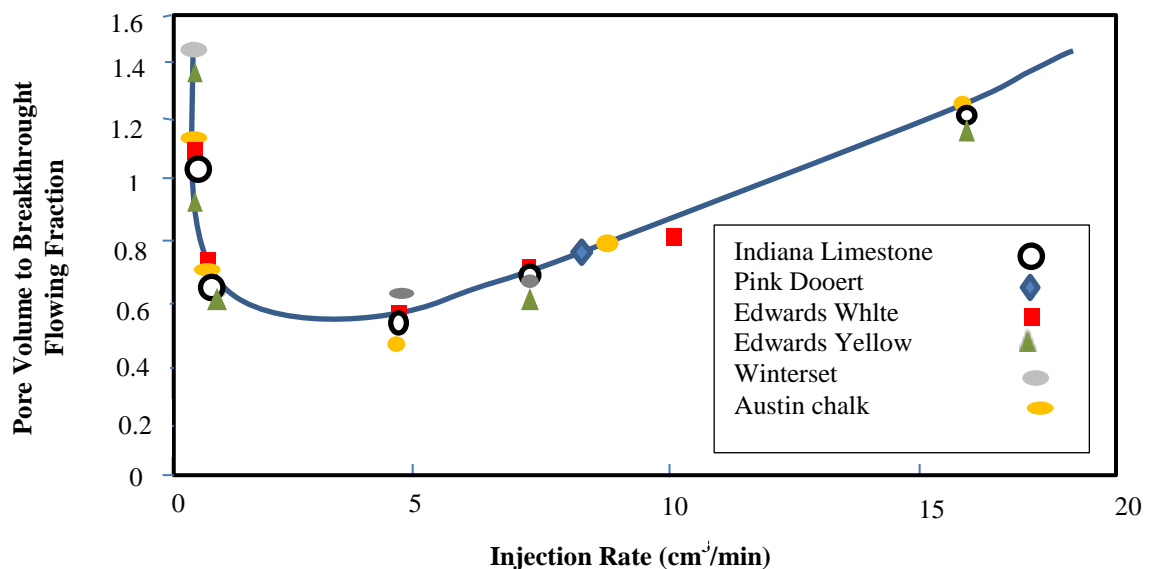


شکل ۲-۷. مقادیر ضریب پوسته پس از اسیدزنی (فوری و همکاران، ۲۰۱۲).

در مطالعات صورت گرفته توسط الغامدی^۲ و همکاران (۲۰۱۴)، سرعت تزریق اسید تا حدود ۵۰ سی سی بر دقیقه افزایش یافته و دمای آن به ۷۷ درجه فارنهایت رسانده شده است؛ اما تعیین پارامترهای بهینه در سرعت و دمای تزریق بالا مورد بررسی قرار نگرفته است (Al-Ghamdi, 2014).

1-Furui
2-Al-Ghamdi

زکریا و همکاران^۱ (۲۰۱۵) در مطالعه خود مقدار ناهمگونی مقادیر کربناته را با توجه به اندازه، شکل، اتصال، نوع تخلخل و تفاوت در ساختار و بافت سنگ اندازه‌گیری کردند. آنها این کار را از طریق استفاده از یک پارامتر به نام کسر جریان^۲ انجام دادند که نشان‌دهنده کسری از ساختار منافذ است که موجب جریان سیال می‌شود. علاوه بر این با انجام آزمایش اسیدزنی با استفاده از اسید کلریدریک ۱۵ درصد و در دمای ۱۵۰ درجه فارنهایت، یک منحنی ایجاد شد (شکل ۲-۸) تا چگونگی ارتباط مقادیر بدست‌آمده از حجم منافذ را با کسر جریان نشان دهد. این آزمایش‌ها طی چندین مرحله تکرار شدند تا وجود این منحنی را در دماهای مختلف تزریق تأیید کند.



شکل ۲-۸. منحنی بازده کربنات برای انواع مختلف سنگ کربنات بر اساس کسر جریان آنها (زکریا و همکاران، ۲۰۱۵).

درحالی‌که مطالعات مربوط به نفوذپذیری بر کارایی حفرات گرمی شکل تکمیل شده است، محدوده نفوذپذیری آزمایش، محدود شده است. علاوه بر این، اثر ترکیبی نفوذپذیری و ساختار منافذ مورد بحث قرار نگرفته است (Zakaria et al. 2015).

1- Zakaria
2-Flowing fraction

۲-۴ جمع بندی

مطالعات انجام شده در خصوص عملیات اسیدزنی نشان می‌دهد که پارامترهای مختلفی در آن دخیل هستند. از جمله می‌توان به نوع اسید مصرفی، غلظت آن، نوع واکنش‌پذیری اسید، دما، جنس سازند، مشخصات فیزیکی نمونه و همچنین فشارهای موجود اشاره کرد. این موضوع بطور خاص در مورد فشار محصورکننده و اثر آن بر روی تراوایی نیز انجام شده است. از آنجاییکه در حین انجام عملیات اسیدزنی حفرات کرمی شکل در سازند تشکیل می‌شود، تراوایی را نیز تحت تأثیر خود قرار می‌دهد؛ بنابراین اثر تغییر فشار محصورکننده پس از اسیدزنی نیز در خصوص تراوایی وجود خواهد داشت. همچنین حفرات کرمی شکل ایجاد شده در اثر سرعت تزریق‌های متفاوت با الگوهای مختلفی ایجاد می‌شوند؛ این الگو شامل یک ساختار اصلی به همراه ساختارهای فرعی به شکل انشعابات از آن می‌باشد که می‌توان چگونگی تشکیل آنها را در تصاویر سی‌تی اسکن مشاهده و بررسی نمود.

فصل سوم: تئوری اسیدزنی در سنگ های مخزنی کربناته

۳-۱ مقدمه

اسیدزنی ماتریس یک روش انگیزشی می‌باشد که در هنگام آسیب‌دیدگی مجاورت چاه سودمند است؛ بنابراین در مرحله اول برنامه‌ریزی هر عملیات اسیدزنی ماتریس باید تحلیل دقیق دلایل کاهش تولید چاه انجام شود. این تحلیل با تعیین ضریب پوسته شروع می‌شود. برای چاه‌های انحرافی عامل ضریب پوسته منفی نیز به علت تماس زیاد با مخزن وجود دارد.

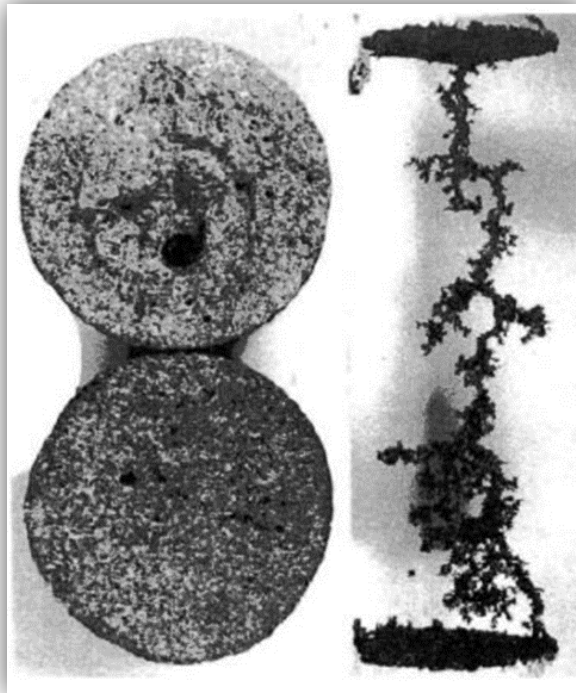
بطور کلی ضریب پوسته پارامتری است که در توصیف آسیب سازند مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پارامتر که از آزمون‌های چاه‌آزمایی بدست می‌آید در نواحی آسیب‌دیده و یا بخش‌هایی از چاه که تراوایی کمتری نسبت به سازند دارند، مثبت می‌باشد. بنابراین در بخش‌هایی که اسیدزنی با موفقیت انجام شده و تراوایی افزایش می‌یابد، این مقدار منفی خواهد بود؛ همچنین در نقاطی که مقادیر تراوایی در چاه و سازند با هم برابر می‌باشند، این ضریب صفر می‌باشد. بنابراین آسیب ناشی از نفوذ گل حفاری با حرکات ذرات ریز را می‌توان به خوبی با اسید رفع کرد (Cruz et, al. 2011).

وقتی که آسیب سازند قابل رفع با اسید به عنوان بهره‌دهی ضعیف چاه مشخص شود، طراحی عملیات اسیدزنی را می‌توان شروع کرد. پیش‌بینی اسیدزنی کربنات‌ها فرآیندی دشوارتر از اسیدزنی ماسه-سنگ‌ها می‌باشد، چون برخلاف اینکه شیمی فرآیند، خیلی ساده‌تر از اسیدزنی ماسه‌سنگ‌ها می‌باشد؛ اما قطعاً فیزیک آن خیلی پیچیده است. در ماسه‌سنگ‌ها سرعت واکنش‌های سطحی کند می‌باشند و اسید بصورت نسبتاً یکنواختی در محیط متخلخل حرکت می‌کند. در کربنات‌ها سرعت واکنش‌های سطحی خیلی بالا می‌باشد بنابراین انتقال جرم اغلب سرعت واکنش کلی را محدود می‌سازد و الگوهای انحلال غیر یکنواختی را به وجود می‌آورد. در این فصل به توضیح اسیدزنی سنگ‌های کربناته و نحوه‌ی رشد و تشکیل الگوهای انحلال بر اثر آن پرداخته می‌شود.

۲-۳ اسیدزنی در سنگ‌های کربناته

در عملیات اسیدزنی طبق الگوی خطی، معمولاً چندین کانال بزرگ که حفره کرمی شکل نامیده می‌شوند (شکل ۱-۳) به وسیله انحلال غیر یکنواخت آهک در اسید کلریدریک ایجاد می‌شوند (Hoefner and Fogler, 1988). ساختار الگوهای حفره کرمی شکل به عوامل گوناگونی بستگی دارد که شامل هندسه جریان، دبی تزریق، سینتیک واکنش و سرعت انتقال جرم می‌باشد. برای مثال شکل ۲-۳ یک قالب حفره کرمی شکل که در لایه‌های کربناته ایجاد شده را نشان می‌دهد، این الگوی حفره کرمی شکل خیلی شاخه‌دارتر از شکل ۱-۳ می‌باشد؛ به طور مشخص مقدار اسید مورد نیاز برای انتشار حفرات کرمی شکل در این دو سیستم به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت خواهد بود (Daccord and Lennormand, 1987).

از آنجاکه حفرات کرمی شکل خیلی بزرگتر از فضاهای خالی در کربنات‌های غیر متخلخل^۱ هستند، افت فشار در طول ناحیه‌ای که به وسیله حفرات کرمی شکل اشغال شده ناچیز خواهد بود؛ بنابراین در اسیدزنی ماتریس، تشخیص عمق نفوذ حفرات کرمی شکل، امکان پیش بینی اثر اسیدزنی روی ضریب پوسته را فراهم می‌کند. حفرات کرمی شکل در ایجاد شکاف به وسیله اسید نیز خیلی قابل ملاحظه می‌باشند، چون باعث افزایش سرعت هرزروی سیال خواهد شد که نفوذ اسید به داخل شکاف را محدود می‌سازد؛ بنابراین برای پیش بینی نتایج اسیدزنی در کربنات‌ها، می‌بایست به فیزیک رشد حفرات کرمی شکل دقت داشت. این فرآیند بطور ذاتی ناپایدار هنوز کاملاً شناخته شده نیست؛ ولی در سال‌های اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی در این زمینه صورت گرفته است (Cohen et al. 2008).



شکل ۳-۱. حفرات کرمی شکل ایجاد شده در اثر انحلال آهک در اسید (هوفنر و فوگلر، ۱۹۸۸).

۳-۳ تشکیل و رشد حفرات کرمی شکل

وقتی که فضاهای خالی در اثر انحلال در اسید با سرعت شروع به رشد کنند، حفرات کرمی شکل تشکیل می‌شوند؛ بطوری که یک فضای خالی بزرگ با یک روند افزایشی، نسبت بیشتری از حلال را دریافت کرده و سرانجام به حفره کرمی شکل تبدیل می‌شود. این امر هنگامی رخ می‌دهد که واکنش‌ها محدود به انتقال جرم باشند (Daccord and Lenormand, 1989).



شکل ۳-۲. انتشار حفرات کرمی شکل ایجاد شده در یک سازند کربناته (داکورد و لنورمند، ۱۹۸۷).

میل طبیعی برای تشکیل حفرات کرمی شکل هنگامی که واکنش محدود به انتقال جرم است به صورت تئوری و با استفاده از یک مدل رشد فضای خالی نشان داده شده است (Schechter and Gidley, 1969).

$$\frac{dA}{dt} = \Psi A^{1-n} \quad (۱-۳)$$

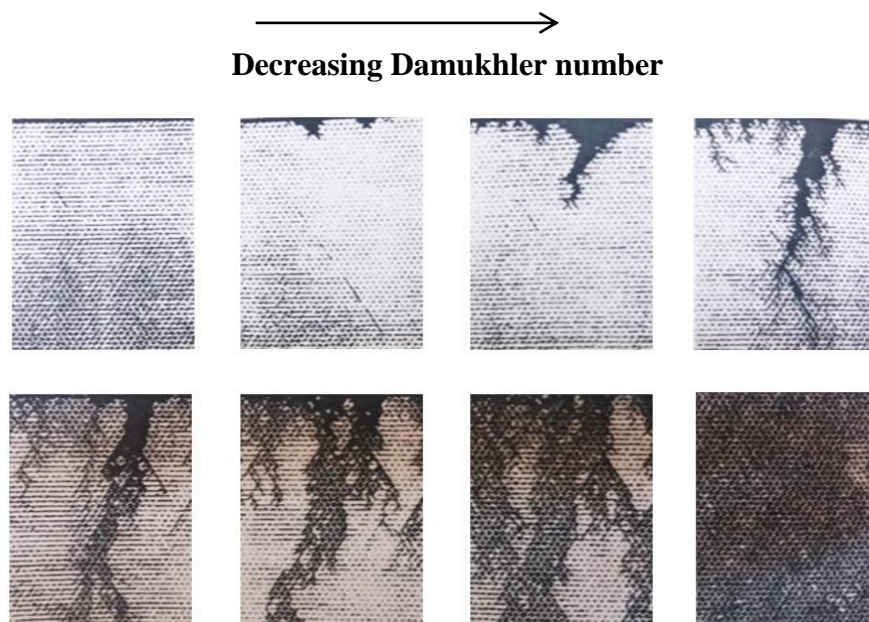
در این رابطه A سطح مقطع فضای خالی، t زمان و Ψ تابع رشد فضای خالی است که به زمان بستگی دارد. ارزیابی معادله ۱-۳ نشان می‌دهد که اگر $n > 0$ باشد، فضاهای خالی کوچک سریع‌تر از فضاهای خالی بزرگ رشد می‌کنند و حفرات کرمی شکل نمی‌توانند تشکیل شوند؛ اگر $n < 0$ باشد، فضاهای خالی بزرگ‌تر سریع‌تر از فضاهای خالی کوچک‌تر رشد می‌کنند و حفرات کرمی شکل توسعه می‌یابند.

مدل‌های جریان با واکنش در مجموعه‌ای از فضاهای خالی استوانه‌ای می‌توانند تمایل به تشکیل حفرات کرمی شکل را پیش‌بینی کنند؛ ولی تصویر کاملی از فرآیند تشکیل حفرات کرمی شکل را نمی‌دهند، چون شامل اثرات هرزروی سیال از فضاهای خالی نمی‌شود (Hoefner and Fogler, 1988). وقتی اسید در فضاهای خالی بزرگ حرکت می‌کند، نرخ هرزروی سیال، بخش جریان اسید به دیواره حفره کرمی شکل را شامل می‌شود و در نهایت بصورت یک عامل محدودکننده در رشد حفرات کرمی شکل مطرح می‌شود. هرزروی سیال در طول دیواره‌های حفرات کرمی شکل باعث ایجاد شاخه‌هایی مانند شکل ۱-۳ و ۲-۳ می‌شود.

بنابراین تشکیل یا عدم تشکیل حفرات کرمی شکل و ساختار آنها، به سرعت نسبی واکنش سطحی، نفوذ و هرزروی سیال بستگی دارند و همه این‌ها بستگی به سرعت کلی اسید دارند. پیشرفت الگوی انحلال وقتی رخ می‌دهد که سرعت تزریق افزایش یابد. برای سیستمی با سرعت واکنش سطحی خیلی بالا مانند سیستم اسیدکلریدریک-آهک، شیوه‌های حمله اسید را می‌توان به صورت انحلال فشرده، تشکیل حفره کرمی شکل محدود به هرزروی سیال و انحلال یکنواخت شرح داد. این الگوهای انحلال که با مدل شبکه‌ای هوفنر و فوگلر (۱۹۸۸) پیش‌بینی شده‌اند در شکل ۳-۳ نشان داده شده است (Hoefner and Fogler, 1988).

با افزایش دبی جریان یک و یا چندین حفره کرمی شکل بزرگ تشکیل می‌شود و در محیط متخلخل انتشار می‌یابد. در دبی تزریق نسبتاً پایین شاخه‌ای شدن کمتر خواهد بود و فقط یک یا چند حفره کرمی شکل بزرگ تشکیل خواهد شد. یک خصوصیت این شیوه از حمله اسید این است که حجم اسید مورد نیاز برای انتشار حفره کرمی شکل در فاصله معین با افزایش دبی تزریق کاهش می‌یابد. در دبی‌های بالاتر شاخه‌های زیادتری تشکیل می‌شوند و مقدار زیادی اسید را مصرف می‌کنند و بنابراین سرعت انتشار حفره کرمی شکل را کند می‌کنند. در این شیوه از حمله که تشکیل حفره، محدود به هرزروی سیال است، همانطور که به وسیله داکورد و لنورمند (۱۹۸۷) نشان داده شده، ساختار حفره‌ی کرمی شکل شاخه‌دار می‌تواند فراکتالی شکل باشد. هنگامی که حفره تشکیل محدود به

هرزروی سیال رخ می‌دهد، بازده اسیدزنی با افزایش دبی تزریق به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این بدین معنی است که دبی تزریق بهینه برای انتشار مؤثر حفره کرمی شکل، منجر به هرزروی سیال در دیواره حفره کرمی شکل می‌شود (Daccord and Lennormand, 1987).



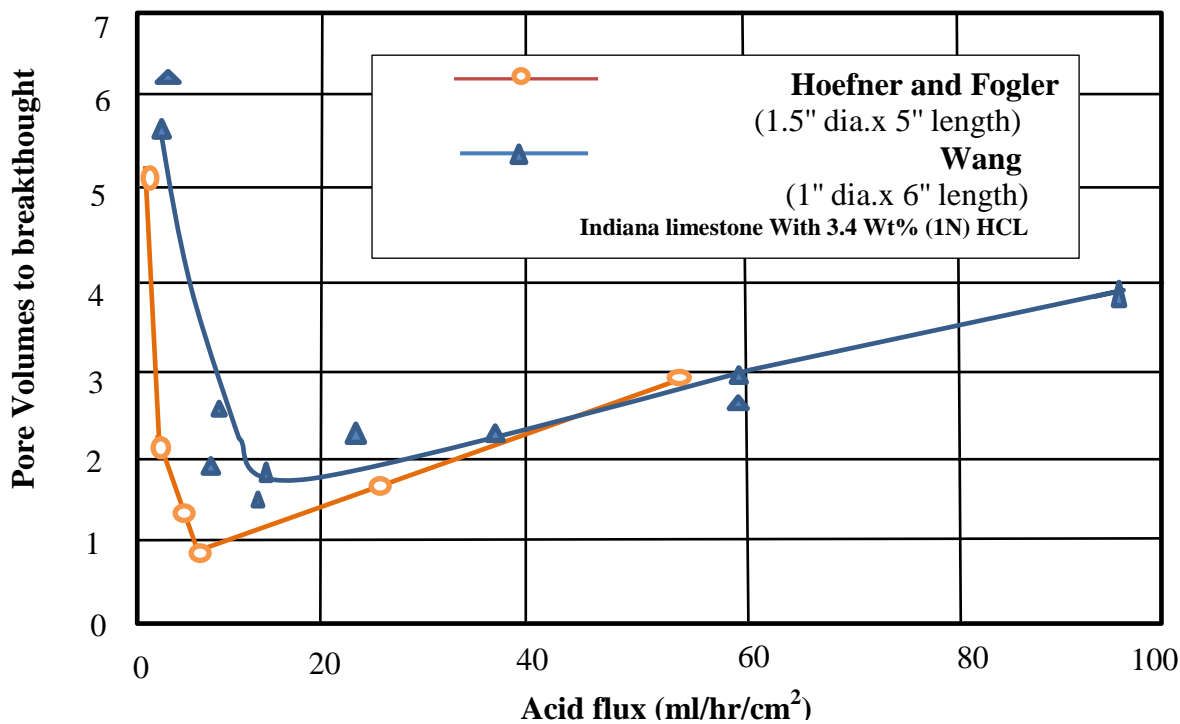
شکل ۳-۳. شبیه سازی مدل شبکه‌ای الگوهای حفره کرمی شکل (هوفنر و فوگلر، ۱۹۸۸).

در دبی‌های تزریقی خیلی بالا، انتقال جرم اسید به اندازه‌ای سریع می‌باشد که سرعت کل واکنش محدود به سرعت واکنش سطحی می‌شود و همانند ماسه سنگ‌ها انحلال یکنواخت رخ می‌دهد. از آنجاکه دبی تزریقی به علت جلوگیری از ایجاد شکست محدود می‌باشد، ممکن است انحلال یکنواخت، هرگز در اسیدزنی ماتریس کربنات‌های خیلی واکنش پذیر رخ ندهد. مطالبی که در اینجا بیان شد به اندازه نسبی نفوذ و سرعت واکنش‌های سطحی و همچنین به هندسه جریان به دلیل نقش هرزروی سیال بستگی دارد؛ بنابراین نحوه تشکیل حفره کرمی شکل در دولومیت‌ها در مقایسه با آهک‌ها به علت سرعت‌های واکنش مختلف، بسیار متفاوت است. همچنین پیش‌بینی گسترش حفره کرمی شکل بر اساس جریان خطی مانند سیلاب‌زنی مغزه، ممکن است برای هندسه‌های جریانی دیگر مانند جریان شعاعی معتبر نباشد.

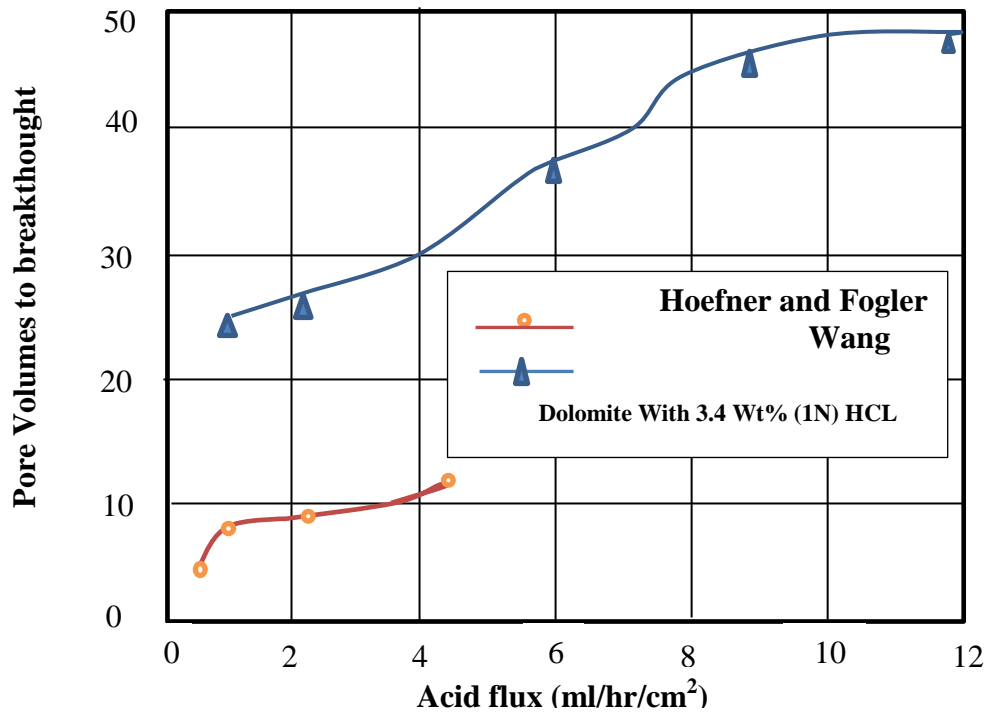
شکل ۳-۴ حجم اسید مورد نیاز برای انتشار حفرات کرمی شکل در مغزه‌های آهکی ایندیانا را برای آزمایشات وانگ (۱۹۹۳) و هوفنر و فوگلر (۱۹۹۸) نشان می‌دهد. یک مقدار حداقل در مقدار اسید لازم برای انتشار حفره کرمی شکل در مغزه وجود دارد که نشان‌دهنده تغییر از تشکیل حفره کرمی شکل محدود به نفوذ به حفره کرمی شکل محدود به هرزروی سیال می‌باشد. باید توجه داشت که در رژیم محدود به نفوذ، حجم اسید مورد نیاز برای انتشار یک حفره کرمی شکل در یک عمق معین با افزایش دبی تزریق کاهش می‌یابد؛ ولی وقتی که انتشار حفره کرمی شکل محدود به هرزروی سیال باشد، حجم اسید مورد نیاز فقط بطور تدریجی با افزایش دبی تزریقی افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که دبی بالاتر از دبی بهینه بهتر از دبی خیلی پایین است (Wang and Schechter Hoefner and Fogler, 1998 , 1993).

سرعت واکنش اسید کلریدریک - دولومیت به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از سرعت واکنش اسید کلریدریک - آهک است. با سرعت واکنش کمتر، تشکیل حفره کرمی شکل محدود به هرزروی سیال در دبی‌های کمتر رخ می‌دهد و همانطور که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است برای انتشار یک حفره در فاصله معین اسید بیشتری لازم است.

سه نوع مدل از فرآیند تشکیل اسید بیان شده است: «۱» مدل مکانیکی یک حفره کرمی شکل یا یک مجموعه‌ای از حفره‌ها (هانگ و همکاران (۱۹۸۹)، شتچر (۱۹۹۲)) «۲» مدل‌های شبکه‌ای (هوفنر و فوگلر (۱۹۸۸)، داکورد و همکاران (۱۹۸۹)) «۳» مدل‌های فراکتالی یا تصادفی (داکورد و همکاران (۱۹۸۹)، پیچلر و همکاران (۱۹۹۲)). به نظر می‌رسد که از این مدل‌ها، مدل‌های شبکه‌ای بهترین توصیف از رفتار حفره کرمی شکل در شرایط وسیعی را نشان می‌دهند؛ اما کاربرد آن‌ها در طراحی عملیات اسیدزنی دشوار است. علاوه بر این مدل‌ها، یک مدل تجربی ساده (مدل حجمی) وجود دارد که در ادامه شرح داده می‌شود (Pichler et al. 1992).



شکل ۳-۴. حجم اسید لازم برای انتشار حفرات کرمی شکل در مغزه‌های آهنی خطی (وانگ، ۱۹۹۳).



شکل ۳-۵. حجم اسید لازم برای انتشار حفرات کرمی شکل در مغزه‌های دولومیتی خطی (وانگ، ۱۹۹۳).

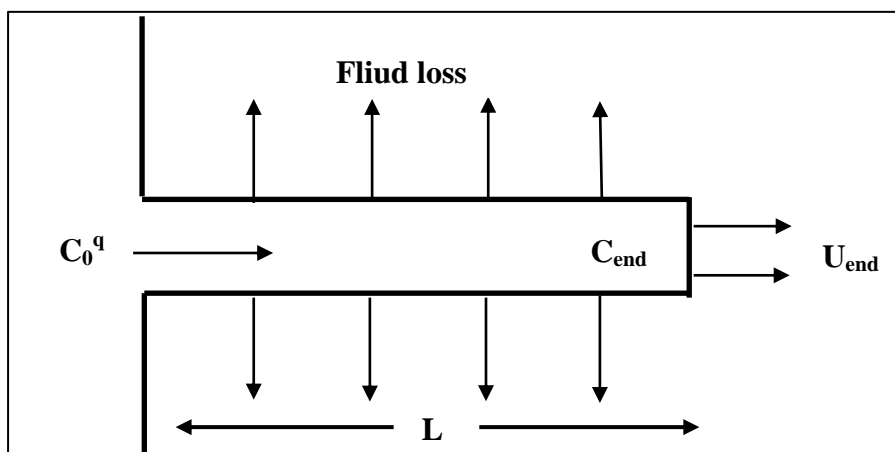
در شکل ۳-۶ یک مدل مکانیکی انتشار حفره کرمی شکل نشان داده شده است. اگر سرعت واکنش بالا باشد، تمام اسید منتقل شده به انتهای حفره برای حل کردن سنگ در ابتدای حفره کرمی شکل مصرف خواهد شد و در نتیجه حفره را گسترش خواهد داد. یک معادله موازنه جرم، سرعت تشکیل حفره کرمی شکل $\left(\frac{dl}{dt}\right)$ را به صورت رابطه ۳-۲ زیر تعریف می‌کند:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{u_{end} c_{end} \rho_{acid} \beta_{100}}{(1-\phi) \rho_{rock}} \quad (2-3)$$

که u_{end} و c_{end} شار و غلظت اسید (درصد حجمی) در پایان حفره کرمی شکل می‌باشند. رابطه ۳-۳ را می‌توان بر حسب عدد ظرفیت اسید به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dL}{dt} = \left(\frac{u_{end}}{\phi}\right) \left(\frac{c_{end}}{c_0}\right) N_{AC} \quad (3-3)$$

معادله ۳-۳ نقش نفوذ و هرزروی سیال را در انتشار حفره کرمی شکل نشان می‌دهد. هرچه اسید بیشتری به دیواره حفره نفوذ کند، غلظت اسید در پایان حفره کمتر خواهد بود. همچنین هرچه هرزروی سیال در حفره بیشتر باشد، نرخ کمتری از غلظت اسید در پایان حفره وجود خواهد داشت؛ بنابراین نفوذ و هرزروی سیال تمایل به کاهش سرعت تشکیل حفره کرمی شکل دارند. برای تکمیل مدل انتشار حفره کرمی شکل باید محاسبه شوند. با استفاده از یک مدل پیچیده انتقال اسید در حفره کرمی شکل، هانگ و همکاران (۱۹۸۹) دریافته‌اند که سرعت تشکیل حفره با دبی تزریقی بطور خطی می‌باشد. این امر بیانگر این مسأله است که حجم اسید لازم برای انتشار یک حفره، به طور ثابت کاهش خواهد یافت. چراکه جریان اسید در پایان حفره کرمی شکل با رشد حفره کاهش می‌یابد (Hung et al. 1989).



شکل ۳-۶. ایده آل سازی یک حفره کرمی شکل

در مدل شبکه‌ای، محیط متخلخل را به عنوان مجموعه‌ای از موئین‌های مرتبط با هم در نظر می‌گیرد. برای مدلسازی رفتار حفره، غلظت اسید در هر موئین محاسبه شده و شعاع موئین‌ها با انحلال افزایش می‌یابد. با این نوع مدل نتایجی مانند شکل ۳-۳ به دست می‌آید. مدل‌های شبکه‌ای انواع الگوهای حفره کرمی شکل مشاهده شده را از راه آزمایش پیش بینی می‌کنند؛ اما جامعیت دادن به طراحی عملیات دشوار است. داکورد و همکاران (۱۹۸۹) مدلی را برای انتشار حفره کرمی شکل بر اساس طبیعت ساختارهای مشاهده شده در هنگام وقوع رفتار محدود به هرزروی سیال نشان دادند. بر اساس آزمایشاتی که صورت گرفت، داکورد و همکاران دریافتند که برای جریان خطی می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد (Daccord and Lenormand, 1989).

$$L = D^{-2/3} q^{-1/3} \frac{aV N_{AC}}{A\phi} \quad (3-4)$$

که a یک ثابت تعیین شده به وسیله آزمایش است، v حجم انباشتی اسید تزریقی، D ضریب نفوذ مولکولی و A سطح مقطع جریان است. این معادله نشان می‌دهد که برای یک حجم اسید تزریقی ثابت در یک دبی کمتر حفره طویل‌تری به دست می‌آید که مشابه انتشار حفره محدود به هرزروی سیال می‌باشد. چون V مساوی qt می‌باشد، معادله (۳-۴) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{a N_{AC}}{A\phi} D^{-2/3} q^{2/3} \quad (3-5)$$

که نشان می‌دهد، سرعت تشکیل حفره با دبی تزریق به توان $\frac{2}{3}$ افزایش می‌یابد. برای الگوی حفره فراکتال مشاهده شده در جریان شعاعی داکورد و همکاران دریافتند که :

$$r_{wh} = \left[\frac{bN_{AC}V}{\pi h \varphi} D^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{q}{h} \right)^{-\frac{1}{3}} \right] \frac{1}{d_f} \quad (3-6)$$

در رابطه ۳-۶ r_{wh} شعاع نفوذ حفره ، b یک ثابت و d_f بعد فراکتال می‌باشد که حدوداً مساوی $1/6$ می‌باشد. دوباره با جایگزینی qt به جای v و مشتق‌گیری نسبت به زمان رابطه ۳-۷ را نتیجه می‌دهد.

$$\frac{dr_{wh}}{dt} = \frac{1}{d_f} \left(\frac{bN_{AC}D^{-\frac{2}{3}}}{\pi \varphi} \right)^{\left(\frac{1}{d_f} \right)} \left(\frac{q}{h} \right)^{\left(\frac{2}{3d_f} \right)} t \left(\frac{1}{d_f} - 1 \right) \quad (3-7)$$

این معادله بیان می‌کند که سرعت تشکیل حفره در جریان شعاعی با دبی تزریق به توان 0.4 افزایش می‌یابد و با زمان کاهش می‌یابد. داکورد و همکاران ثابت b را مساوی 1.0×10^{-5} بر حسب واحد SI برای آزمایش در سیلابزنی مغزه کوچک شعاعی گزارش کردند. ممکن است که b برای واحدهای میدانی کوچکتر باشد.

در مدل داکورد فرض بر این است که نفوذ، مکانیزم محدودکننده در انتقال اسید به سطح سنگ می‌باشد و این مدل نقش هرزروی سیال - که مهمترین محدودیت در رشد حفره در بسیاری از حالت‌ها می‌باشد - در نظر نمی‌گیرد. همچنین این مدل بر اساس هندسه شبکه حفره مشاهده شده در آزمایشات می‌باشد و ممکن است الگوهای رخ دهنده در انحلال اسید در سنگ‌های کربناته را به خوبی نشان ندهد؛ بنابراین در مدل داکورد فاصله نفوذ اسید را در اسیدزنی سازندهای کربناته بیشتر برآورد می‌شود و در کاربرد آن باید دقت نمود.

۳-۴ نوع اسید و غلظت آن

اسیدها در صنعت نفت کاربرد فراوانی دارند و با قدرت حل‌شوندگی بالا برای تمیز کردن و شستشوی ذرات جامد سیالات حفاری، جرم‌گرفتنی‌ها و مواد آلی ته‌نشین شده مثل پارافین‌ها و آسفالتین‌ها و...

که مشکلاتی در روند تولید از مخزن ایجاد می‌کنند و همچنین آسیب‌هایی به خواص سنگ سازند وارد می‌سازند، بکار برده می‌شوند.

در طراحی برنامه اسیدزنی و تعیین اسیدهای موردنیاز جهت یک عملیات مؤثر، تراوایی سازند و اثر پوسته دارای اهمیت بسیاری می‌باشند. ترکیب تراوایی کم و اثر پوسته زیاد، تولید چاه را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. این دو عامل و دلایل ایجاد آنها بایستی قبل از عملیات انگیزش به درستی شناسایی گردند. تعیین، ارزیابی و شناسایی آسیب از عوامل بسیار مهم در اسیدزنی یک سازند می‌باشند. انتخاب دقیق نوع اسید و همچنین روش مورد استفاده در عملیات اسیدزنی برای انگیزش یک سازند به لحاظ اقتصادی و عملی، دارای اهمیت فراوانی است. اساس این انتخاب، شناخت نوع مواد تشکیل دهنده آسیب سازند و توجه به توانایی‌ها و محدودیت‌های اسیدهای مختلف می‌باشد. دانستن ویژگی‌های مختلف اسیدها به منظور انجام یک عملیات موفق ضروری خواهد بود.

اسیدها بر اساس ساختار مولکولی و ترکیب بندی به اسیدهای آلی، معدنی، پودری، مخلوط و تأخیری تقسیم‌بندی می‌شوند که در این بخش، دو خانواده اسیدهای آلی و معدنی شرح داده می‌شود (عادل‌زاده، ۱۳۹۳)

۳-۴-۱ اسیدهای آلی

از مهمترین خواص اسیدهای آلی خوردگی پایین و انحلال آسان‌تر در دماهای بالا است که در واقع می‌توان گفت این خواص اصلی‌ترین دلایل استفاده از اسیدهای آلی در عملیات انگیزش چاه می‌باشند. این اسیدها معمولاً در عملیاتی که زمان تماس تجهیزات و اسید زیاد است مورد استفاده قرار می‌گیرند (به طور مثال به عنوان سیال مشبک‌کاری). با اینکه اسیدهای آلی معمولاً به آسانی قابل دسترسی هستند، تنها دو اسید آلی اسید فرمیک و اسید استیک به مقدار قابل توجهی در عملیات انگیزش مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۴-۱-۱ اسید استیک (CH₃COOH)

این اسید اولین اسید آلی بود که در حجم قابل ملاحظه، در عملیات انگیزش چاه بکار گرفته شد. این اسید معمولاً به صورت محلول ۱۰ درصد وزنی اسید استیک در آب در دسترس می‌باشد. در این غلظت محصولات واکنش (استات کلسیم و منیزیم)، عموماً در اسید مصرف شده محلول هستند. علاوه بر کاربرد اسید استیک به عنوان سیال مشبک‌کاری و کاربرد آن به عنوان سیال با انحلال پایین (در حضور فلزاتی که به آسانی خورده می‌شوند) این اسید به صورت مخلوط با اسید کلریدریک به عنوان یک اسید هیبرید^۱ استفاده می‌شود.

بر اساس هزینه در واحد قدرت حل‌کنندگی، اسید استیک نسبت به اسید کلریدریک و اسید فرمیک گران‌تر است. این هزینه بالاتر اغلب منجر به استفاده آن در حجم کم برای کاربردهای خاصی که توصیف شد، می‌گردد.

اسید استیک در حضور محصولات واکنش خود، به طور کامل واکنش نمی‌دهد و بسیار کم یونیزه می‌شود به عبارت دیگر ثابت تفکیک^۲ آن کوچک است. اسید استیک فواید دیگری هم نسبت به اسید کلریدریک دارد. این اسید به طور معمول جهت پیشگیری از رسوب آهن استفاده می‌شود و رسوب آن را کاهش می‌دهد (یاوری، ۱۳۸۳)

۳-۴-۱-۲ اسید فرمیک (HCOOH)

در میان اسیدهای آلی که در عملیات اسیدزنی به کار برده می‌شوند اسید فرمیک دارای پایین‌ترین وزن مولکولی و کمترین قیمت در واحد حجم سنگ حل شده است. اسید فرمیک هم مانند اسید استیک، اسید آلی ضعیفی بوده و در حضور محصولات واکنش خود به یک غلظت تعادلی می‌رسد. این اسید از اسید استیک قوی‌تر است و به همین جهت، محافظت در مقابل انحلال در هنگام استفاده از آن مشکل‌تر است ولی به هر حال برای استفاده در دماهای بالا مناسب است. اسید فرمیک

1 - Hybrid Acid

2 - Disassociation Constant

به مقدار قابل ملاحظه‌ای ضعیف‌تر از اسید کلریدریک است. استفاده از اسید فرمیک مخصوصاً هنگامی مفید است که با اسید استیک مخلوط شود.

مزیت اصلی اسید فرمیک نسبت به اسید استیک، هزینه کمتر آن است. گرچه کاهش هزینه ایجاد شده ناشی از استفاده از اسید فرمیک ممکن است با هزینه بالاتر مواد بازدارنده انحلال آن جبران شود. اسید فرمیک نسبت به اسید استیک خورنده‌تر است اما خوردگی ناشی از آن یکنواخت‌تر و کمتر از اسید کلریدریک است و می‌توان با به کار بردن بازدارنده‌های خوردگی مؤثر از آن تا دمای ۴۰۰ درجه فارنهایت نیز استفاده کرد. در دما بالا تفاوت هزینه اسید فرمیک با اسید کلریدریک به دلیل غلظت بالای مواد بازدارنده انحلال مورد نیاز برای اسید کلریدریک ناچیز می‌شود.

اسید فرمیک کاملاً با آب قابل امتزاج است. در انگیزش چاه‌هایی با دمای زیاد این اسید را با اسید کلریدریک مخلوط کرده و به عنوان اسید ضعیف شده مورد استفاده قرار می‌دهند (یاوری، ۱۳۸۳).

۳-۴-۲ اسیدهای معدنی

گستره‌ی وسیعی از اسیدها متناسب با کاربرد آنها در صنعت نفت مورد استفاده قرار می‌گیرد. اسید کلریدریک و مجموع اسید کلریدریک و اسید فلئوریک از جمله اسیدهای متداول معدنی به لحاظ صرفه‌ی اقتصادی و کارایی می‌باشند. در ادامه به معرفی اجمالی ویژگی‌های اسید کلریدریک پرداخته خواهد شد.

۳-۴-۱ اسید کلریدریک (HCL)

اسید کلریدریک یک اسید معدنی بسیار قوی است که عموماً در بیشتر عملیات انگیزش چاه‌های نفتی بکار برده می‌شود. اسید کلریدریک مایع، با همه فلزات ترکیب می‌شود. در ضمن این عنصر با کربنات کلسیم و کربنات منیزیم که بخش قابل توجهی از سازندهای نفتی و گازی جهان را تشکیل می‌دهند نیز ترکیب می‌گردد. به علت کیفیت مطلوب این اسید در صنعت نفت مصرف آن از اسیدهای

دیگر بیشتر است. به طوری که این اسید، مهم‌ترین اسید در عملیات اسیدزنی در سازندهای کربناته می‌باشد. تهیه این اسید از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است و علاوه بر ارزان بودن، شرایط عملیاتی استفاده از آن نیز ساده است. غلظت اسید می‌تواند بین ۳٪ تا ۳۵٪ برای کاربردهایی نظیر تمیز کردن لوله‌های تولیدی متغیر باشد. محلول اسیدکلریدریک با غلظت بالاتر از ۱۵٪ را با اسید با قدرت بالا نام‌گذاری می‌کنند (یاوری، ۱۳۸۳).

معمولاً از اسیدکلریدریک با غلظت ۱۵٪ غلظت وزنی استفاده می‌شود. علاوه بر دلایل فنی، به دلایل زیر استفاده از اسیدکلریدریک ۱۵٪ در سازندهای کربناته رایج است:

- صرفه اقتصادی اسید با توجه به قدرت اسیدی
 - خطرات کمتر حمل و نقل
 - خطرات کمتر عملیاتی استفاده از اسید
 - قابلیت محلول نگه‌داشتن مقادیر بیشتری از نمک‌های حل شده پس از مصرف اسید
 - دسترسی و تهیه آسان اسید
 - استفاده آسان از افزایه‌های ضد انحلال در این نوع اسید
 - ایجاد حالت امولسیون‌ساز برای کم کردن سرعت واکنش و اثر بخشی بیشتر عملیات
- استفاده از غلظت‌های بالای این اسید بدلیل ایجاد انحلال در لوله‌ها و تجهیزات، نامناسب می‌باشد. اخیراً با توسعه بازدارنده‌ها، استفاده از غلظت‌های بالای این اسید کاربرد پیدا کرده است و در برخی موارد، غلظت‌های بالا سودمندترند. متأسفانه یکی از معایب اصلی اسیدکلریدریک، اثر انحلال بالای آن روی تجهیزات (درون چاهی و پمپاژ) می‌باشد که کنترل این اثر در حضور اسیدکلریدریک در دمای بالای ۲۵۰ درجه فارنهایت بسیار هزینه‌بر و مشکل است. به عنوان مثال در پمپ‌ها قطعاتی که دارای پوشش آلومینیومی یا کرومی هستند به راحتی در غلظت بالای این اسید، خورده می‌شوند. در اغلب

موارد شرایط چاه مورد نظر (دما و تجهیزاتی که باید از انحلال آن‌ها جلوگیری به عمل آید) تعیین می‌کند که آیا باید از اسیدکلریدریک، یا از سیالی با قدرت انحلال کمتر استفاده کرد (یاوری، ۱۳۸۳).

نمونه‌ای از واکنش‌های اسیدکلریدریک با برخی کانی‌ها در ادامه آمده است.

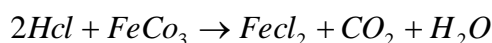
واکنش با کلسیت:



واکنش با دولومیت:



واکنش با سدرایت^۱:



واکنش با انگریت^۲:



اسیدکلریدریک به مراتب متداولترین اسید در اسیدزنی ماتریس کربناته می‌باشد. جدول ۱-۳ اسیدهای پیشنهادی مک لئود (۱۹۸۴) را برای عملیات‌های اسیدزنی گوناگون در سازندهای کربناته را نشان می‌دهد. اسیدهای ضعیف برای تمیزکاری شبکه و سیال مشبک کننده پیشنهاد می‌شوند، در غیر این صورت محلول‌های قوی اسیدکلریدریک پیشنهاد می‌شوند. برای اسیدزنی ماتریس اسید کلریدریک باید مورد استفاده قرار گیرد، مگر اینکه به دلایل انحلال نیاز به اسید ضعیف‌تر باشد. همه مدل‌های انتشار حفره گرمی شکل عمق نفوذ عمیق‌تری را برای غلظت‌های بالای اسید پیش بینی می‌کنند؛ بنابراین غلظت بالای اسیدکلریدریک مناسب‌تر است (McLeod, 1984).

1- Siderite
2- Anerite

جدول ۳-۱. راهنمای کاربرد اسیدزنی کربناته (McLeod, 1984).

سیال مورد استفاده	نوع عملیات اسیدزنی
اسید استیک ۵٪	مشبک کاری
اسیدفرمیک ۹٪ اسیداستیک ۱۰٪ HCl ۱۵٪	مشبک کاری‌های آسیب دیده
HCl ۱۵٪ HCl ۲۸٪ Emulsified HCl	آسیب سازند در بخش عمیق

۳-۴-۲-۲-۲ مخلوط اسید کلریدریک و اسید فلوئوریدریک

به مخلوط اسید کلریدریک و اسید فلوئوریدریک، اسید گلی^۱ می‌گویند. کاربرد آن معمولاً در مخازن ماسه سنگی به منظور افزایش میزان واکنش می‌باشد و علت آن هم قدرت خوردگی سیلیس توسط اسید فلوئوریدریک می‌باشد. غلظت معمول مورد استفاده مخلوط HCl:HF، ۱۲:۳ است که حدود یک گالن از این نسبت، ۰/۲۱۷ پوند از ماسه سنگ را در خود حل می‌کند (یاوری، ۱۳۸۳).

۳-۵-۵ واکنش‌های اسیدها با سازندهای کربناته

معمول‌ترین مواد کربناته، کلسیت و دولومیت هستند. وقتی که سنگ‌های آهکی و دولومیتی اسیدزنی می‌شوند، اسید به دورن روزنه‌های ماتریس سنگ یا ترک خوردگی‌های القا شده و یا طبیعی وارد می‌شود. معمولاً نوع اسیدزنی به سرعت تزریق و تعداد و اندازه ترک‌ها بستگی دارد. سازندهای شکافدار، اسید را سریع‌تر و در فشارهای پایین‌تر قبول می‌کنند (آقایی، ۱۳۹۱). در ادامه به فرآیند شیمیایی رخ داده حین عملیات اسیدزنی پرداخته می‌شود.

1-Mud acid

۳-۵-۱ استوکیومتری واکنش کربناته - اسید

استوکیومتری، به نسبت‌های مقادیر واکنش‌دهنده‌های مختلف که در واکنش شرکت می‌کنند گفته می‌شود. در حالیکه استوکیومتری واکنش اسید کلریدریک با کانی‌های کربنات کلسیم و دولومیت کاملاً مشخص است. اما در سازندهای کربناته به دلیل حضور کانی‌های دیگر واکنش‌دهنده با اسید کلریدریک (علاوه بر کربنات کلسیم و دولومیت)، واکنش‌ها پیچیده می‌شوند و تعیین استوکیومتری واکنش‌های اسید با سازند به سهولت تعیین استوکیومتری واکنش‌های اسید با یک کانی خاص نیست (عسکری و معصومیان، ۱۳۹۱). استوکیومتری، تعادل و نرخ واکنش اسید با سازند سه ویژگی بسیار مهم و وابسته به هم در طراحی عملیات انگیزش می‌باشند و عوامل شیمیایی منحصر به فرد هر اسید به منظور استفاده در عملیات انگیزش خاص باید مد نظر قرار گیرد.

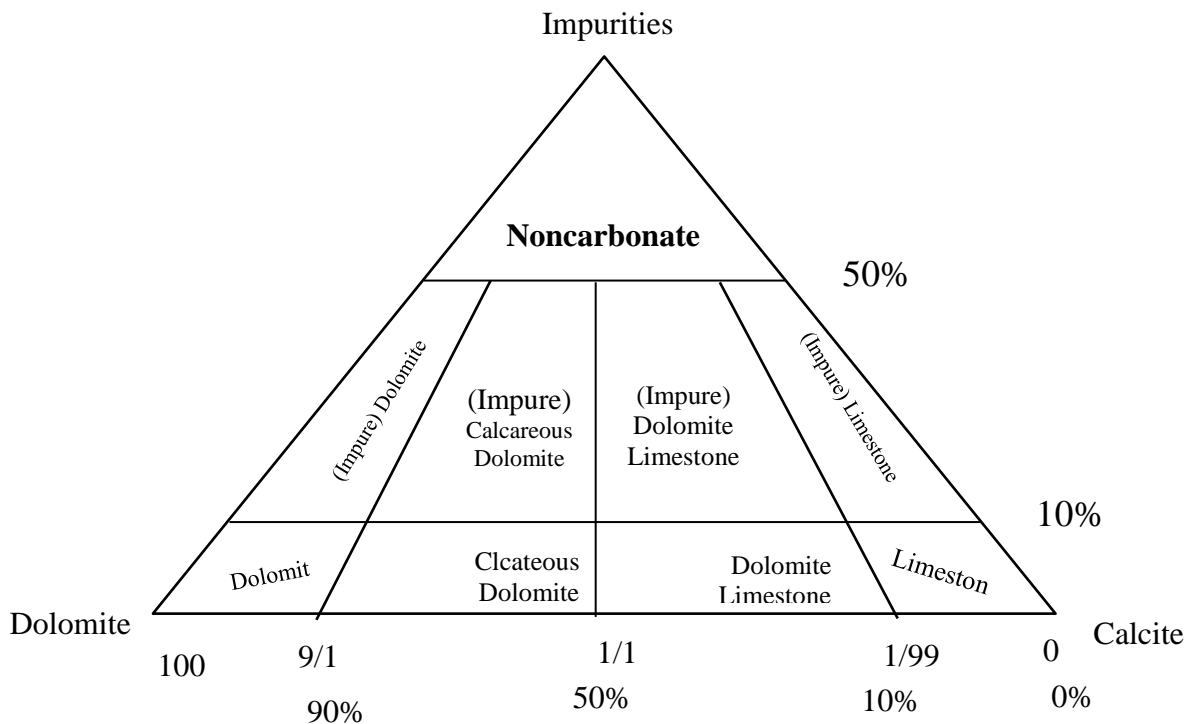
۳-۵-۲ ترکیب شیمیایی سازندهای کربناته

سنگ‌های کربناته، از ته‌نشینی شیمیایی و بیوشیمیایی در محیط‌های رسوبی یا از انتقال ذرات تخریبی تشکیل شده‌اند. سنگ مخزن‌های کربناته‌ای که ناشی از رسوب شیمیایی هستند، معمولاً سنگ آهک‌های کریستالی و دولومیتی می‌باشند. بعضی از سنگ‌های کربناته نسبتاً خالص هستند درحالیکه برخی دیگر حاوی مواد سیلیسی نیز می‌باشند. این ترکیبات سیلیس‌دار می‌توانند به صورت چرت‌های^۱ رسوبی، فسیل‌های سیلیسی، ذرات تخریبی کوارتز یا چرت یا مواد شیلی باشند. با افزایش درصد اجزاء سیلیسی سنگ‌های کربناته، آنها را در کلاس‌های دولومیت^۲ یا سنگ آهک ماسه‌ای، چرتی یا شیلی طبقه‌بندی می‌کنند.

سنگ‌های کربناته‌ای که در طی رسوب شیمیایی اولیه ایجاد می‌شوند معمولاً کربنات کلسیم (CaCO_3) خالص یا دولومیت تقریباً خالص هستند، اما اغلب این دو نوع کانی، در سازندهای کربناته با هم آمیخته‌اند. سنگ‌های دولومیتی و کلسیتی می‌توانند به صورت لایه‌های متوالی باشند. در این حالت به

1-Chert
2-CaMg(CO₃)

سنگ شکل گرفته، سنگ آهک دولومیتی گفته می‌شود. به طریق مشابه اگر سنگ حاوی بیش از ۵۰٪ دولومیت باشد به آن دولومیت آهکی گفته می‌شود. در حالت کلی رابطه بین ترکیب سنگ و دسته‌بندی آن در شکل ۳-۷ نشان داده شده است (عسکری و معصومیان، ۱۳۹۱).

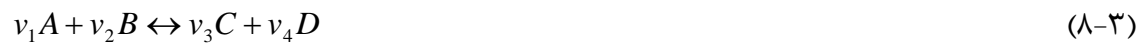


شکل ۳-۷. گراف ترکیبی نشان دهنده درصد ترکیب سنگ‌های کربناته (عسکری و معصومیان، ۱۳۹۱).

۳-۵-۳ تعادل در واکنش اسیدها با سازندهای کربناته

علاوه بر مفاهیمی چون استوکیومتری واکنش و نرخ واکنش، مفهوم تعادل نیز در واکنش اسیدها با سازندهای مهم می‌باشد. وقتی که واکنش اسید با کانی‌های سازنده تعادل می‌رسد، حل شدن کانی‌های سازنده بوسیله‌ی اسید متوقف می‌شود در حالیکه هنوز ممکن است مولکول‌های اسیدی موجود باشند. تعادل، زمانی حاصل می‌شود که فعالیت شیمیایی محصولات واکنش (فعالیت شیمیایی عامل تغییر است) با فعالیت شیمیایی واکنش‌دهنده‌ها در توازن باشد (Gdanski, 1994).

در حالت تعادل، نسبت حاصل ضرب فعالیت شیمیایی محصولات به واکنش دهنده‌ها هنگامی که فعالیت شیمیایی هر جز به توان ضریب استوکیومتری آن رسیده باشد عدد ثابتی است که ثابت تعادل خوانده می‌شود. واکنش ۳-۸ را می‌توان به عنوان مثال در نظر گرفت:



ثابت تعادل برای این واکنش به صورت رابطه ۳-۹ تعریف می‌شود:

$$K_{rxn} = \frac{a_C^{v_3} a_D^{v_4}}{a_A^{v_1} a_B^{v_2}} \quad (۹-۳)$$

کمیت a_i فعالیت جزء i در محلول واکنش می‌باشد. این پارامترها (فعالیت شیمیایی) پتانسیل‌های ترمودینامیکی هستند و به آسانی قابل پیش‌بینی نمی‌باشند. بنابراین داشتن داده‌های تجربی برای بدست آوردن مقادیر دقیق آن‌ها ضروری می‌باشند.

فعالیت یک ماده با افزایش غلظت آن در محلول افزایش می‌یابد، اما رابطه بین فعالیت شیمیایی و غلظت به طور کلی خطی نیست. این رابطه اغلب با تعریف یک ثابت تناسب بین فعالیت شیمیایی و غلظت بیان می‌شود که ضریب فعالیت^۱ نام دارد. مطابق رابطه ۳-۱۰ نشان داده می‌شود.

$$a_i = \lambda_i C_i \quad (۱۰-۳)$$

برای مثال داده‌های ضریب فعالیت برای محلول اسیدکلریدریک در غلظت‌های مختلف در جدول زیر آمده است (Gdanski, 1994).

جدول ۳-۲. ضریب فعالیت اسیدکلریدریک (Gdanski, 1994).

لیتر/ مول غلظت	ضریب فعالیت
۰/۱	۰/۸۰
۰/۵	۰/۷۶
۱/۰	۰/۸۱
۲/۰	۱/۴۱
۴/۰	۱/۹۶
۶/۰	۴/۱۹

۳-۶ حجم اسید و دبی تزریق

برای تعیین حجم اسید و برنامه زمانی دبی تزریق در اسیدزنی کربناته‌ها، باید حداکثر حجم مورد نیاز را بر اساس یک مدل از فرآیند اسیدزنی تعیین نمود و سپس دبی تزریقی و حجمی که به طور واقعی پمپ می‌شود را بر اساس کنترل درجای عملیات اسیدزنی تنظیم کرد. حجم اسید با یک مدلی از انتشار حفره گرمی شکل (مدل داکورد یا مدل حجمی) برای عمق نفوذ معینی از حفرات گرمی شکل محاسبه می‌شود.

مدل‌های اخیر در رابطه با انتشار حفره گرمی شکل، پیش بینی می‌کنند که سرعت تشکیل حفره با دبی تزریق به توان $1/2$ تا 1 افزایش می‌یابد؛ بنابراین برای سریع‌ترین انتشار حفرات گرمی شکل تا فاصله معینی، حداکثر دبی تزریقی ترجیح داده می‌شود. همچنین اگر حجم اسید محدود باشد، ممکن است دبی تزریق پایین‌تر مناسب باشد. به طور کلی اگر حجم اسید کافی در دسترس و اسید کلریدریک مصرفی از لحاظ اقتصادی خیلی هزینه بر نباشد، در آن صورت حداکثر دبی برای سازندهای آهکی پیشنهاد می‌شود.

در دولومیت‌ها، دبی تزریقی کمتر ترجیح داده می‌شود. هنگامی که دبی تزریق کاهش می‌یابد، دمای اسیدی که به سازند وارد می‌شود، افزایش می‌یابد و به موجب آن سرعت واکنش افزایش می‌یابد. در دمای بالا، واکنش اسید کلریدریک با دولومیت باعث گسترش سریع‌تر حفره گرمی شکل می‌شود. بنابراین در دماهای بالاتر دولومیت همانند آهک عمل می‌کند (Ghommen et al. 2014).

۳-۷ لایه شکافی اسیدی

ایجاد شکاف با اسید یک روش انگیزش می‌باشد که در آن اسید در فشار بالاتر از فشار گسیختگی سازند تزریق می‌شود، بطوریکه یک شکافت هیدرولیکی ایجاد می‌شود. معمولاً یک سیال پد ویسکوز قبل از اسید تزریق می‌شود تا شکاف را آغاز نماید. سپس اسید ساده، اسید ژله‌ای، اسید فومی یا یک امولسیون حاوی اسید تزریق می‌شود. بدین صورت اسید به طور غیریکنواخت با دیواره‌های شکاف

واکنش می‌دهد بطوریکه بعد از بسته شدن، شکاف خود را بازنگه می‌دارد. نواحی نسبتاً حل نشده به عنوان پایه عمل می‌کنند و نواحی حل شده را بصورت یک کانال باز نگه می‌دارند، بنابراین ایجاد شکاف با اسید یک روش جایگزین در استفاده پروپانت‌ها در ایجاد رسانایی شکاف بعد از بسته شدن می‌باشد.

مسائل اصلی که باید در طراحی یک عملیات ایجاد شکاف با اسید معلوم شوند، عبارتند از: عمق نفوذ اسید در شکاف، رسانایی ایجاد شده به وسیله اسید و بهره‌دهی چاه پس از ایجاد شکاف با اسید (Halliburton, 2005)

۳-۸ نفوذ اسید در شکاف‌ها

برای پیش‌بینی و توزیع نهایی رسانایی شکاف به وسیله اسید، درک توزیع انحلال سنگ در شکاف لازم است. این به نوبه خود نیاز به پیش‌بینی غلظت اسید در شکاف دارد. توزیع اسید در شکاف از معادله موازنه اسید و اعمال شرایط مرزی مناسب به دست می‌آید. در جریان خطی همراه با هرزروی سیال و نفوذ اسید به دیواره‌های شکاف شکل ۳-۸ داریم که:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u_x C)}{\partial x} + \frac{\partial(u_y C)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial C}{\partial y} \right) = 0$$

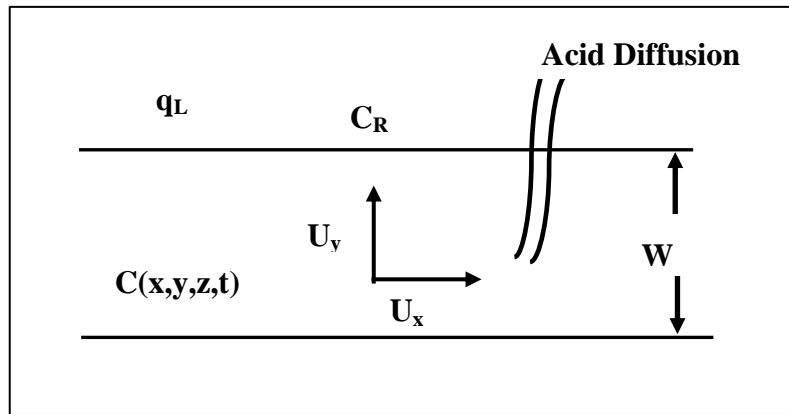
$$C(x, y, t = 0) = 0$$

$$C(x = 0, y, t) = C_i(t) \quad (3-11)$$

$$C u_y - C_L q_L - D_{ef} f \frac{\partial C}{\partial y} = E_f C^n (1 - \phi)$$

که C غلظت اسید، u_x شار شکاف، u_y شار عرضی به علت هرزروی سیال، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر، C_i غلظت تزریقی، E_f ثابت سرعت واکنش، n مرتبه واکنش و ϕ تخلخل می‌باشد. برای حل معادله ۳-۱۱ معادلات پیوستگی و جابه‌جایی و همچنین یک مدلی از رفتار هرزروی سیال لازم است. راه‌حل‌های عددی پیچیده این معادلات که پیچیدگی‌های بیشتری مانند توزیع دما در شکاف، اثر اسید در

هرزروی سیال و هندسه گوناگون شکاف را در نظر می‌گیرند، به وسیله بن-ناسیور و همکاران (۱۹۸۸)، لو و همکاران (۱۹۸۹) و ستاری (۱۹۹۱) ارائه شده‌اند
(Ben-Naceur et al. 1988, Lo et al. 1989, Satari, 1991).



شکل ۳-۸. انتقال اسید در شکافی با نفوذ و هرزروی سیال (بن-ناسیور و همکاران، ۱۹۸۸).

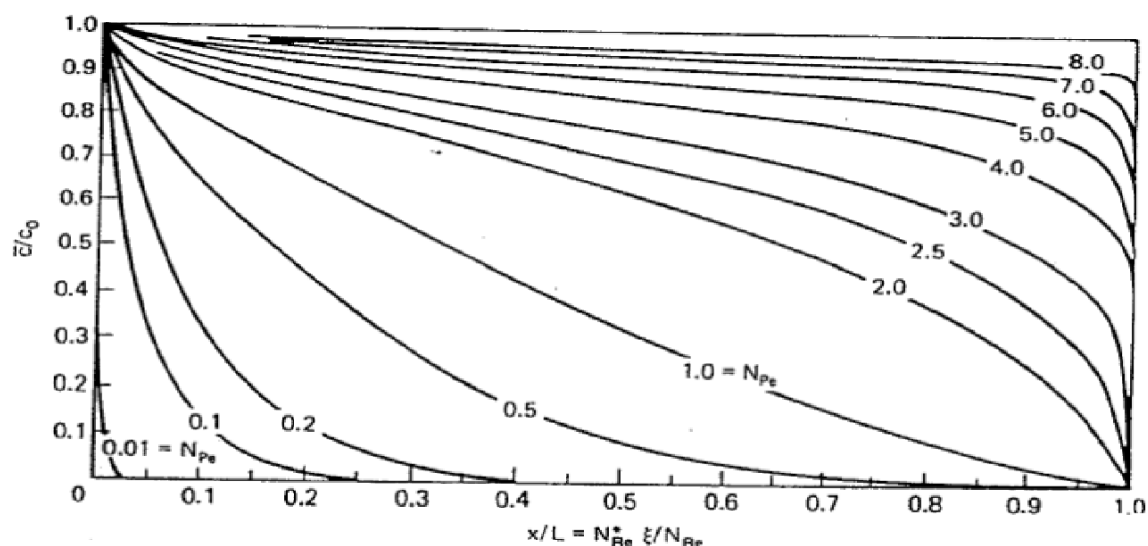
با فرض جریان حالت پایدار و آرام یک سیال نیوتنی بین صفحه‌های موازی با نرخ هرزروی سیال ثابت در شکاف، نیورود و ویلیامز^۱ (۱۹۷۲) راه حلی را برای معادله موازنه اسید برای جریان در شکاف ارائه کردند که براساس راه‌حل ارائه شده به وسیله تریل (۱۹۶۵) برای انتقال حرارت بین صفحات موازی است. این راه حل برای منحنی غلظت که در شکل ۳-۹ تابعی از عدد هرزروی سیال پکلت^۲ می‌باشد - و به صورت رابطه ۳-۱۲ تعریف می‌شود-، نشان داده شده است
(Nierode and Williams, 1972, Terrill, 1965).

$$N_{Pe} = \frac{\bar{u}_y w}{2D_{eff}} \quad (12-3)$$

که \bar{U}_y جریان عرضی متوسط به علت هرزروی سیال و w پهنای شکاف می‌باشد. به طور کلی ضریب نفوذ مؤثر (D_{eff}) به علت مخلوط شدن‌های اضافی ناشی از گرادیان چگالی بزرگتر از ضریب نفوذ

1-Nierode and Williams
2-Peclet

مولکولی می‌باشد. ضرایب نفوذ مؤثر بوسیله‌ی روبرتز و گوین^۱ (۱۹۷۴) بر اساس عدد رینولدز شکاف بیان شده است (Roberts and Guin, 1974).



شکل ۳-۹. منحنی‌های میانگین غلظت اسید در یک شکاف (شتچر، ۱۹۹۲).

از شکل ۳-۹ مشخص می‌شود که در اعداد پکلت پایین، غلظت اسید قبل از رسیدن به آخر شکاف خیلی کم می‌شود، در اعداد پکلت بالا، غلظت‌های بالای اسید در آخر شکاف به دست می‌آیند. در مقادیر پکلت پایین، نفوذ، غلظت اسید را کنترل می‌کند، ولی در مقادیر پکلت بالا هرزروی سیال عامل کنترل‌کننده می‌باشد. برای تکمیل پیش بینی نفوذ اسید، یک مدلی از انتشار شکاف لازم است. همانطور که فاصله واقعی انتشار اسید به طول شکاف بستگی دارد.

۳-۹ جمع بندی

در اسیدزنی ماتریسی مخازن کربناته هدف، گذرکردن از آسیب می‌باشد. بدین منظور از اسیدکلریدریک استفاده می‌کنند؛ که با توجه به جنس و خصوصیات سنگ مخزن غلظت‌های متفاوتی از اسیدکلریدریک مورد استفاده قرار داده می‌شود. از مهم‌ترین مزیت‌های استفاده از اسیدکلریدریک می‌توان به دسترسی آسان، میزان هزینه پایین در تهیه آن از لحاظ اقتصادی و همچنین واکنش‌پذیری بالایی که با سازندهای کربناته دارد، اشاره نمود. همچنین با توجه به هدف منظور، جهت افزایش تراوایی سازند در نزدیکی چاه می‌توان طی یک برنامه‌ریزی مناسب و طراحی یک برنامه دقیق تزریق، به حد مطلوب در میزان اسید مورد نیاز دست یافت.

فصل چهارم: تأثیر اسید زنی بر خصوصیات سنگ های کربناته به همراه معادلات حاکم

۴-۱ مقدمه

در صنعت نفت، اسیدزنی کاربرد منحصر بفردی داشته و یک تکنیک کاملاً مؤثر و قوی می‌باشد (Nevito Gomez, 2006). استفاده از روش‌های بهینه در اسیدزنی چاه‌ها، افزایش بهره‌دهی چاه‌های نفت و گاز را به دنبال خواهد داشت. عملیات اسیدزنی جهت افزایش نفوذپذیری سنگ مخزن، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این امر منجر به انحلال سنگ مخزن و یا انحلال در ذراتی که باعث انسداد خلل و فرج آن شده‌اند، می‌شود.

آنچه می‌بایست مورد توجه قرار گیرد آن است که حضور مواد شیمیایی خورنده در محیط سنگی موجب دگرگونی کلیه پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ مخزن می‌شود. ظرفیت باربری^۱ چاه‌های نفت (به منظور محاسبات پایداری و وزن گل حفاری)، نیروی لازم برای ایجاد شکست (به منظور شکست هیدرولیکی) و نفوذپذیری مخزن (به منظور اقتصادی بودن عملیات) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند که با اعمال مواد شیمیایی خورنده این خواص دستخوش تغییر می‌گردند. پارامترهای مؤثر در نتیجه‌ی عملیات اسیدزنی فوق‌العاده پیچیده و در ارتباط نزدیک با هم هستند. یکی از بزرگترین مشکلات در طراحی عملیات اسیدزنی تعیین میزان این پارامترهاست که عموماً با خطاهای فاحشی نسبت به مقدار واقعی آنها انجام می‌گیرد. فرآیند اسیدزنی چاه نفت یک فرآیند توأمان می‌باشد. چرا که در این فرآیند فرآیندهای مکانیکی، هیدرولیکی و شیمیایی در ارتباط با یکدیگرند.

با معلوم شدن اثرگذاری واکنش‌های ژئوشیمیایی بر مواد سنگی و استفاده‌ی روزافزون از مواد شیمیایی در صنعت، اهمیت مطالعه‌ی فرآیندهای شیمیایی- مکانیکی هرچه بیشتر احساس می‌شود. از طرف دیگر، اطلاعات موجود در رابطه با ماهیت کامل بین اثرات شیمیایی و مکانیکی نیز اندک هستند (Daccord, 1987). علی‌رغم مطالعات وسیعی که در حوزه‌ی مهندسی شیمی در مورد اسیدهای

1-Bearing Capacity

مورد استفاده افزودنی‌ها، فشار تزریق، دبی و غلظت اسید و روش‌های مختلف آن صورت گرفته است. در حالیکه بررسی محدودی در مورد تأثیرات فرسایش شیمیایی بر خصوصیات سنگ‌ها انجام شده است (Williams et al. 1979). مطالعات نشان می‌دهند که واکنش‌های شیمیایی می‌توانند به صورت چشمگیری ساختارهای مواد سنگی را تخریب کرده و باعث انحلال سطوح تماس و افزایش تخلخل شود که این مهم می‌تواند منجر به کاهش خصوصیات مکانیکی مثل مدول الاستیکی و مقاومت شکست شود.

رایج شدن فرآیندهای ازدیاد برداشت چاه، از طریق عملیات‌هایی چون اسیدزنی، شکافت هیدرولیکی، شکافدهی با اسید و تحریک گرمایی، حضور پارامترهای مکانیک سنگ شکست (نیروی لازم برای شکست، چقرمگی^۱ و الگوی گسترش ترک) در محاسبات مربوطه را بیان می‌کند. این موضوع بخصوص در چاه‌هایی که بعد از چند دوره اسیدزنی رأی به شکافت هیدرولیکی یا شکافدهی با اسید آنها داده می‌شود، حائز اهمیت است. در ادامه عوامل مؤثر در عملیات اسیدزنی و همچنین معادلات مربوط به آن تشریح می‌شود.

۲-۴ فاکتورهای مؤثر در عملیات اسیدزنی

تا به حال راجع به انواع روش‌های اسیدزنی و نمونه اسیدهای مصرفی اشاره‌ای گردید. در عین حال جهت اسیدزنی، عوامل دیگری نیز دخالت دارند که لازم است به آن‌ها اشاره شود. در ادامه به اختصار این عوامل تشریح شدند.

۱-۲-۴ فشار

جهت بررسی این فاکتور، مجدداً واکنش اسیدکلریک و سنگ کربنات کلسیم را در نظر گرفته می‌شود.



1 - Toughness

نتیجه واکنش آب، گاز کربنیک و یک نمک محلول خواهد بود. محدودیت این فعل و انفعال در نحوه تماس یون‌های آزاد شده هیدروژن با سطح سنگ است. اگر مجموعه فوق به حال سکون باقی بماند، انجام واکنش پس از مدتی باعث رکورد آن خواهد شد. آزمایش‌های عملی نشان داده است که سرعت فعل و انفعال در اتمسفر در مقایسه با مقدار مربوط به تئوری تجزیه مولکول‌ها تا حدود ۲۰ برابر افزایش خواهد یافت. به این دلیل که در فشار اتمسفر، حرکت گاز کربن دی‌اکسید و خروج آن از محیط، باعث به حرکت درآمدن مجموعه باقیمانده شده و حالت سکون را از بین می‌برد و تماس یون‌های هیدروژن با سنگ آهک را ساده‌تر می‌کند؛ بنابراین می‌توان گفت که هر چه فشار بر مجموعه کمتر باشد، شدت فعل و انفعال بیشتر خواهد بود (عادل‌زاده، ۱۳۹۳).

۴-۲-۲ غلظت اسید

انجام آزمایش‌های عملی و همچنین تئوری‌های جدید، وجود رابطه ۴-۲ را در مورد اثر اسید کلریدریک بر سنگ آهک، اثبات کرده‌اند.

$$r_H = -K(\gamma C)^{0.2} \quad (2-4)$$

که در آن،

$$r_H = \text{شدت فعل و انفعال (mol/cm}^2\text{/sec) H}$$

$$\gamma = \text{ضریب فعالیت HCl}^1$$

$$C = \text{غلظت اسید (mol/L)}$$

$$\gamma C = \text{قدرت اسید}^2$$

$$K = \text{ضریب شدت فعل و انفعال}^3$$

1-Activity Coefficient
2- Acid strength
3- Reaction Rate Coefficient

این فرمول نشان می‌دهد که بر خلاف تصوره‌های قبلی، اثر اسید در فعل و انفعال، رابطه چندان مستقیمی با افزایش غلظت ندارد (عسکری و معصومیان، ۱۳۹۱) همچنین در جدول ۴-۱ اثر نوع، غلظت اسید مصرفی و مدت زمان انجام واکنش در سازندهای کربناته بررسی شده است.

جدول ۴-۱. مقایسه اسیدزنی کربنات‌ها (George and Robert, 1972).

نوع و غلظت اسید	CaCO ₃ ترکیب شده به وسیله ۱۰۰۰ گالن اسید (lb)	زمان نسبی واکنش (دقیقه)
۷/۵ HCl	۸۹۰	۰/۷
۱۵ HCl	۱۸۴۰	۱
۲۸ HCl	۳۶۷۰	۶
۳۶ HCl	۴۸۶۰	۱۲
۱۰ Formic	۹۱۰	۵
۱۰ Acetic	۷۱۰	۱۲
۱۵ Acetic	۱۰۶۵	۱۸
۱۴ HCl-۷/۵ Formic	۲۴۲۰	۶
۱۴ HCl - ۱۰ Acetic	۲۳۸۰	۱۲
۱۴ Acetic - ۸ Formic	۱۷۰۰	۱۸

در جدول ۴-۱ زمان نسبی واکنش، بیانگر قدرت واکنش اسید نسبت به مدت واکنش اسید کلریدریک با غلظت ۱۵٪ می‌باشد.

۴-۲-۳ دما

در فرمول ۴-۲، ضریب شدت فعل و انفعال (k) در دمای ۷۵ درجه فارنهایت به میزان $10^{-6} \times 7$ محاسبه گردیده است. آزمایشات نشان داده است که هرچه درجه حرارت بیشتر شود، مقدار ضریب فوق نیز افزایش می‌یابد. این افزایش تا دمای خاصی ادامه داشته و بعد از آن ثابت می‌ماند. در مورد واکنش اسید کلریدریک با سنگ آهک، این مقدار در دمای ۱۵۰ درجه فارنهایت رخ می‌دهد. بنابراین با افزایش درجه حرارت، شدت فعل و انفعال بیشتر می‌گردد و فقط محدودیت در حرکت و خروج گاز است که عامل‌های دیگر مانند فشار در آن مؤثر است.

۴-۲-۴ نوع اسید

همانطور که از رابطه ۳-۴ مشخص است، نوع اسید و قدرت آن بستگی به قابلیت جداسدن هیدروژن اسیدی (H^+) آن دارد.



غلظت تعادلی^۱ مجموعه، مطابق با رابطه ۴-۴ تعریف می‌شود:

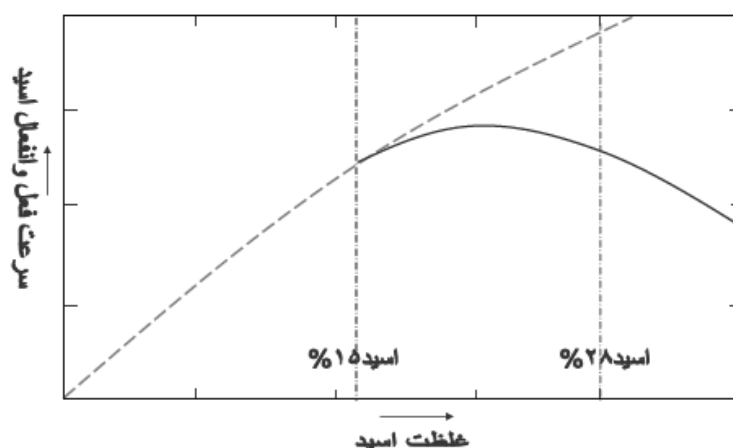
$$K_{HA} = \frac{[H^+][A^-]}{[HA]} \quad (۴-۴)$$

در بالا K_{HA} ضریب تعادل مجموعه اسید است که اصطلاحاً آن را مقدار ثابت تجزیه (تفکیک) اسید نیز گویند. در رابطه بالا، هرچه یون هیدروژن آزاد شده بیشتر باشد، مقدار K_{HA} افزایش خواهد یافت. بنابراین اسید قوی‌تر است. با توجه به مطالب فوق، اگر مقدار ثابت تجزیه زیاد باشد، به عنوان اسید قوی و بالعکس در صورتی که این مقدار کم باشد به عنوان اسید ضعیف معرفی می‌گردند. در جدول ۴-۲، درک بهتر موضوع و مقایسه قدرت اسیدها نشان داده شده است. همچنین در شکل ۴-۱، رابطه بین غلظت اسید و سرعت واکنش ملاحظه می‌گردد.

جدول ۴-۲. اسیدهای متداول جهت کاربرد سنگ آهک (توفیقی، ۱۳۷۱).

تعریف اسید	مقدار ثابت تجزیه اسید	وزن ملکولی	نوع اسید
اسید قوی	بزرگتر از 10^7	۳۶/۴۷	اسید کلریدریک HCl
اسید ضعیف	10^{-3} تا 10^{-4}	۹۴/۵	اسید کلرواستیک CH ₂ Cl-COOH
اسید ضعیف	10^{-4} تا 10^{-5}	۴۶/۰۳	اسید فرمیک H-COOH
اسید ضعیف	10^{-5} تا 10^{-6}	۶۰/۰۵	اسیداستیک CH ₃ -COOH
اسید ضعیف	10^{-5} تا 10^{-6}	۷۴/۰۸	اسید پروپیونیک CH ₃ -CH ₂ -COOH

1- Equilibrium Concentration



شکل ۴-۱. سرعت فعل و انفعالات اسید بر حسب غلظت اسید (توفیقی، ۱۳۷۱).

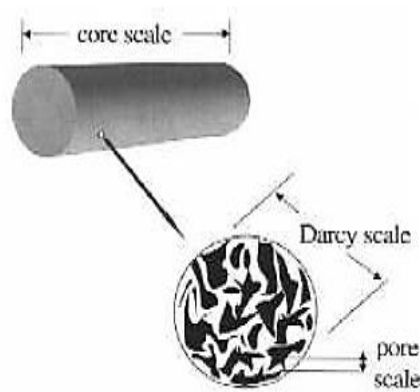
۴-۲-۵ تخلخل

یکی از عوامل مؤثر بر خصوصیات ژئومکانیکی هر سازند میزان فضای متخلخل و همچنین عوامل خارجی اثر گذار بر آن می‌باشد. از آنجائیکه عملیات شکافدهی با اسید در سازندهای کم تراوا اجرا می‌گردد، تأثیر تخلخل بر مقاومت نهایی سنگ را می‌بایست در نسبت تأثیر نفوذ سیال به سازند ارجحیت داد. چرا که چنین خصوصیتی که مستقیماً به ویژگی‌های ذاتی و بافت سنگ باز می‌گردد و اساس طراحی فرآیندهای انگیزشی چاه می‌باشد. در حقیقت با افزایش میزان تخلخل، مقاومت نهایی سنگ در برابر فشار خارجی اعمال شده کاهش بیشتری خواهد یافت. تخلخل ممکن است با استفاده از نگارهای مختلف مانند چگالی، مقاومت، نوترون و نمودارهای چگالی-نوترون اندازه‌گیری شود (عسکری و معصومیان، ۱۳۹۱)

۴-۲-۶ تراوایی

تغییرات تراوایی سنگ مخزن اعم از شکاف و ماتریس در بررسی تاریخچه تولید مخزن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هرچه ارتباط منافذ بیشتر قابلیت نفوذپذیری بیشتر است. هرچه تراوایی مغزه کمتر باشد فشار در ابتدای نمونه افزایش یافته و مدت زمان زیادی طول می‌کشد تا شکاف اتفاق بیافتد. بنابراین پس از اسیدزنی، محیط به حالت ناهمگن و ناهمسانگرد مبدل می‌گردد.

در مخازن نفت و گاز هم، قانون داری از معادلات اساسی است. اصول حرکت نفت و گاز در مخازن، بر پایه همین قانون استوار است. اساس قانون داری، یک آزمایش ساده است که در قرن نوزدهم توسط وی انجام گرفت و نتایج آن، به صورت یک مقاله، در سال ۱۸۶۵ منتشر و بعدها به قانون داری معروف شد. آزمایش داری، در حقیقت مطالعه‌ی حرکت سیالات در محیط‌های متخلخل است. برای توصیف فرآیندی که طی تماس اسید با محیط متخلخل رخ می‌دهد، از تقریب مقیاس داری استفاده شده است تا با ترکیب آن، بتوان فرآیندهایی را که در دو مقیاس داری و منفذ مطابق شکل ۲-۴ رخ می‌دهد را توصیف نمود. از طرفی اطلاعات مربوط به تراوایی سازند نیز جمع‌آوری می‌شود و می‌توان از رابطه داری ۴-۵ و با در نظر گرفتن فرضیات حاکم بر آن، برای محاسبه تراوایی استفاده نمود (Panga et al. 2005).



شکل ۲-۴. شماتیک مقیاس‌های مختلف در محیط متخلخل (Panga et al. 2005).

$$Q.L.\mu_w = K.A.\Delta P \quad (۵-۴)$$

در این رابطه، L طول نمونه A ، مساحت سطح مقطع (ft^2) ، μ_w گرانیروی (cp) ، Q (bbl/Day) میزان دبی تزریق شده، Δp افت فشار (psi) و K تراوایی (md) می‌باشد. در ادامه فرضیات حاکم بر رابطه داری بررسی شده است.

الف) محیط متخلخل از نظر خواص سنگ مخزن مانند نفوذپذیری و درجه‌ی تخلخل، به طور کامل همگن فرض می‌شود که کل سیستم، به طور یکنواخت دارای این مقدار متوسط از خواص مورد نظر است.

ب) سراسر محیط متخلخل، هم دما فرض می‌شود. این فرض، برای بیش‌تر مخازن نفتی، صادق است.

ج) محیط متخلخلی که سیال در آن، جریان دارد، به صورت افقی در نظر گرفته می‌شود. البته، این قانون به سطوح شیب‌دار نیز تعمیم یافته است.

د) سیال، تراکم ناپذیر فرض می‌شود.

ه) جریان سیال، به صورت پایدار و آرام در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲-۷ روابط حاکم بر عملیات اسیدزنی

معیار مهم در انتخاب سیال برای اسیدزنی سرعت واکنش می‌باشد. عوامل بسیاری بر سرعت واکنش، مانند: فشار، دما، سرعت تزریق، غلظت اسید، ترکیب سازند، محصولات واکنش و نسبت سطح به حجم سنگ مخزن اثر می‌گذارند. در طراحی یک فرآیند اسیدزنی ماتریس، ابتدا باید حجم اسید تزریقی تعیین گردد. فاکتور مهم در این رابطه وضع خلل و فرج موجود در سنگ است. بنابراین حجم اسید با توجه به تخلخل موجود و در نظر گرفتن میزان آسیب سازند در حین حفاری و یا تولید مشخص می‌گردد. در رابطه ۴-۶ ملاحظه می‌شود:

$$VHCl = \frac{7.48\pi \times (1 - \phi) \times (r_s^2 - r_w^2) \times h}{\beta} \quad (۴-۶)$$

در رابطه ۴-۶ عدد ۷/۴۸ ثابتی برای تبدیل واحد فوت مکعب به گالن می‌باشد. ϕ تخلخل سنگ مخزن، r_s شعاع ناحیه آسیب دیده (ft)، h عمق ناحیه آسیب سازندی (ft)، v حجم اسید (gal) و β قدرت انحلال اسید را نشان می‌دهند.

باید مشخص شود که این حجم اسید با چه دبی و فشاری باید به سازند آسیب دیده تزریق شود. جهت بررسی فشار، می‌بایست ابتدا فعل و انفعال اسیدهای منتخب با سنگ مخزن، معادله واکنش ۴-۱ مدنظر قرار گیرد.

برای آگاهی از فشار شکست، می‌بایست ثابت شکنندگی سازند مشخص باشد. همچنین می‌توان آن را بوسیله‌ی شکافدهی با اسید و یا رابطه تقریبی ۴-۷ بدست آورد.

$$\xi = \alpha + (\lambda - \alpha) \times \frac{P_{ave}}{h} \quad (7-4)$$

ξ ثابت شکنندگی سازند و α مقداری است ثابت بین ۰.۳۳ تا ۰.۵. که بستگی به نوع سنگ مخزن دارد. λ گرادیان فشار لایه‌های فوقانی است که برای عمق‌های کمتر از ۱۰۰۰۰ فوت برابر ۱ (psi/ft) و برای عمق‌های بیشتر برابر ۱ تا ۱/۲ می‌باشد. p_{ave} فشار متوسط مخزن (psi) و h عمق مخزن (ft) می‌باشد. در رابطه ۴-۸ حداکثر فشار تزریق، به نحوی محاسبه می‌شود که هیچ شکستی در سازند ایجاد نشود.

$$P_{max} = (\xi - \xi_a) \times h \quad (8-4)$$

ξ_a گرادیان هیدرواستاتیکی اسید می‌باشد که می‌توان مقدار آن را برابر ۰.۴۳ در نظر گرفت

(Ghommen et, al. 2014)

۴-۲-۸ تعادل شیمیایی

به طور کلی یک واکنش شیمیایی تا وقتی ادامه دارد که مواد موجود یا به وجود آمده در فرآیند به حال تعادل درآیند. در این حالت است که در مورد اثر یک اسید بر نمک، امکان دارد که مقداری از اسید اولیه بدون تأثیر باقی بماند. به طور مثال در واکنش اسید کلریدریک و سنگ آهک، پس از به وجود آمدن آب، دی‌اکسیدکربن و یک محلول، فعل و انفعال به حال تعادل می‌رسد و حتی با وجود داشتن اسید و سنگ آهک در مجموعه، دیگر فعل و انفعال صورت نخواهد گرفت، در همین مورد اگر به نحوی گاز از مجموعه خارج شود، مجدداً دو جسم (اسید و سنگ آهک) با هم ترکیب می‌گردند تا باز هم به حال تعادل درآیند. بدین ترتیب بایستی شرایط طوری فراهم آید که

مدت زمان، برای رسیدن به حال تعادل بیشتر باشد و فرصت مناسبی به اسید داده شود تا فرآیند ادامه پیدا کند (به طور مثال فشار پایین باشد یا درجه حرارت افزایش یابد). بدیهی است این مسأله نیز به قدرت اسید بستگی دارد. بر روی مقادیر مساوی اسیدهای مختلف در فرآیندهای مشابه مطالعه گردیده است و مقدار درصد مصرفی هر اسید، پس از به تعادل رسیدن واکنش محاسبه شده است. غلظت اولیه اسیدها در شروع فعل و انفعال ۳ مول در لیتر بوده است؛ که در مورد بعضی آن‌ها نتایج به قرار جدول ۳-۴ می‌باشد.

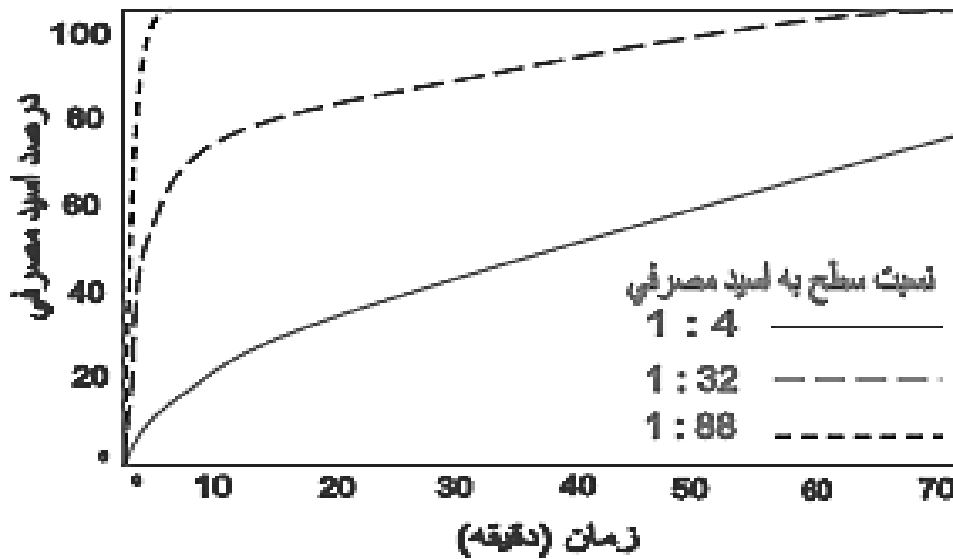
جدول ۳-۴. درصد اسید مصرفی بعد از رسیدن به تعادل شیمیایی برای ۴ نمونه اسید (توفیقی، ۱۳۷۱).

درصد اسید مصرفی بعد از رسیدن به تعادل شیمیایی	نوع اسید
۹۹/۵	کلریدریک
۸۴/۵	فرمیک
۴۶/۰	استیک
۳۱/۰	پروپیونیک

۴-۲-۹ نسبت سطح تماس سنگ مخزن به حجم اسید مصرفی

در اکثر مطالعات انجام شده، موضوع نسبت سطح تماس سنگ مخزن به حجم اسیدی که در نظر گرفته می‌شود از عوامل بسیار مهم به شمار آمده است. بدیهی است که عوامل دیگری نظیر فشار و درجه حرارت و غیره نیز در انجام واکنش دخالت دارد. لیکن این امر ثابت شده است که هرچه نسبت سطح تماس به حجم اسید مصرفی بالاتر باشد، انجام واکنش، سریع‌تر و راحت‌تر خواهد بود. برای تفهیم بیشتر شکل ۳-۴ و توضیحاتی جانبی در جدول ۴-۴ آورده شده است.

منحنی مصرف اسید نسبت به زمان
برای اسید ۱۵٪ و سنگ آهک



شکل ۴-۳. اسید مصرفی بر حسب گذشت زمان (توفیقی، ۱۳۷۱).

جدول ۴-۴. مشخصات نمونه‌های مورد استفاده جهت انجام آزمایش (توفیقی، ۱۳۷۱).

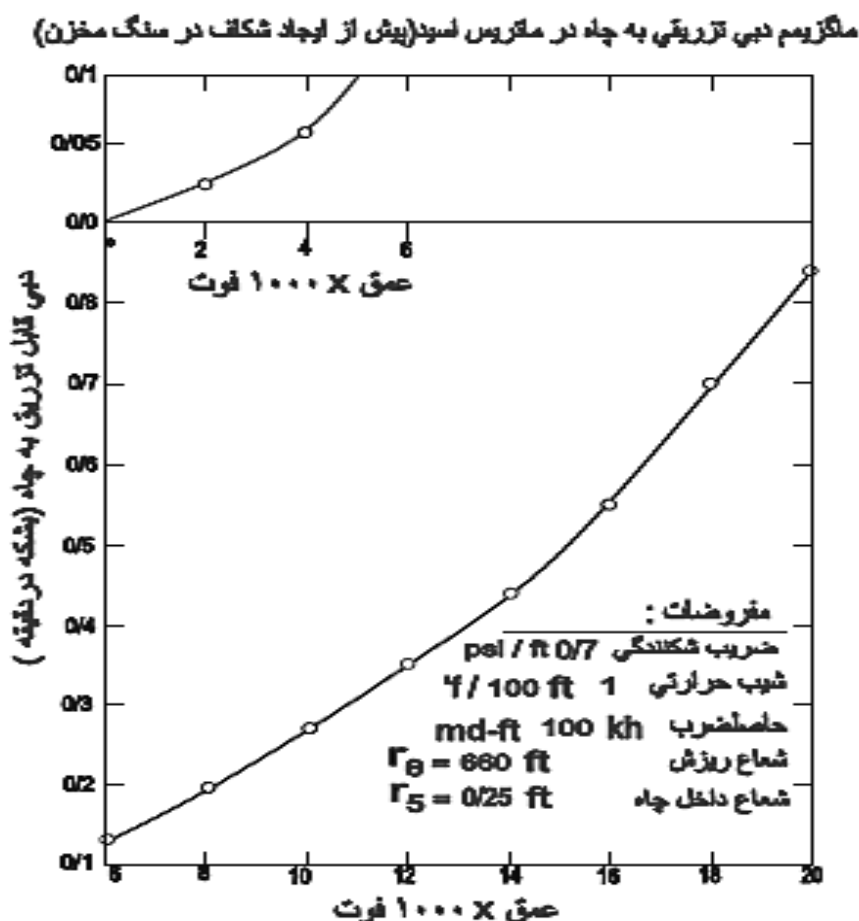
نمونه‌ای از نسبت سطح به حجم اسید مصرفی	
نسبت سطح به حجم	شرایط
۱/۲۸۰۰۰	ماتریس
٪۱۰	تخلخل
۱۰ md	نفوذپذیری
۰/۰۰۱ اینچ ۱/۳۲۰۰	ابعاد شکاف
۰/۱۰ اینچ ۱/۳۲	
۰/۲۵ اینچ ۱/۱۳	

۴-۲-۱۰ خصوصیات سنگ مخزن

هرگاه اسید به داخل سنگ مخزن تزریق گردد، به طور یقین قسمت‌هایی را در خود حل می‌کند که با آنها در تماس قرارگیرد. آزمایشات متعدد نشان داده است که اثر اسید بر سنگ مخزن به صورت یکنواخت نیست. این بدان علت است که تمامی قسمت‌های سنگ مخزن دارای خواص یکسان نیستند. بدیهی است در یک مسیر که خلل و فرج موجود در سنگ مخزن بهتر به یکدیگر مرتبط

باشد، اسید راحت‌تر از آن مسیر عبور کرده است. به طور خلاصه، نوع و جنس مخزن، خلل و فرج موجود، درزه و شکاف و تراکم آن در عملیات اسیدزنی، تأثیر مهمی دارند. در شکل ۴-۴ تغییرات حداکثر دبی تزریق به چاه در نوع اسیدزنی ماتریس نشان داده شده است (عسکری و معصومی، ۱۳۹۱).

از طرفی برای تعیین ساختار و درصد کانی‌شناسی نمونه‌های آزمایشگاهی می‌توان از تحلیل XRD^۱ استفاده نمود. تحلیل XRD یا پراش پرتو ایکس، روشی برای تعیین فازها و ساختار کریستالی مواد است. از این روش برای مطالعات و شناسایی فازها، کانی‌شناسی و کریستالوگرافی استفاده می‌شود. در واقع این تحلیل می‌تواند، مقدار درصد هر عنصر از یک ماده را تعیین کند.



شکل ۴-۴. دبی قابل تزریق به چاه بر حسب عمق (توفیقی، ۱۳۷۱).

۳-۴ جمع بندی

در این فصل در مورد عوامل مؤثر بر عملیات اسیدزنی و تأثیر آنها بر روند و تغییر اسیدزنی بحث شده است. قبل از طراحی عملیات اسیدزنی، که شامل انتخاب نوع اسید، غلظت اسید تزریقی، افزایشها، فشار و دبی تزریقی اسید می‌باشد، باید آزمایشاتی روی سنگ و سیال سازند انجام گیرد؛ چراکه نتایج داده‌های آزمایشگاهی می‌تواند مستقیماً روی تصمیم‌گیری‌های مربوطه به طراحی عملیات مؤثر باشد. مقایسه پارامترها و عوامل مختلف مربوط به قبل و بعد از انجام عملیات اسیدزنی، از جمله کاهش ضریب پوسته، افزایش فشار ته چاهی، افزایش دبی تولیدی و افزایش میزان تراوایی سازند در دهانه چاه، موفقیت آمیز بودن اسیدزنی و اجرای صحیح عملیات را تأیید می‌کند. زیرا در برخی موارد، عدم رعایت پیش‌نیازهای مذکور، موجب تشکیل رسوب‌های نفتی، امولسیون‌های چند فازی غیر قابل کنترل توسط اسید تزریقی شده است.

فصل پنجم: انجام آزمایش‌ها

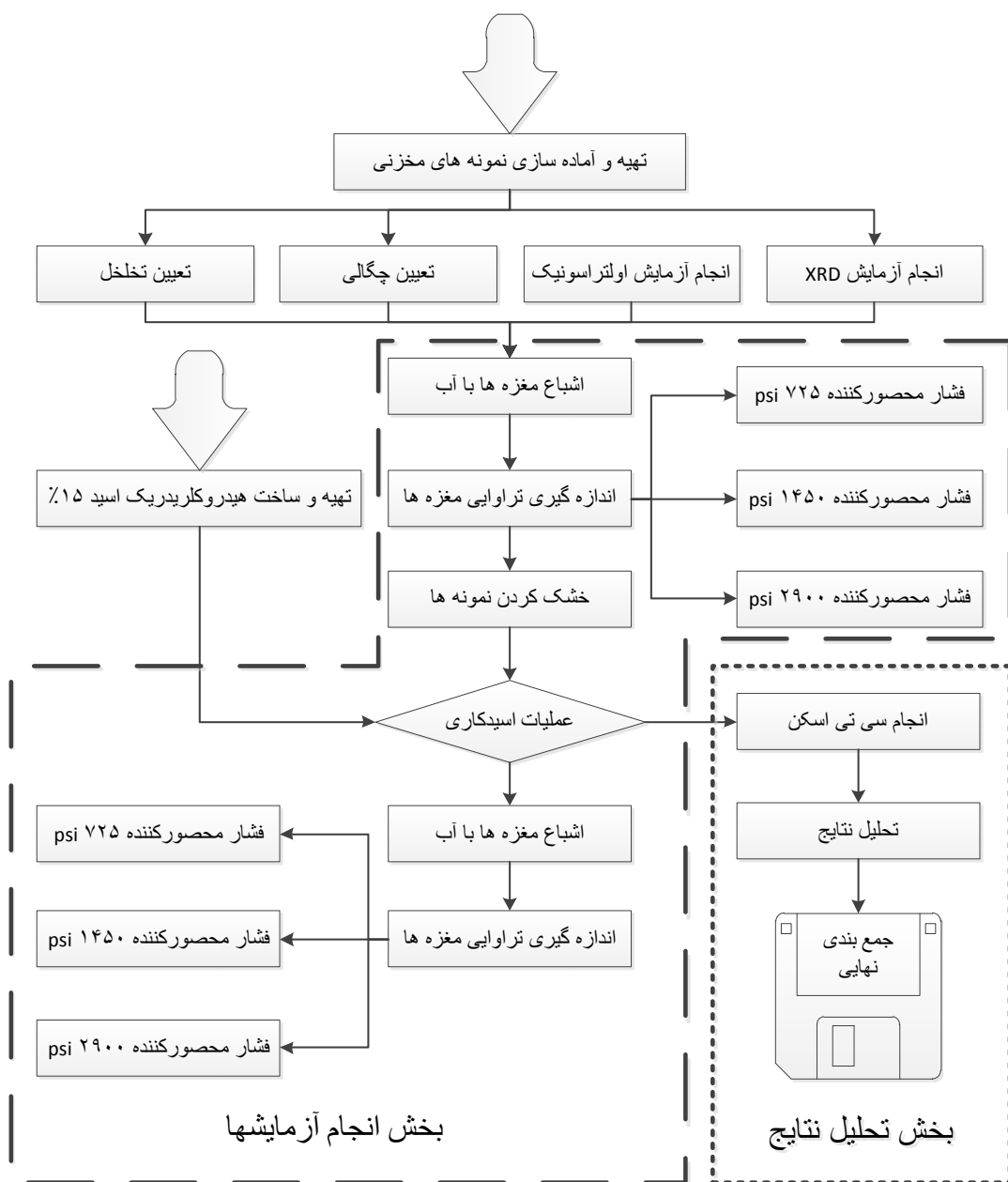
۵-۱ مقدمه

منابع هیدروکربوری یکی از عمده ترین منابع انرژی در جهان است. عدم دسترسی به منابع جایگزین انرژی زای ارزان دیگر، باعث شده است تا استفاده از این منابع با دقت بیشتری انجام شده و فناوری های نوین جهت بازیافت هر چه بیشتر آن توسعه داده شود. از جمله مشکلات افزایش ضریب بازیافت، پایین بودن تراوایی سنگ مخزن جهت انتقال نفت از مخزن به درون چاه می باشد. به طور کلی پس از مدتی بهره برداری از مخازن نفت و گاز به خاطر آسیب های سازند کاهش می یابد. جهت رفع مشکلات آب سازندی، همچنین افزایش تولید بیشتر، معمولاً از روش های تحریک استفاده می شود. یکی از راه های مؤثر افزایش برای افزایش تولید چاه ها، اسیدزنی به منظور کاهش اثر پوسته می باشد. این عملیات در مورد مخازن کربناته بسیار رایج است. در فرآیند اسیدزنی الگوهای حلالیت به دبی اسید، غلظت اسید، ترکیبات سازند، دمای چاه و نوع سیالات مخزن وابسته است. با در نظر گرفتن این موارد در این فصل به توضیح نحوه طراحی و اجرای آزمایش ها پرداخته می شود.

۵-۲ نمای کلی آزمایش ها

چنانچه پیش از این ذکر شد، عملیات اسیدزنی از جمله عملیات های رایج جهت افزایش تراوایی در سازندهای کم تراوا می باشد. در این میان، میزان دبی، فشارهای موجود اعم از فشار تزریق و محصورکننده و پارامترهای دیگری از این قبیل می توانند در چگونگی اثربخشی آن نقش مهمی ایفا نمایند. از اینرو آزمایش هایی بر روی نمونه های 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 می تواند به عنوان راهکاری مناسب برای اجرای مجدد آزمایش ها در نظر گرفته شود. همچنین با توجه به مخرب بودن و غیرقابل تکرار بودن آزمایش های اسیدزنی، طراحی نحوه انجام آزمایش در شرایطی که نمونه های مورد مطالعه از حساسیت بالایی مانند تعداد کم، هزینه

بالای تهیه و امثالهم 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 ۵-۱ به دو بخش کلی «انجام آزمایش‌ها» و «تحلیل نتایج» تقسیم می‌شود. بخش انجام آزمایش‌ها خود شامل سه مرحله اصلی «اندازه‌گیری تراوایی پیش از اسیدزنی»، «مرحله اسیدزنی» و «اندازه‌گیری تراوایی بعد از آن» می‌باشد.



شکل ۵-۱. روند کلی انجام آزمایش‌ها.

۳-۵ تهیه و آماده سازی نمونه‌ها

برای انجام آزمایش‌های اسیدزنی، تعداد ۶ پلاگ سنگ مخزنی کربناته تهیه شده است. مغزه‌ها مربوط به یکی از میادین نفتی ایران می‌باشد. در آزمایش‌های 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 ۵-۱ ذکر شده است. به علت واکنش پذیری مناسب اسیدکلریدریک با سنگ‌های کربناته و همچنین دسترسی آسان آن، این اسید برای انجام آزمایش بر روی مغزه‌ها انتخاب شد.

جدول ۵-۱. اطلاعات سیال مورد استفاده.

سیالات	غلظت (درصد وزنی)	چگالی (gr/cm^3)	حجم (ml)
اسید کلریدریک صنعتی	۳۵	۱/۱۷	۲۸۵
آب	۰	۱/۰۰۲	۴۶۵
اسید کلریدریک ساخته شده جهت آزمایش	۱۵	۲/۱۴۵۱	۷۵۰

پلاگ‌های تهیه شده جهت انجام آزمایشات، استوانه‌ای و دارای قطر ۱/۵ اینچ می‌باشند. از آنجا که برای انجام تست سیلاب‌زنی به منظور تعیین تراوایی اولیه سنگ‌های مخزنی کربناته، طول مغزه نهایتاً می‌بایست ۶ سانتی‌متر باشد (باتوجه به محدودیت طول نگهدارنده)، با استفاده از دستگاه برش دو سر مغزه (شکل ۵-۲) طول آنها به این مقدار کاهش یافته و به منظور انجام آزمایشات دو طرف مغزه‌ها به اندازه کافی صیقل زده شده است.



شکل ۵-۲. دستگاه برش دو سر مغزه مدل CC-R30.

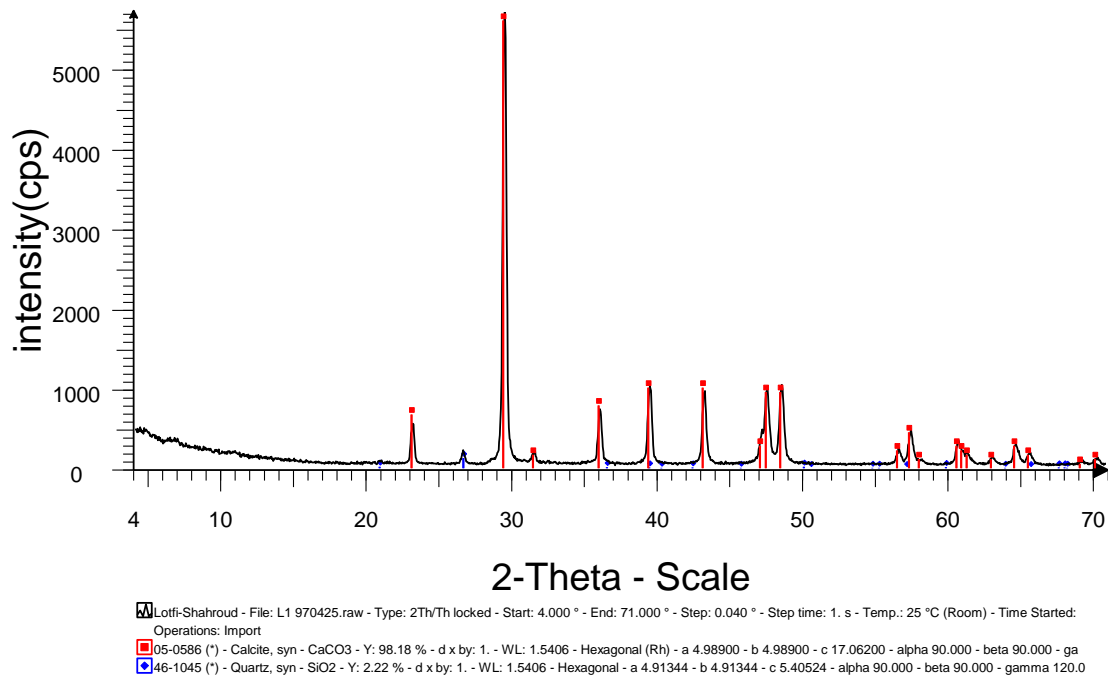
۴-۵ کانی شناسی نمونه‌ها

همانطور که در فصل گذشته ذکر شد، برای تعیین درصد کانی‌های تشکیل دهنده مغزه‌های مورد آزمایش، از دستگاه XRD استفاده شده است (شکل ۵-۳). برای انجام آزمایش XRD معمولاً از پودر نمونه استفاده می‌شود. نمونه پودری، شامل صفحات نمونه است که به صورت تصادفی در آن وجود دارند و این امر باعث افزایش سرعت بررسی مغزه می‌شود.



شکل ۵-۳. دستگاه XRD یا پراش پرتو ایکس.

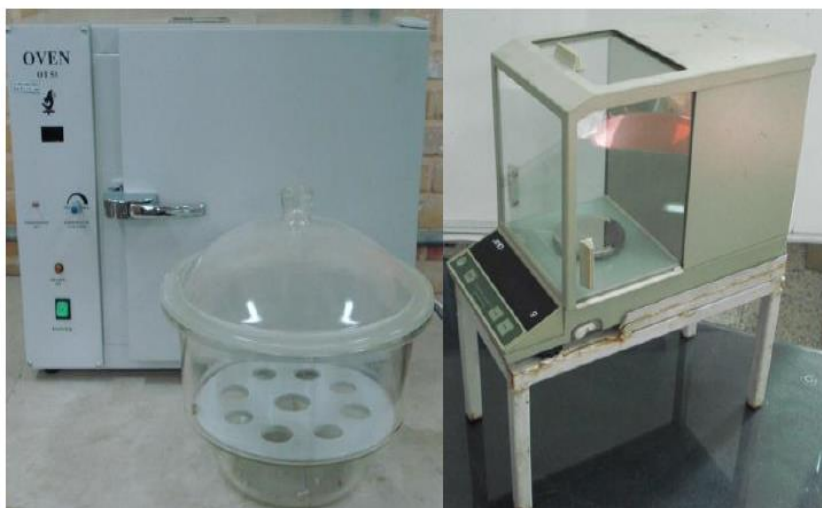
بدین ترتیب از گراف مربوط به آزمایش XRD در شکل ۴-۵ مشخص شده است که این مغزه‌ها حاوی کانی‌های کربنات کلسیم و دی‌اکسید سیلیسیم می‌باشد و حدوداً میزان درصد‌های آنها به ترتیب ۹۸ و ۲ درصد می‌باشد.



شکل ۴-۵. نمودار تعیین درصد کانی‌های تشکیل دهنده مغزه مورد آزمایش.

۵-۵ تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی

پیش از انجام آزمایش مخرب اسیدزنی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های غیر مخرب برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی مغزه‌ها انجام شد. برای تعیین مشخصات فیزیکی آنها (چگالی خشک و تر، تخلخل) ابتدا مغزه‌ها به طور کامل به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه دسیکاتور اشباع و سپس با ترازو با دقت ۰/۱ گرم وزن مغزه‌ها اندازه‌گیری شده است. به منظور تعیین چگالی خشک آنها مغزه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه قرار گرفته و سپس وزن آنها مشابه مرحله قبل اندازه‌گیری شده است (شکل ۵-۵).



شکل ۵-۵. تعیین مشخصات فیزیکی مغزه‌ها.

مقدار حجم مغزه‌ها، با اندازه‌گیری قطر و طول مغزه با دقت $0/1$ میلی‌متر با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری و محاسبه شده است. از آنجا که تعداد مغزه‌ها محدود بوده و امکان انجام آزمایشات مرسوم مکانیک سنگی (آزمایشات مخرب) وجود نداشته است، برای تعیین مشخصات مکانیکی (مدول برشی، مدول حجمی و سرعت گذر امواج طولی و عرضی در سنگ) از آزمایش غیر مخرب اولتراسونیک (شکل ۵-۶)، طبق استاندارد ISRM استفاده شده است.



شکل ۵-۶. آزمایش تعیین سرعت عبور امواج.

بر این اساس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مغزه‌ها به شرح جدول ۲-۵ و ۳-۵ محاسبه شده است.

جدول ۵-۲. مشخصات هندسی مغزه‌ها.

نمونه	ID	D (mm)	L (mm)	W (water) (gr)	W (dry) (gr)	W (sat) (gr)	Volume (m ³)
الف	۲۶۹۱.۶۶	۳۶/۷	۶۷/۲	۱۴/۹۹	۱۴۷/۸۱	۱۶۲/۸	۷/۱۰۸۷E-۰۵
ب	۲۹۵۷.۸۶	۳۶/۸۸	۶۵/۵	۱۵/۱۰	۱۴۷/۸۲	۱۶۲/۹۲	۷/۰۰۱۳E-۰۵
ج	۲۷۲۰.۱۸	۳۷/۱	۶۹/۳	۱۵/۹۰	۱۵۳/۹۱	۱۶۹/۸۱	۷/۴۹۱۵۴E-۰۵
د	۲۷۱۲.۱۹	۳۷/۱	۶۶/۷	۱۳/۰۱	۱۳۴/۹۲	۱۴۷/۹۳	۷/۲۱۰۴۷E-۰۵
ه	۲۶۸۵.۳۹	۳۶/۷	۸۰/۳	۱۷/۲۶	۱۶۸/۳۴	۱۸۵/۶۰	۸/۴۹۴۴۹E-۰۵
ی	۲۹۸۰.۵۵	۳۷/۰	۶۹/۳	۱۶/۲۰	۱۵۵/۴۵	۱۷۱/۶۵	۷/۴۵۱۲۱E-۰۵

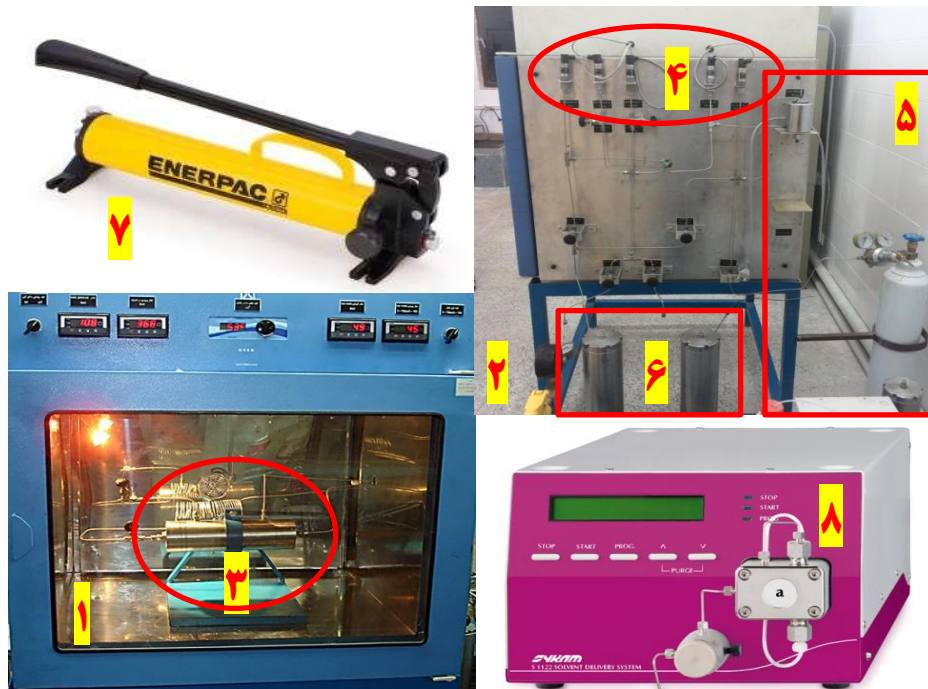
جدول ۵-۳. مشخصات مکانیکی و برخی خصوصیات فیزیکی مغزه‌ها.

نمونه	ID	تخلخل	چگالی (gr/cm ³)	V _P (m/s)	V _S (m/s)	G (GPa)	K (GPa)
الف	۲۶۹۱.۶۶	۲۱/۱	۲۰۷۹/۲۸	۴۹۶۶	۲۵۸۶	۱۳/۹	۳۲/۷
ب	۲۹۵۷.۸۶	۲۱/۴	۲۱۱۱/۳۲	۵۰۷۳	۲۷۵۳	۱۶	۳۳
ج	۲۷۲۰.۱۸	۲۱/۵	۲۳۰۵	۳۹۶۱	۲۸۶۰	۱۸/۸۵	۱۱/۰۲
د	۲۷۱۲.۱۹	۱۸/۱	۲۰۰۱	۲۴۶۴	۲۵۳۶	۱۲/۸۶	۵/۰۱
ه	۲۶۸۵.۳۹	۲۰/۲	۲۲۵۳	۲۹۵۹	۲۸۰۶	۱۷/۷۳	۳/۹۲
ی	۲۹۸۰.۵۵	۲۱/۶	۲۱۵۱	۲۸۲۳	۲۶۸۹	۱۵/۵۵	۳/۵۹

۵-۶ اندازه‌گیری تراوایی

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 در آزمایشگاه سنگ و سیال دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شد. مشخصات و جزئیات این دستگاه در شکل ۵-۷ نشان داده شده است. پمپ دستگاه با دقت ۰/۱ میلی‌لیتر بر دقیقه 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 بصورت یکنواخت اعمال می‌شود.



شکل ۵-۷. دستگاه سیلاب‌زنی مغزه مدل SP و اجزای آن (۱) سیستم گرمخان (۲) اتصالات دستگاه (۳) نگهدارنده مغزه مستقر در گرمخانه (۴) حسگرهای ثبت فشار (۵) سیستم اعمال فشار معکوس (۶) نگهدارنده های تزریق سیال (۷) پمپ دستی اعمال فشار محصورکننده (۸) پمپ تزریق سیال در فشار و دمای بالا.

پیش از انجام آزمایش، مغزه‌ها مطابق با شکل ۵-۸ بطور کامل در دستگاه اشباع مغزه، اشباع و آماده قرارگیری در دستگاه سیلاب زنی شدند. سپس مغزه در محفظه مخصوص به خود قرار گرفته و ابتدا و انتهای آن محکم بسته می‌شود (شکل ۵-۷).

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 (معادله ۴-۵) 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 بدست می‌آید. پس از تنظیمات اولیه دستگاه سیلاب‌زنی، تراوایی مغزه‌ها در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi و در یک روند افزایشی مورد آزمایش

قرار گرفته است. در نهایت، نتایج بدست آمده بصورت مقایسه ای در دو بخش قبل و بعد از انجام آزمایش اسیدزنی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



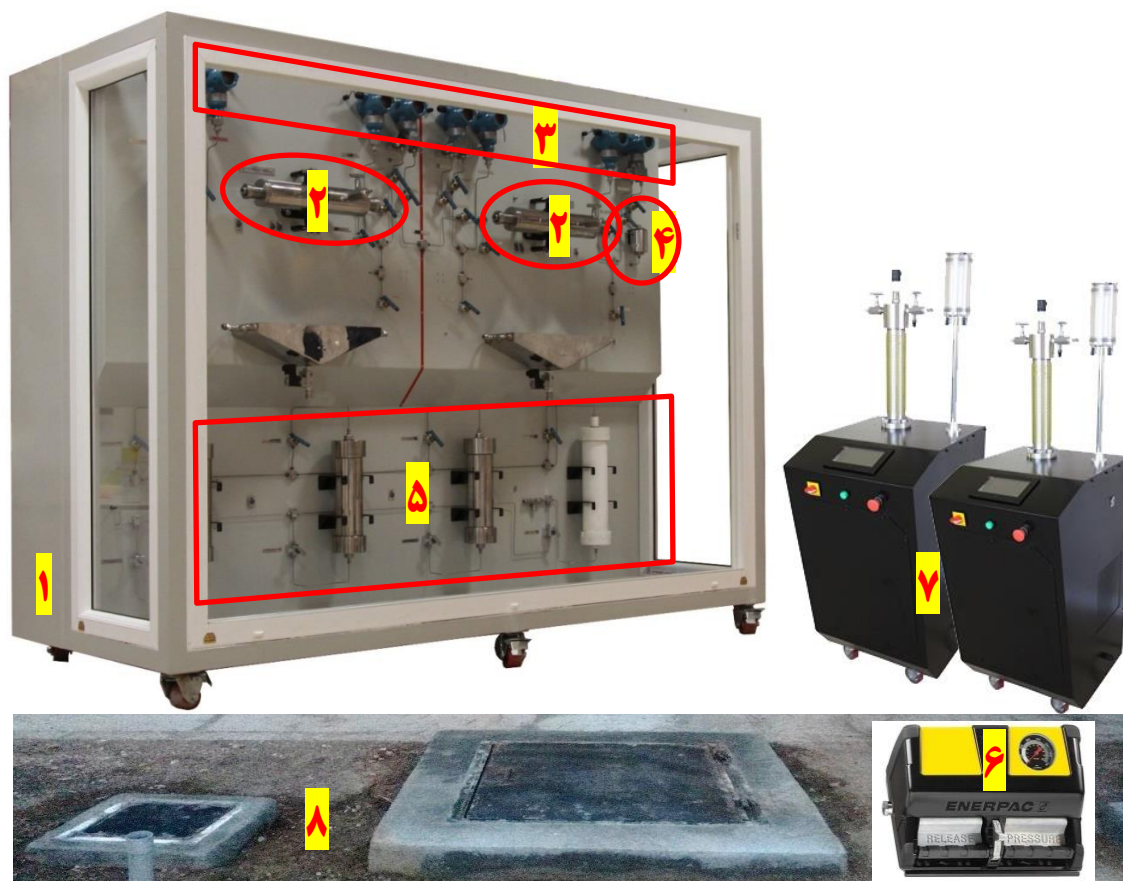
شکل ۵-۸. دستگاه اشباع مغزه.

۵-۷ انجام آزمایش 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 به علت 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 ۵-۹) مستقر در آزمایشگاه سنگ و سیال دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. این دستگاه مجهز به دو سیستم تزریق مجزا از یکدیگر، با دو نگهدارنده مغزه می‌باشد. با استفاده از

این دستگاه می‌توان اسید طراحی شده را تا حداکثر دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و فشار حداکثر ۱۰۰۰۰ psi به مغزه‌های مستقر در نگهدارنده مغزه تزریق نمود. این فرآیند را می‌توان به طور همزمان برای دو مغزه و به طور موازی با شرایط فشار محصورکننده ثابت اجرا کرد.

در این سیستم به منظور اعمال دما از ژاکت 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 به گونه‌ای طراحی شده است که بتوان مغزه‌های مطالعاتی را تا حداکثر طول ۶ اینچ با قطر ۱/۵ اینچ مورد آزمایش قرار داد. کنترل دستگاه و فرآیند تزریق به وسیله پمپ‌های با دقت و قدرت بالا انجام گرفته می‌شود. همچنین می‌توان از طریق رایانه متصل به دستگاه، آزمایش‌ها را پایش و کنترل نمود.



شکل ۵-۹. 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) پمپ-های تک سیلندری (۸) مخزن جمع-آوری پساب اسیدی (لطفی، ۱۳۹۸).

آزمایش‌ها در شرایط دمای محیط، غلظت ثابت (اسید کلریدریک ۱۵٪) و فشار و دبی تزریق مختلف انجام شد. با توجه به توان دستگاه و محدودیت تعداد مغزه، عملیات تزریق در ۶ نرخ مطابق با جدول ۴-۵ تعیین و تزریق اسید با شرایط مذکور برای دستیابی به شرایط بهینه انجام شد.

جدول ۴-۵. حداکثر / حداقل نرخ تزریق اسید در آزمایش‌های طراحی شده.

ردیف	ID	L (mm)	تخلخل (%)	Q (cc/min)	فشار محصورکننده (psi)
۱	۲۹۵۷.۸۶	۶۵/۵	۲۱/۴	۳/۶	۲۹۰۰
۲	۲۹۸۰.۵۵	۶۹/۳	۲۱/۶	۵/۸	۲۹۰۰
۳	۲۷۲۰.۱۸	۶۹/۳	۲۱/۵	۸/۱	۲۹۰۰
۴	۲۶۸۵.۳۹	۸۰/۳	۲۰/۲	۱۰/۴	۲۹۰۰
۵	۲۷۱۲.۱۹	۶۶/۷	۱۸/۱	۱۲/۷	۲۹۰۰
۶	۲۶۹۱.۶۶	۶۷/۲	۲۱/۱	۱۵/۰	۲۹۰۰

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.

۵-۸ جمع بندی

در این فصل طراحی آزمایش‌ها، نحوه‌ی ساخت سیال و آماده سازی مغزه‌ها به تفکیک و به تفصیل بیان شده است. همچنین مراحل انجام آزمایش‌ها جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مغزه‌ها مطابق با فلوجارت طراحی شده، شرح داده شده است. نتایج این آزمایش‌ها در سه بخش اصلی اندازه‌گیری تراوایی مغزه‌ها قبل از عملیات اسیدزنی، آزمایشات اسیدزنی و اندازه‌گیری تراوایی بعد از عملیات اسیدزنی بدست آمده است که در فصل بعدی به بحث و بررسی آنها پرداخته خواهد شد.

فصل ششم: بحث و بررسی نتایج آزمایش‌ها

۱-۶ مقدمه

همانطور که در فصول گذشته ذکر شد، آزمایشات طراحی شده شامل اندازه‌گیری تراوایی قبل و پس از عملیات اسیدزنی بوده است. مجموع این آزمایش‌ها به همراه تحلیل تصاویر حاصل از سی تی اسکن مغزه‌ها پس از اسیدزنی، موضوعی است که در این فصل به آن پرداخته می‌شود. میزان نرخ تزریق اسید به درون مغزه‌ها به صورتی تنظیم شد که تمامی محدوده توان دستگاه را دربرگیرد. 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. علاوه بر این، نتایج سی تی اسکن مغزه‌ها پس از عملیات اسیدزنی نیز به منظور بررسی کیفی آزمایشات انجام شده مورد تفسیر قرار گرفته است.

۲-۶ نتایج آزمایش تراوایی پیش از عملیات اسیدزنی

با انجام آزمایشات سیلاب‌زنی، تراوایی اولیه مغزه‌ها برای تمامی نمونه‌ها (شکل ۱-۶) در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi اندازه‌گیری شده است. همچنین مقادیر بدست آمده برای هر یک از نمونه‌ها به طور مجزا در فشارهای محصورکننده مذکور بررسی شده است.

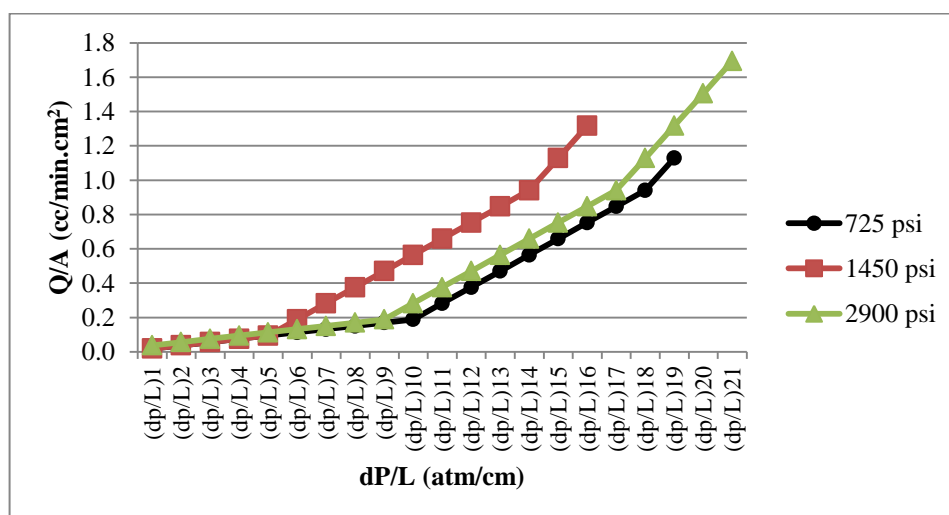


شکل ۶-۱. تصاویر مغزه‌های مورد آزمایش قبل از عملیات اسیدزنی.

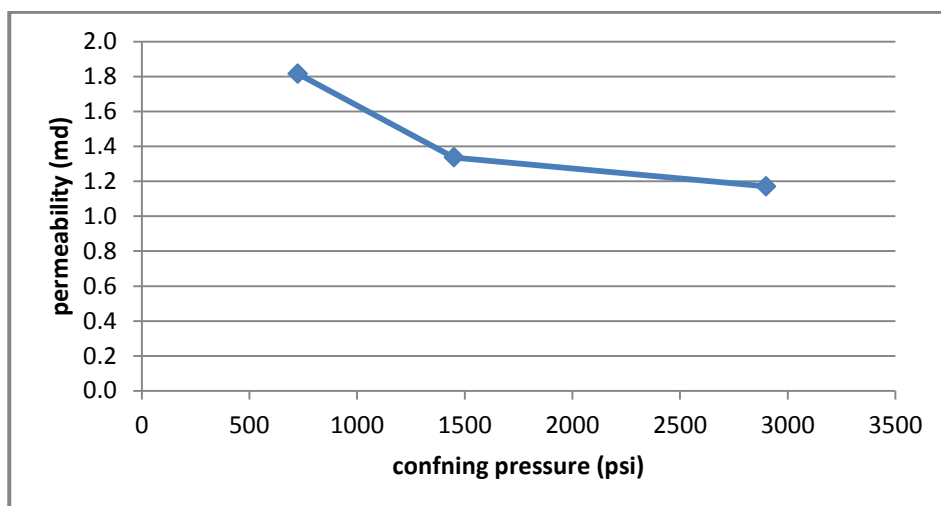
۶-۲-۱ تراوایی اولیه مغزه ۲۹۵۷/۸۶

به منظور بررسی اثر فشار محصورکننده بر روی تراوایی نمونه و تعیین ارتباط آنها، نمودار تغییرات تراوایی بر حسب فشار محصورکننده به شرح شکل ۶-۲ ترسیم شده است.

باتوجه به داده‌های به دست آمده در شکل ۶-۲ مقدار تراوایی نمونه در فشار محصورکننده ۷۲۵ psi، برابر با ۱/۸۲ میلی داری بدست آمده است. باتوجه به میزان دبی تزریق و اختلاف فشار موجود در ابتدا و انتهای نمونه، شیب نمودار تقریباً سیر صعودی خود را با افزایش دبی تزریق حفظ کرده است. در شکل مذکور با توجه به داده‌های نمودار، مقدار تراوایی ۱/۳۴ میلی داری بدست آمده است. همچنین با مقایسه میزان تراوایی در فشار محصورکننده ۷۲۵ psi، کاهش تراوایی در اثر افزایش فشار محصورکننده ملاحظه می‌گردد (شکل ۶-۳). در واقع میزان تراوایی در فشار محصورکننده ۲۹۰۰ psi برابر با ۱/۱۷ میلی داری می‌باشد. همچنین سیر کاهش تراوایی در اثر افزایش فشار محصورکننده کاملاً مشخص است.



شکل ۶-۲. تراوایی مغزه ۲۹۵۷/۸۶ در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi.



شکل ۶-۳. تراوایی مغزه ۲۹۵۷/۸۶ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

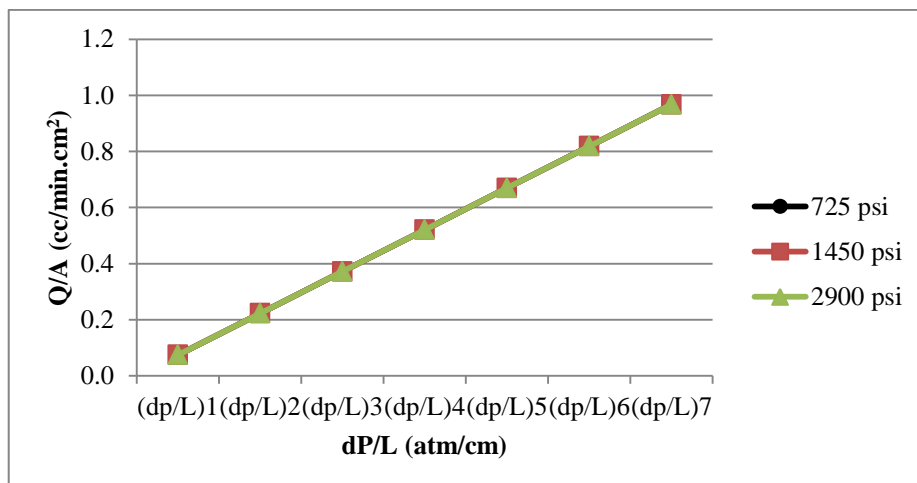
هرچه فشار محصورکننده افزایش می‌یابد، فضای خالی در نمونه سنگ متراکم می‌گردد. نهایتاً کاهش عبور سیال در مغزه و کاهش تراوایی در آن قابل ملاحظه است.

۲-۲-۶ تراوایی اولیه مغزه ۲۹۸۰/۵۵

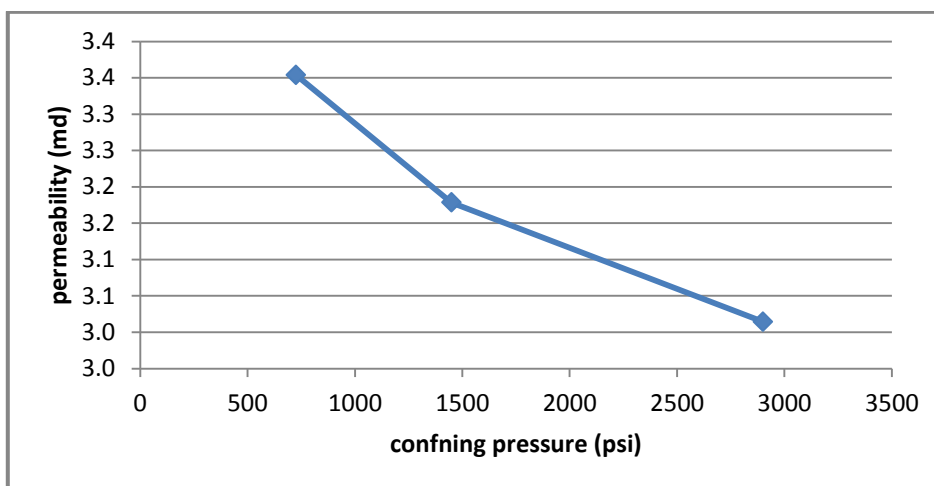
بررسی اشکال ۴-۶ و ۵-۶ همانند عملکرد فرآیند ذکر شده در نمونه ۲۹۵۷/۸۶ می‌باشد. در اینجا نیز میزان تراوایی در هر فشار محصورکننده تعیین شده است.

در شکل ۴-۶ با توجه به نمودار، در فشار محصور کننده ۷۲۵ psi مقدار تراوایی ۳/۳۵ میلی داری بدست آمده است. و متعاقباً روند کاهش تراوایی در اثر افزایش فشار محصورکننده قابل انتظار است.

همچنین مقدار تراوایی نمونه در فشار محصور کننده ۱۴۵۰ psi برابر با ۳/۱۸ میلی داری و در فشار محصورکننده ۲۹۰۰ psi مقدار تراوایی ۳/۰۱ میلی داری بدست آمده است. با توجه به نتایج شکل ۵-۶، اگرچه در کلیه نمونه‌ها روند یکسانی جهت کاهش تراوایی ملاحظه شده است؛ اما همانگونه که از روی شکل‌ها مشخص است، میزان تغییرات کمی متفاوت است. علت این امر میزان حجم حفرات، نحوه ارتباط آنها با یکدیگر و نوع کانی‌شناسی آنهاست.



شکل ۶-۴. تراوایی مغزه ۲۹۸۰/۵۵ در فشارهای محصورکننده 725 psi، 1450 psi و 2900 psi.

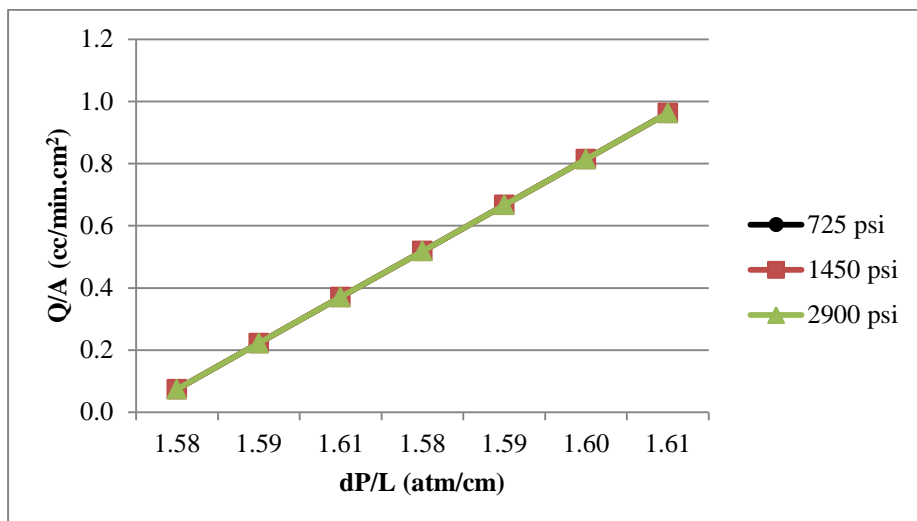


شکل ۶-۵. تراوایی مغزه ۲۹۸۰/۵۵ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

۳-۲-۶ تراوایی اولیه مغزه ۲۷۲۰/۱۸

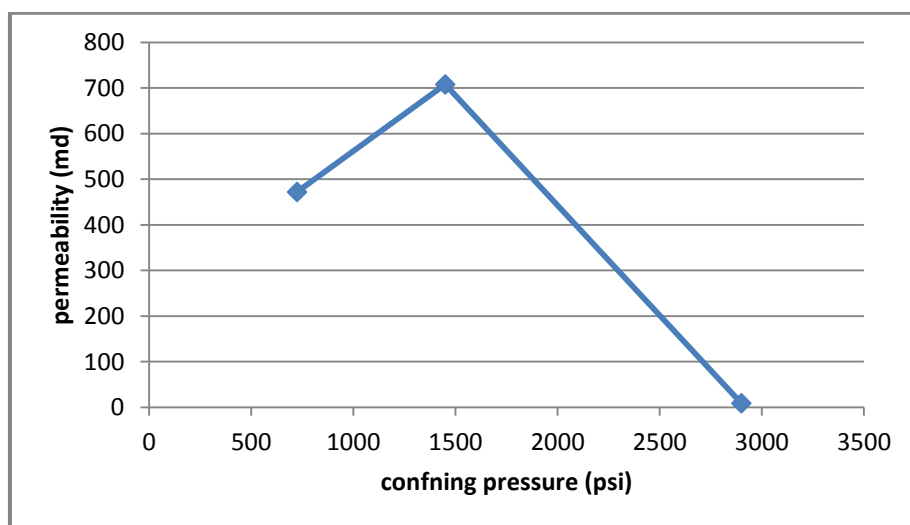
با توجه به نمودار شکل ۶-۶، شیب نمودار مقدار ۴۷۱/۷۳ میلی داری را در فشار محصورکننده

725 psi نشان می‌دهد.



شکل ۶-۶. تراوایی مغزه ۲۷۲۰/۱۸ در فشارهای محصورکننده 725 psi، 1450 psi و 2900 psi.

همچنین در شکل ۶-۷ مقدار تراوایی با توجه به نمودارهای بدست آمده در دو فشار محصورکننده 2900 psi و 1450 psi به ترتیب برابر با ۷۰۷/۵۹ میلی داری و ۸/۸۴ میلی داری شده است.



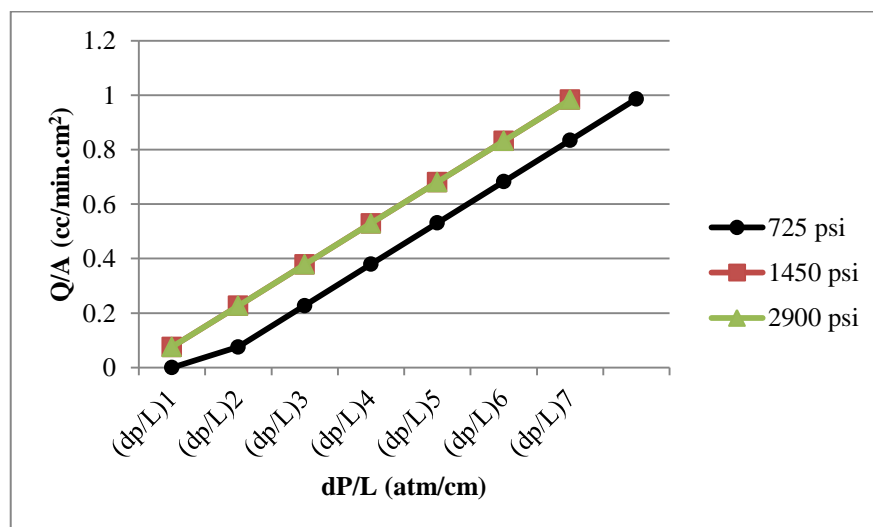
شکل ۶-۷. تراوایی مغزه ۲۷۲۰/۱۸ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

همانطور که در نمودار تراوایی شکل ۶-۷ 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

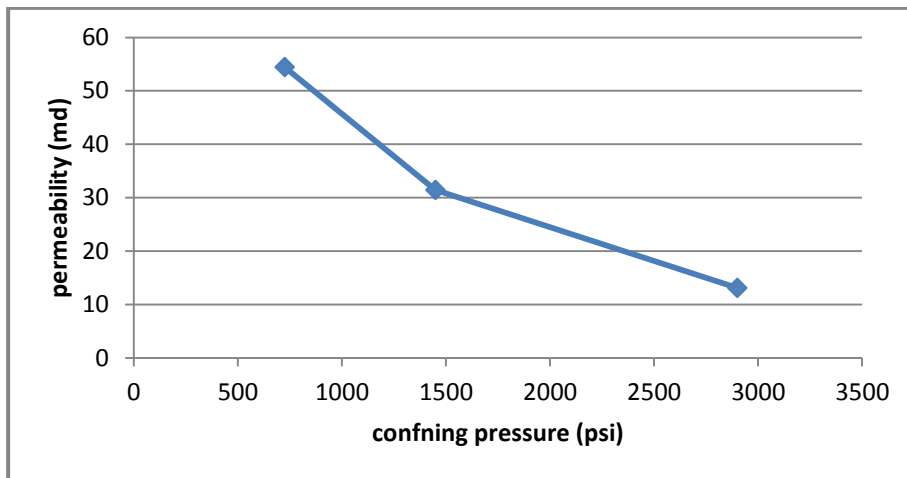
خاص که فشار محصورکننده و همه جانبه در مقادیر نه چندان بالایی اعمال می‌گردد، برآیند آن با نیروی شبه‌محوری حاصل از تزریق سیال، می‌تواند منجر به فشرده شدن صفحات شکستگی عمود بر راستای جریان شود درحالی‌که می‌تواند چنین اثری در صفحات موازی با راستای اعمال نیرو مشاهده نگردد؛ اما با افزایش فشار همه جانبه در شرایط آماده‌سازی فازهای بعدی تزریق، امکان به هم پیوستن آنها و برقراری روابطی هرچند ریز وجود دارد. همچنین وجود ذرات متحرک درون نمونه نیز می‌تواند منجر به افزایش فشار و تغییر در تراوایی شود. علاوه بر این خطاهای غیر قابل اجتناب در انجام آزمایش نیز عامل دیگری است که می‌تواند وجود داشته باشد.

۶-۲-۴ تراوایی اولیه مغزه ۲۶۸۵/۳۹

بر اساس نتایج آزمایش انجام شده (شکل ۶-۸ و ۶-۹) مقدار تراوایی در فشار محصورکننده ۷۲۵ psi، ۵۴/۴۴ میلی دارسی بدست آمده است. مطابق با مراحل قبل در نمونه‌ها میزان تراوایی در فشارهای محصورکننده ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi نیز به ترتیب ۳۱/۴۳ میلی دارسی و ۱۳/۰۸ میلی دارسی تعیین شده است. همچنین روند تغییرات کاهش تراوایی در اثر افزایش فشار محصورکننده بر روی این نمونه نیز کاملاً آشکار است.



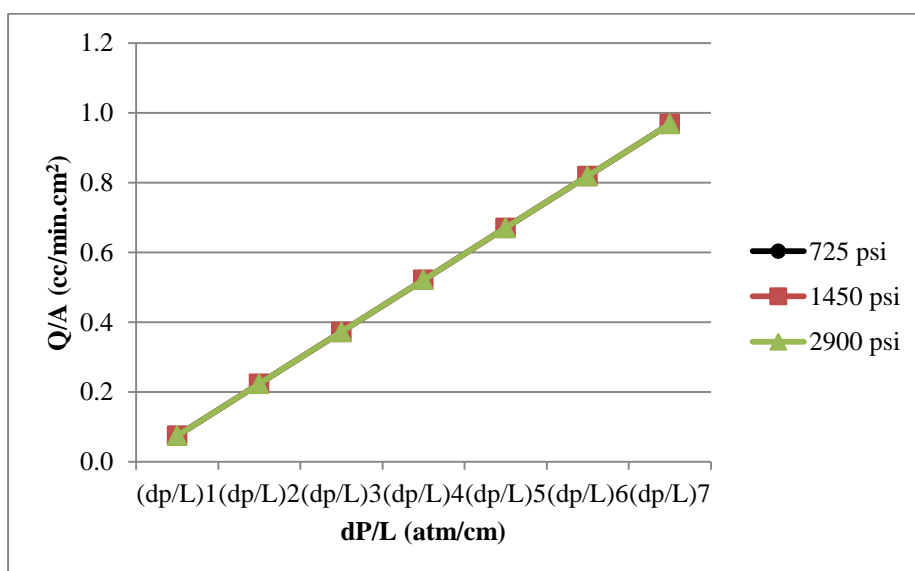
شکل ۶-۸. تراوایی مغزه ۲۶۸۵/۳۹ در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi.



شکل ۶-۹. تراوایی مغزه ۲۶۸۵/۳۹ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

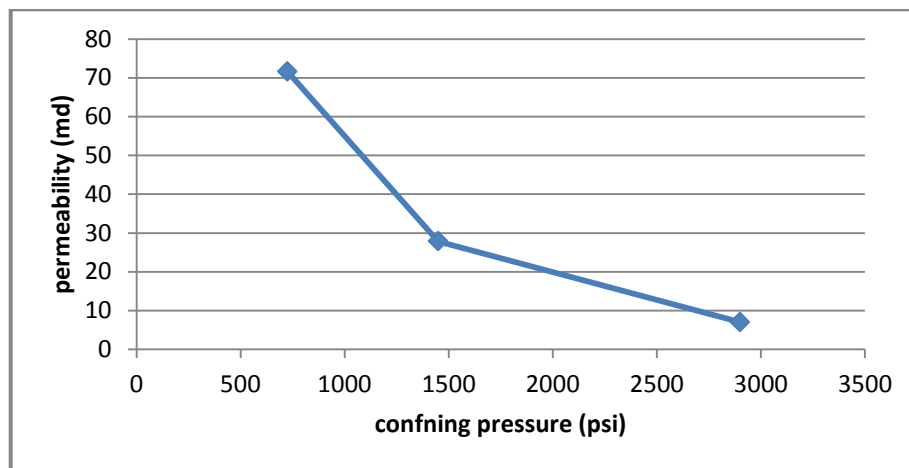
۵-۲-۶ تراوایی اولیه مغزه ۲۷۱۲/۱۹

در شکل ۶-۱۰ مقدار تراوایی در فشار محصورکننده ۷۲۵ psi، ۷۱/۶۲ میلی داری محاسبه شده است. همچنین در این شکل میزان تراوایی در دو فشار محصورکننده ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi به ترتیب شامل مقادیر ۲۷/۸۵ میلی داری و ۷/۰۳ میلی داری می‌باشد. با توجه به الگوی مشابه در ظاهر نمودارها، تفاوت میزان تراوایی آنها از لحاظ کمی کاملاً قابل تشخیص است.



شکل ۶-۱۰. تراوایی مغزه ۲۷۱۲/۱۹ در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi.

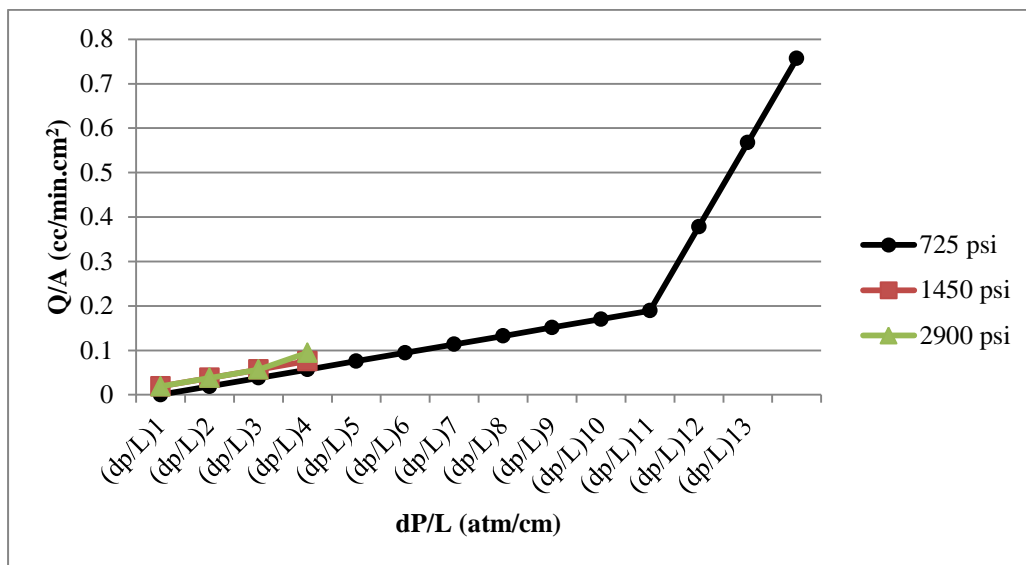
همچنین تغییرات کاهشی در برابر افزایش فشار محصورکننده در شکل ۶-۱۱ قابل ملاحظه است.



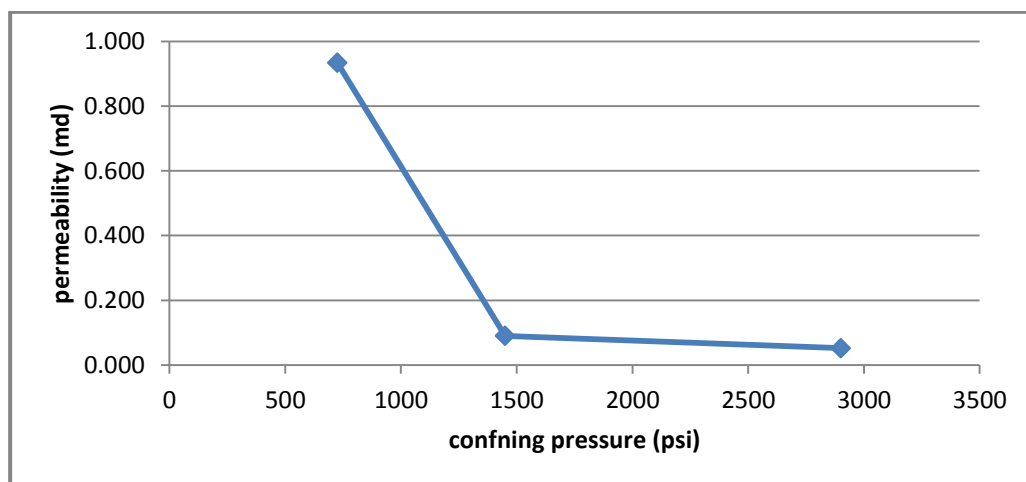
شکل ۶-۱۱. تراوایی مغزه ۲۷۱۲/۱۹ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

۶-۲-۶ تراوایی اولیه مغزه ۲۶۹۱/۶۶

با مقایسه مقادیر تراوایی اشکال ۶-۱۲ و ۶-۱۳، در فشارهای محصورکننده ۷۲۵psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi سیر نزولی آن قابل مشاهده می‌باشد. همچنین مقدار آنها به ترتیب ۰/۹۳۴ میلی داری، ۰/۰۹۰ میلی داری و ۰/۰۵۲ میلی داری بدست آمده است. علت تفاوت ظاهری در شیب نمودارها، میزان تفاوت دبی‌های تزریق در هر یک از فشارهای محصورکننده می‌باشد.



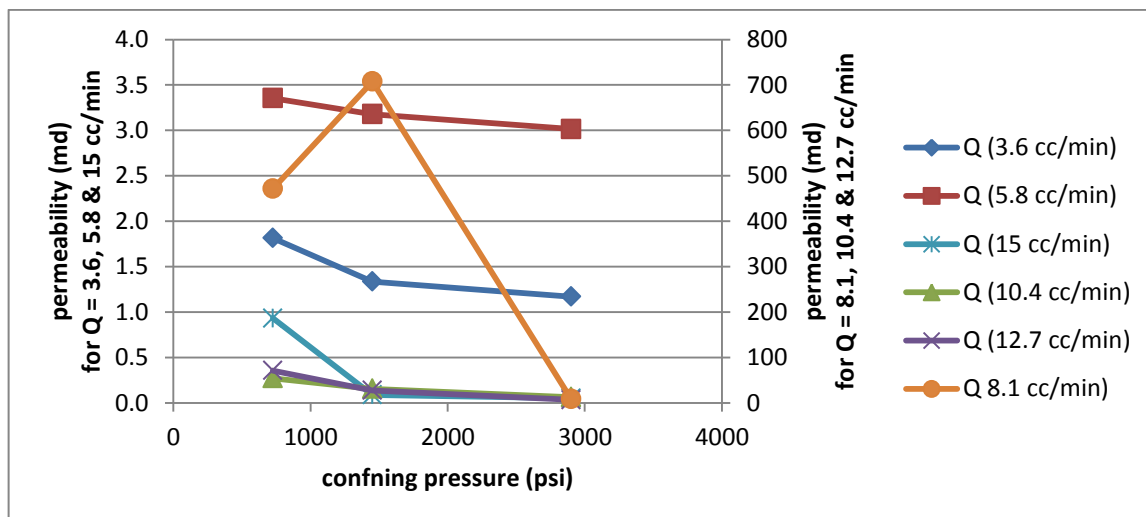
شکل ۶-۱۲. تراوایی مغزه ۲۶۹۱/۶۶ در فشارهای محصورکننده 725 psi، 1450 psi و 2900 psi.



شکل ۶-۱۳. تراوایی مغزه ۲۶۹۱/۶۶ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

باتوجه به نتایج نمودارهای بدست آمده از آزمایش تعیین تراوایی پیش از اسیدزنی، با افزایش

فشار محصورکننده در عموم مغزه‌ها مقدار تراوایی روندی کاهشی داشته است (شکل ۶-۱۴).



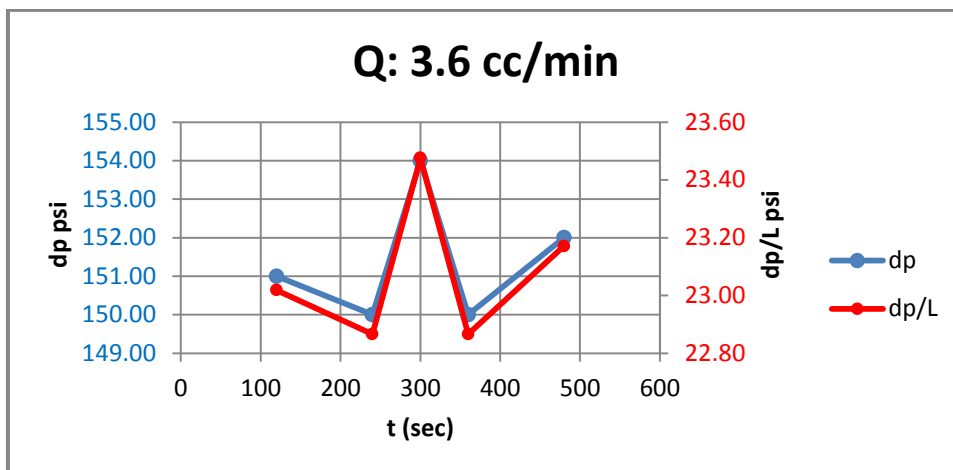
شکل ۶-۱۴. روند کاهش میزبان تراوایی با افزایش مقدار فشار محصورکننده در مقادیر مختلف پیش از عملیات اسیدزنی.

۳-۶ 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 نحوه‌ی عملکرد اسید به وسیله تصاویر سی تی اسکن نمونه‌ها پس از اسیدزنی، بررسی شده که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۳-۶-۱ اسیدزنی مغزه ۲۹۵۷/۸۶

در شکل ۶-۱۵، نمودار افت فشار دو سر نمونه نسبت به زمان ملاحظه می‌گردد. با توجه به دبی تزریق ۳/۶ سی سی بر دقیقه، اسید ضمن تزریق در فرصت مناسبی ساختار کرمی شکل را در نمونه ایجاد کرده و به انتها رسانده است (شکل ۶-۱۶). همچنین میزان افت فشار حدوداً در مدت زمان ۳۰۰ ثانیه اتفاق افتاده است. همانطور که در نتیجه سی تی اسکن نمونه نیز مشاهده می‌شود (شکل‌های ۶-۴۱ تا ۶-۴۳)، 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.



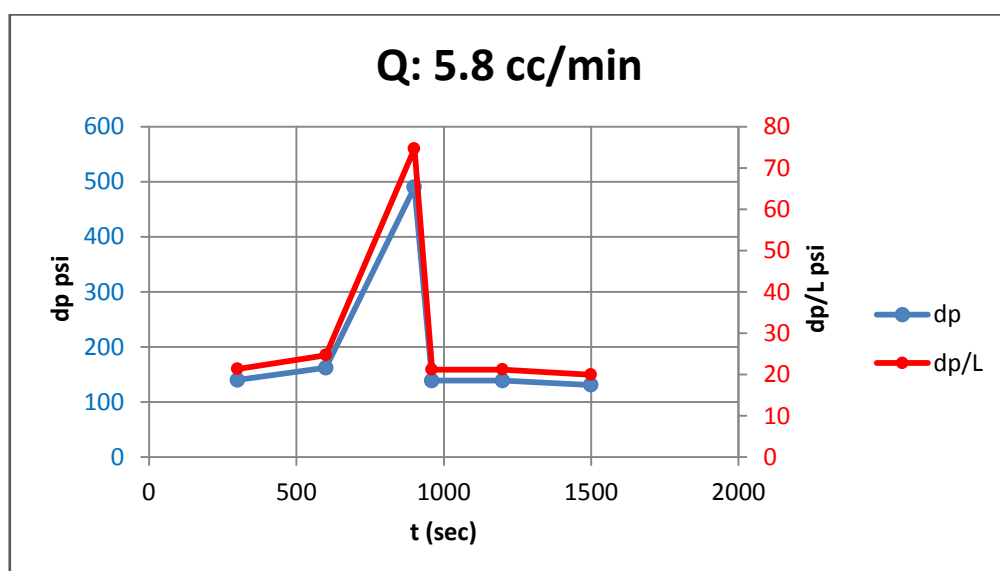
شکل ۶- ۱۵. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۹۵۷/۸۶ در دبی تزریق ۳/۶ سی سی بر دقیقه.



شکل ۶- ۱۶. تصویر مغزه ۲۹۵۷/۸۶ بعد از عملیات اسیدزنی.

۲-۳-۶ اسیدزنی مغزه ۲۹۸۰/۵۵

در شکل ۶-۱۷ با افزایش دبی تا میزان ۵/۸ سی سی بر دقیقه، ساختار کرمی شکل ایجاد شده در نمونه (شکل ۶-۱۸)، مشابه با تزریق در دبی قبلی است با این تفاوت که افزایش دبی باعث تخریب اولیه نمونه به مقدار بیشتری شده است. این موضوع نشان از تغییر سینتیک واکنش ناشی از افزایش فشار تزریق است. همچنین در سی تی اسکن نیز به خوبی نمایان است (تصاویر ۶-۴۴ تا ۶-۴۶). همچنین افت فشار در دو سر این نمونه پس از حدود ۹۰۰ ثانیه رخ داده است.



شکل ۶-۱۷. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۹۸۰/۵۵ در دبی تزریق ۵/۸ سی سی بر دقیقه.

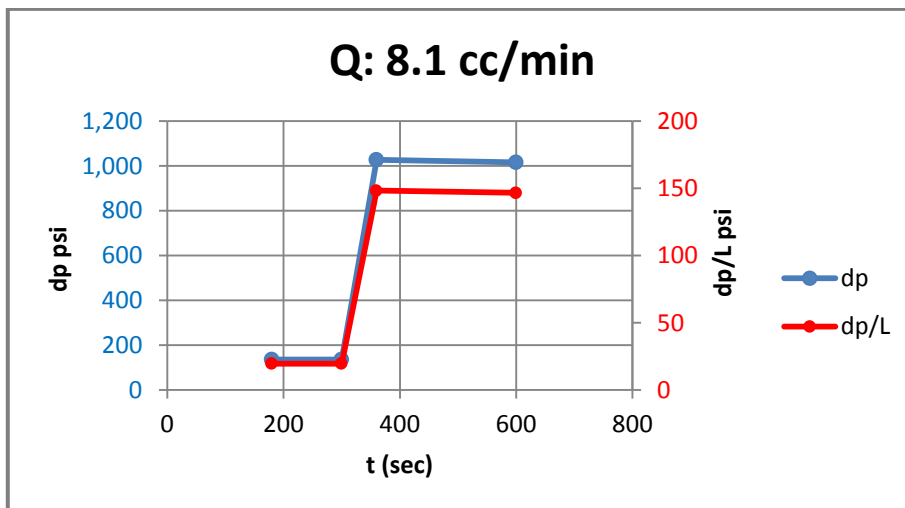


شکل ۶-۱۸. تصویر مغزه ۲۹۸۰/۵۵ بعد از عملیات اسیدزنی.

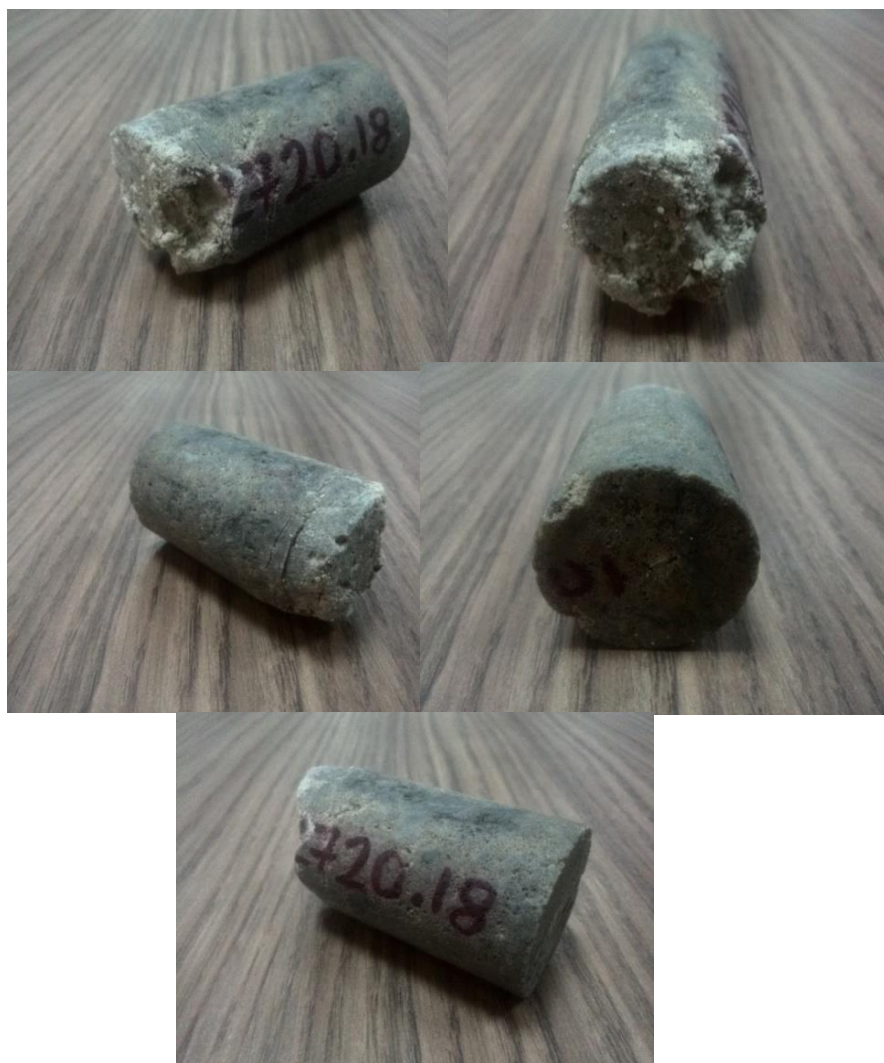
۶-۳-۳ اسیدزنی مغزه ۲۷۲۰/۱۸

در شکل ۶-۱۹ رفتاری متفاوت با دو نمونه قبل مشاهده می‌شود. 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 (اشکال ۶-۴۷ تا ۶-۴۹). 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 ۶-۲۰ 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. همچنین افت فشار در دو سر نمونه در زمان حدوداً ۲۰۰ ثانیه حادث شده است.



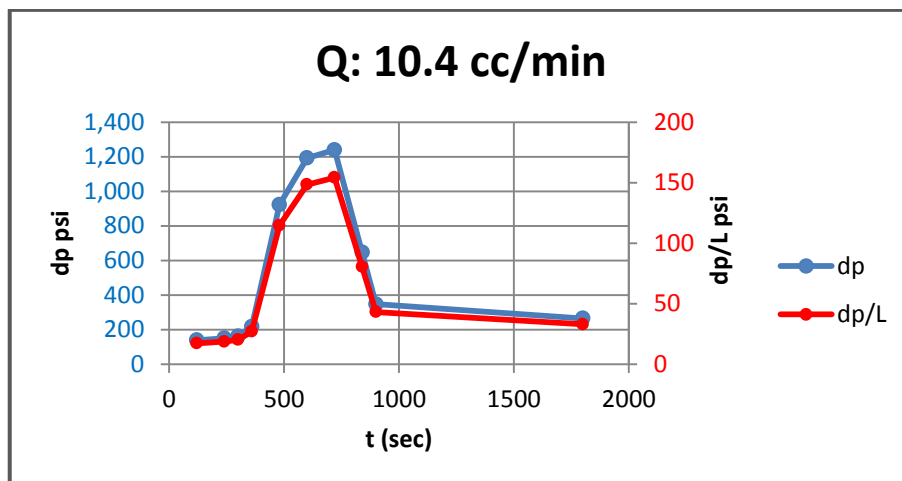
شکل ۶-۱۹. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۷۲۰/۱۸ در دبی تزریق ۸/۱ سی سی بر دقیقه.



شکل ۶-۲۰. تصویر مغزه ۲۷۲۰/۱۸ بعد از عملیات اسیدزنی.

۶-۳-۴ اسیدزنی مغزه ۲۶۸۵/۳۹

در نمونه ۲۶۸۵/۳۹ (شکل ۶-۲۱) همانند مغزه ۲۷۲۰/۱۸، آثار هجوم اسید در ابتدای مغزه مشاهده می‌شود (شکل ۶-۲۲). این مغزه نیز عملاً بدون ساختار کرمی شکل واضح، اسید را از تمام فضای خود عبور داده است. در قیاس با نمونه ۲۷۲۰/۱۸ که تراوایی اولیه بالاتری نسبت به نمونه ۲۶۸۵/۳۹ دارد، در مغزه ۲۶۸۵.۳۹ این اتفاق به دلیل افزایش فشار ناشی از افزایش دبی است. این امر باعث شده تا ساختار کرمی شکل پنهان موجود در سنگ (شکل‌های ۶-۵۰ تا ۶-۵۲) نیز به انتهای آن نرسد. در این نمونه هم میزان افت فشار در زمان حدوداً ۷۰۰ ثانیه اتفاق افتاده است.



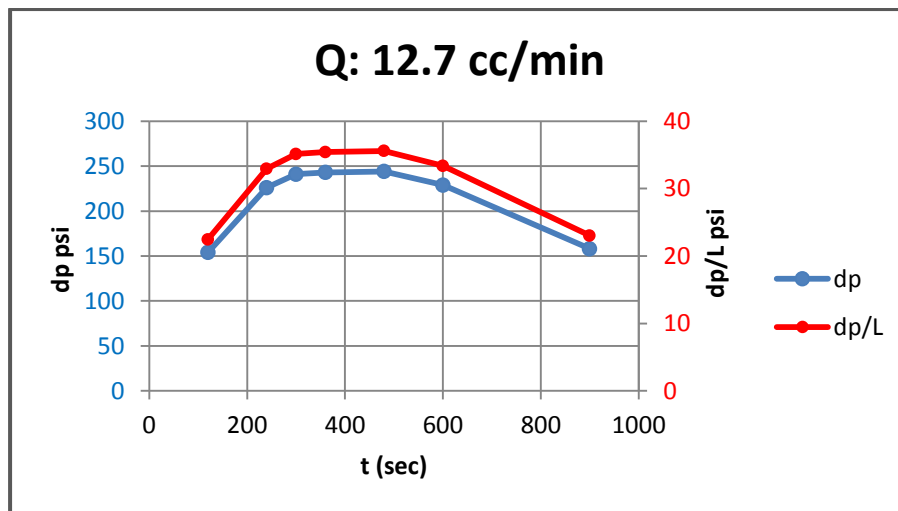
شکل ۶-۲۱. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۶۸۵/۳۹ در دبی تزریق ۱۰/۴ سی سی بر دقیقه.



شکل ۶-۲۲. تصویر مغزه ۲۶۸۵/۳۹ بعد از عملیات اسیدزنی.

۶-۳-۵ اسیدزنی مغزه ۲۷۱۲/۱۹

در نمونه ۲۷۱۲/۱۹ در اثر تزریق اسید همانند دو مغزه قبلی (تصاویر ۶-۲۰ و ۶-۲۲) ساختار کرمی شکل مشاهده نمی‌شود. تفاوت نتیجه رخ داده در این دبی با دو دبی قبل در شدت تخریبی است که در مغزه رخ داده است (شکل ۶-۲۴). 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 (شکل‌های ۶-۵۳ تا ۶-۵۵). همچنین افت فشار در نمونه در زمان حدوداً ۳۰۰ ثانیه مشاهده می‌گردد.



شکل ۶-۲۳. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۷۱۲/۱۹ در دبی تزریق ۱۲/۷ سی سی بر دقیقه.

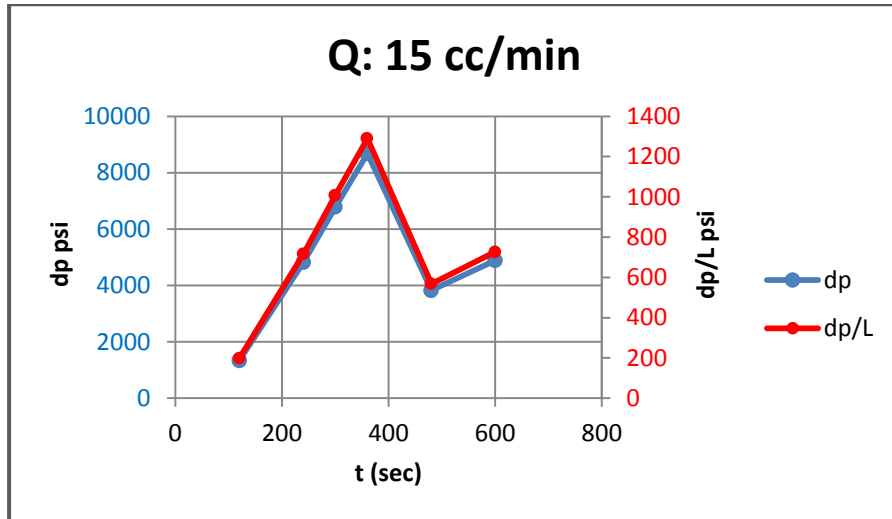


شکل ۶-۲۴. تصویر مغزه ۲۷۱۲/۱۹ بعد از عملیات اسیدزنی.

۶-۳-۶ اسیدزنی مغزه ۲۶۹۱/۶۶

در نمونه ۲۶۹۱/۶۶ 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 (شکل‌های ۶-۲۵، ۶-۲۶، ۶-۵۶ تا ۶-۵۸). همچنین میزان افت فشار در این نمونه نیز حدوداً پس از گذشت ۳۶۰ ثانیه رخ داده است. بعد از آن در حدود ثانیه ۴۸۰ تا ۶۰۰ میزان فشار

افزایش می‌یابد و این امر احتمالاً به دلیل وجود رسوبات داخل نمونه و جابجایی آن‌ها می‌باشد که موجب مسدود شدن مسیر عبور سیال و به دنبال آن افزایش فشار شده است.



شکل ۶-۲۵. نمودار اسیدزنی مغزه ۲۶۹۱/۶۶ در دبی تزریق ۱۵ سی سی بر دقیقه.



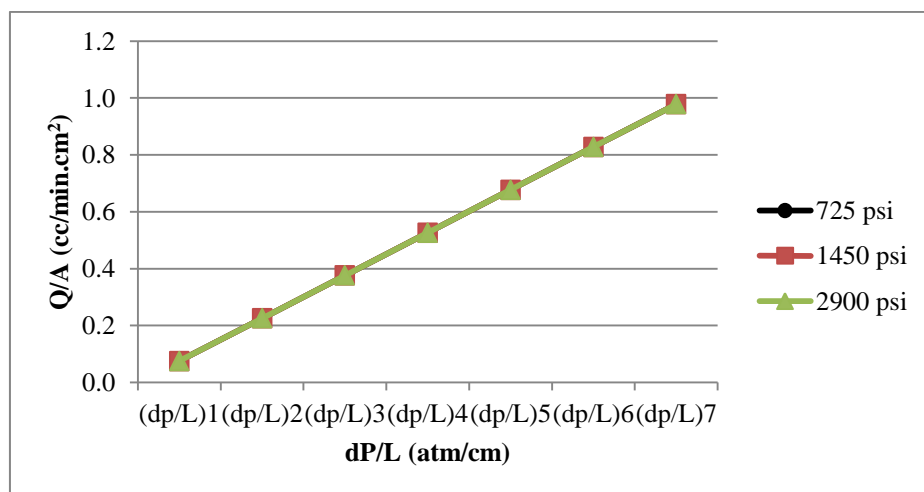
شکل ۶-۲۶. تصویر مغزه ۲۶۹۱/۶۶ بعد از عملیات اسیدزنی.

۴-۶ نتایج آزمایش‌های تراوایی بعد از عملیات اسیدزنی

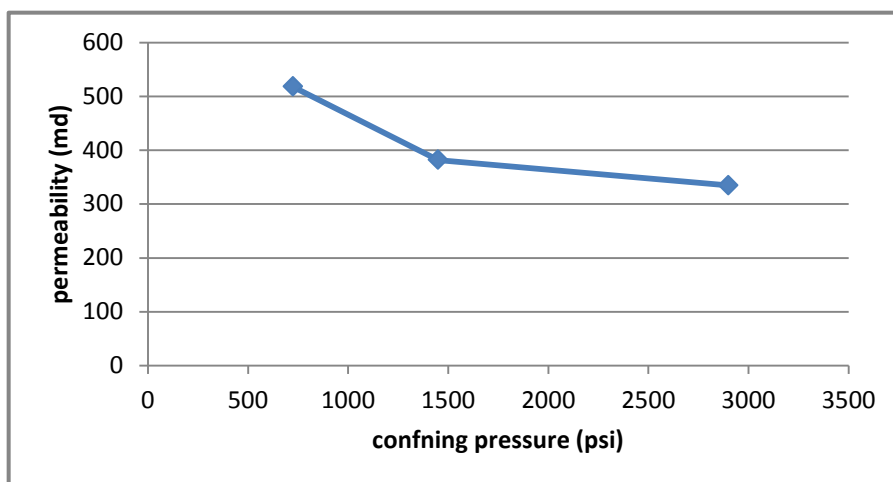
پس از تکمیل آزمایش‌های اسیدزنی با توجه به شرایط مذکور، مجدداً آزمایشات سیلابزنی برای بررسی اثر اسیدزنی بر روی تراوایی مغزه‌ها انجام شده و نتایج آن به ترتیب در نمودارهایی مورد اشاره و تحلیل قرار خواهند گرفت.

۶-۴-۱ تراوایی ثانویه مغزه ۲۹۵۷/۸۶

با توجه به مقادیر نمودار در شکل ۶-۲۷، تراوایی نمونه در فشار محصورکننده ۷۲۵ psi، ۵۱۷/۷ میلی داری بدست آمده است. همچنین با مقایسه میزان تراوایی در قبل و بعد از عملیات اسیدزنی، روند عملکرد قابل انتظار اسید به وضوح مشخص است. همچنین مقدار تراوایی در فشارهای محصورکننده ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi، به ترتیب برابر با مقادیر ۳۸۱/۷ میلی داری و ۳۳۴/۴ میلی داری می‌باشد. با توجه به شکل ۶-۲۸، 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.



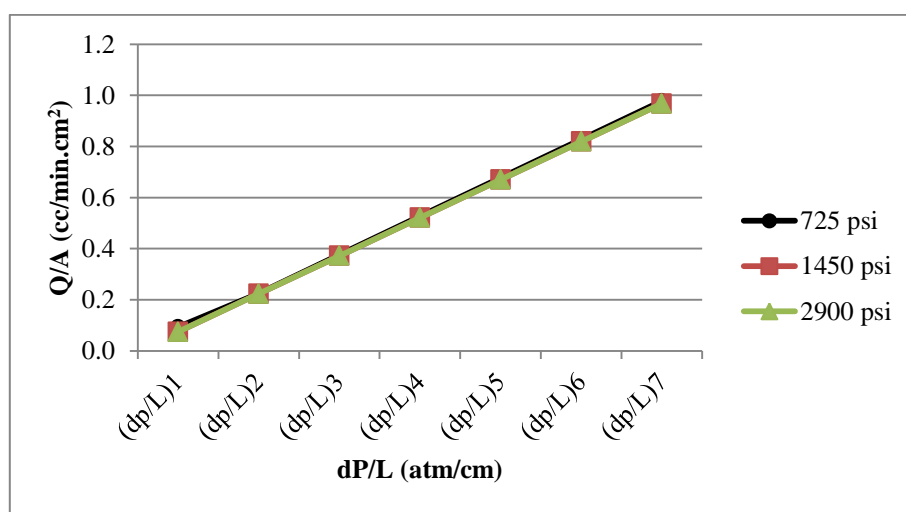
شکل ۶-۲۷. تراوایی مغزه ۲۹۵۷/۸۶ در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi.



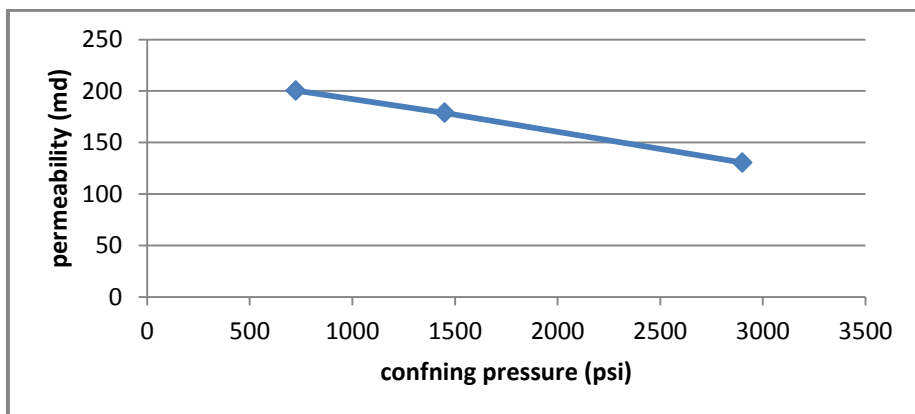
شکل ۶-۲۸. تراوایی مغزه ۲۹۵۷/۸۶ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

۶-۴-۲ تراوایی ثانویه مغزه ۲۹۵۰/۵۵

همانند بررسی‌های انجام شده در نمونه‌های قبلی، میزان تراوایی در فشار محصورکننده ۷۲۵ psi برابر با مقدار ۲۰۰/۴۰ میلی داری شده است (شکل ۶-۲۹). همچنین تراوایی نمونه مطابق با داده‌های بدست آمده، در فشارهای محصورکننده ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi به ترتیب شامل مقادیر ۱۷۸/۷۳ میلی داری و ۱۳۰/۴۳ میلی داری می‌باشد (شکل ۶-۳۰).



شکل ۶-۲۹. تراوایی مغزه ۲۹۵۰/۵۵ در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi.

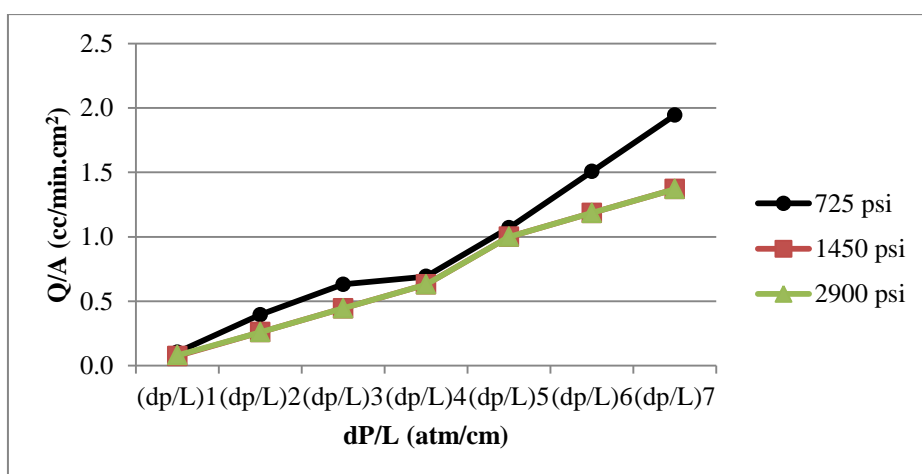


شکل ۳۰-۶. تراوایی مغزه ۲۹۵۰/۵۵ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

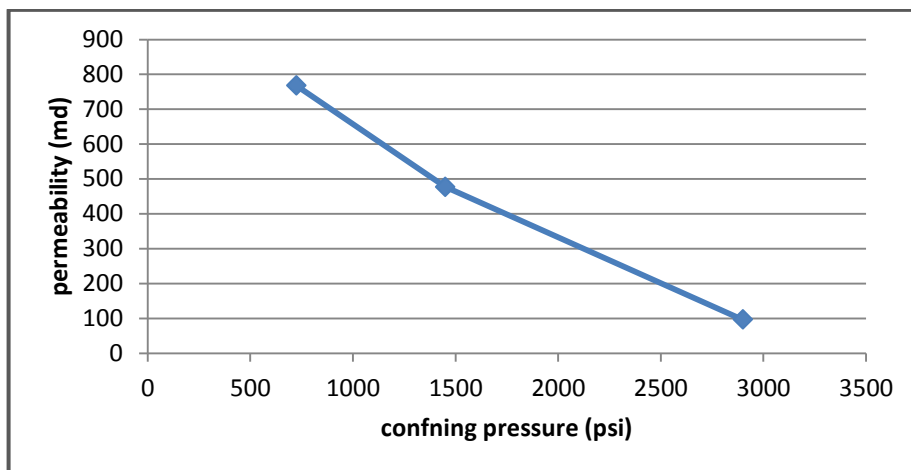
همانطور که در شکل ۳۰-۶ ملاحظه می‌گردد، مطابق با نتایج قابل انتظار افزایش فشار محصورکننده سبب کاهش میزان تراوایی و در نهایت افزایش مقدار آن نسبت به حالت قبل از اسپدزنی شده است.

۳-۴-۶ تراوایی ثانویه مغزه ۲۷۲۰/۱۸

با مقایسه مقادیر اشکال ۳۱-۶ و ۳۲-۶ و تعیین تراوایی نمونه در فشارهای محصورکننده مذکور، سیر کاهش تراوایی در برابر افزایش فشار جانبی مشهود می‌باشد. همچنین مقادیر تراوایی به ترتیب در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi شامل ۷۶۷/۷۳ میلی دارسی، ۴۷۶/۹۵ میلی دارسی و ۹۶/۵۳ میلی دارسی می‌باشد.



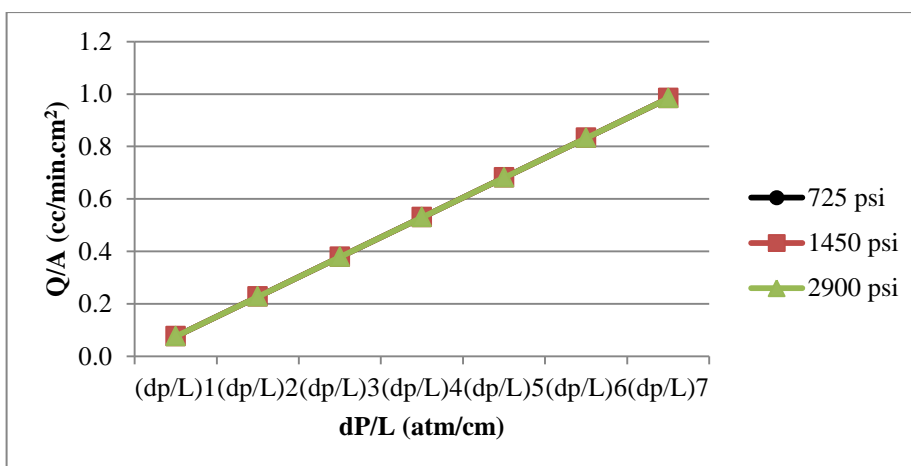
شکل ۳۱-۶. تراوایی مغزه ۲۷۲۰/۱۸ در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi.



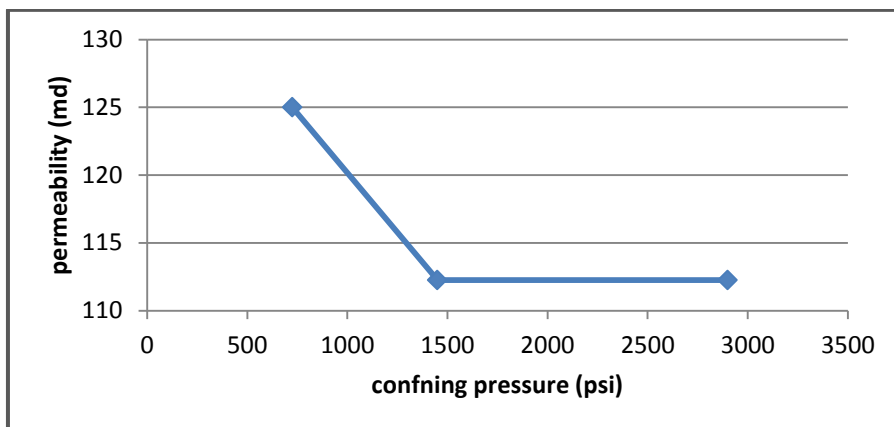
شکل ۶-۳۲. تراوایی مغزه ۲۷۲۰/۱۸ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

۴-۴-۶ تراوایی ثانویه مغزه ۲۶۸۵/۳۹

مطابق با مراحل قبل در نمونه‌ها میزان تراوایی در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi به ترتیب ۱۲۵ میلی دارسی، ۱۱۲/۲۵ میلی دارسی و ۱۱۲ میلی دارسی تعیین شده است. همچنین روند تغییرات کاهش تراوایی در اثر افزایش فشار محصورکننده بر روی نمونه با توجه به شکل ۶-۳۳ و ۶-۳۴ به وضوح مشخص است.



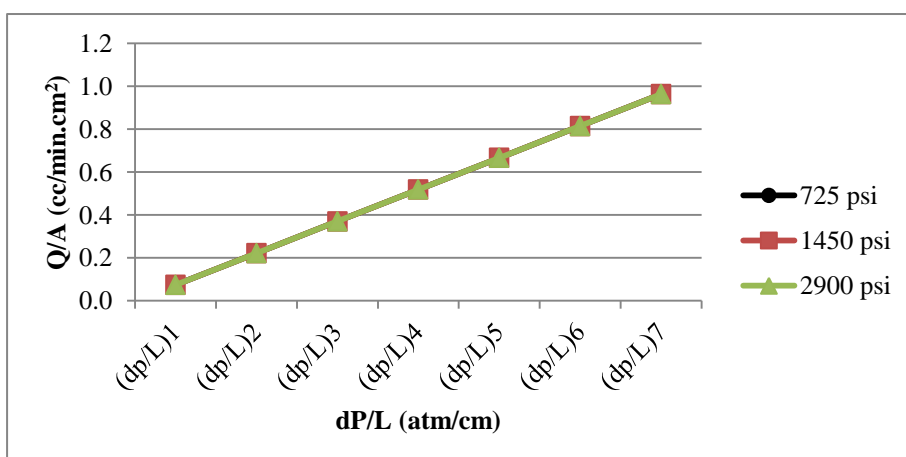
شکل ۶-۳۳. تراوایی مغزه ۲۶۸۵/۳۹ در فشارهای محصورکننده ۷۲۵ psi، ۱۴۵۰ psi و ۲۹۰۰ psi.



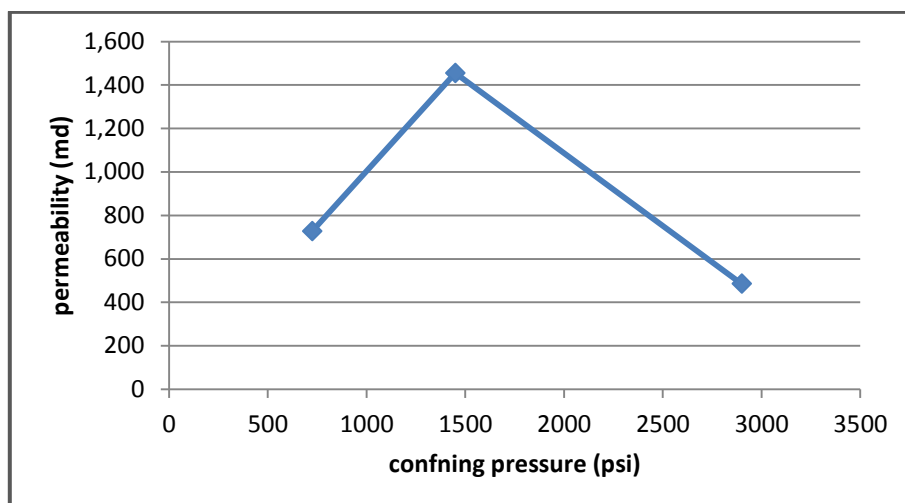
شکل ۶-۳۴. تراوایی مغزه ۲۶۸۵/۳۹ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

۵-۴-۶ تراوایی ثانویه مغزه ۲۷۱۲/۱۹

در شکل ۶-۳۵ مقدار تراوایی نمونه در فشار محصورکننده 725 psi ، $727/22$ میلی داری بدست آمده است. همچنین تراوایی در فشارهای محصورکننده 1450 psi و 2900 psi شامل مقادیر $1454/43$ میلی داری و $484/81$ میلی داری می‌باشد. در نمودار شکل ۶-۳۶ افزایش فشار محصورکننده در مقدار 1450 psi سبب افزایش میزان تراوایی در مقایسه با فشار محصورکننده 2900 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.



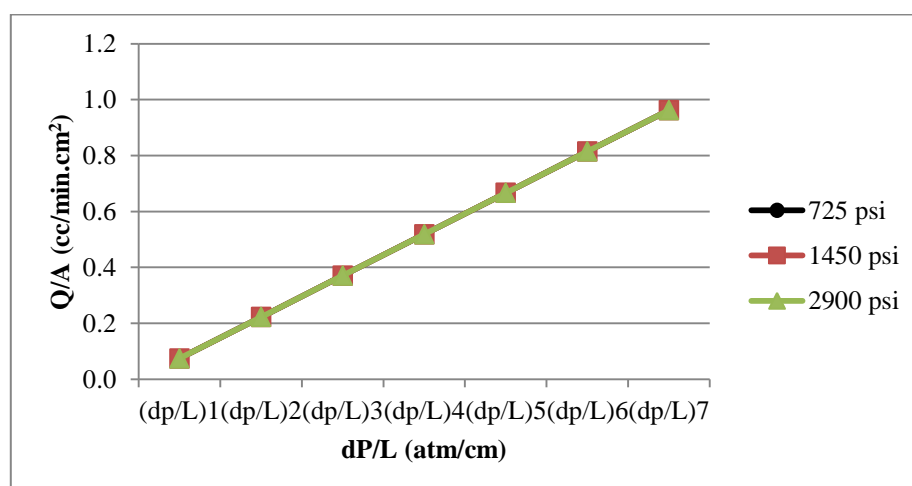
شکل ۶-۳۵. تراوایی مغزه ۲۷۱۲/۱۹ بر حسب فشارهای محصورکننده 725 psi ، 1450 psi و 2900 psi .



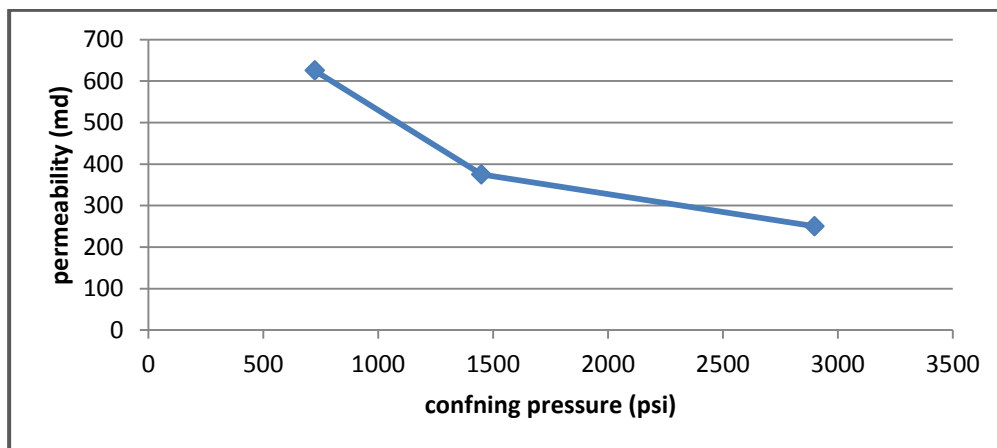
شکل ۶-۳۶. تراوایی مغزه ۲۷۱۲/۱۹ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

۶-۴-۶ تراوایی ثانویه مغزه ۲۶۹۱/۶۶

مطابق با مقادیر بدست آمده در نمودارهای اشکال ۶-۳۷ و ۶-۳۸ میزان تراوایی در فشارهای مذکور به ترتیب ۶۲۴/۸۷ میلی دارسی، ۳۷۴/۹۲ میلی دارسی و ۲۴۹/۹۵ میلی دارسی تعیین شده است. همچنین این نکته قابل ذکر است که با توجه به الگوی ظاهری مشابه در نمودارهای تراوایی نمونه مذکور، این میزان کاهش تراوایی از نظر کمیت مشابه نیست.



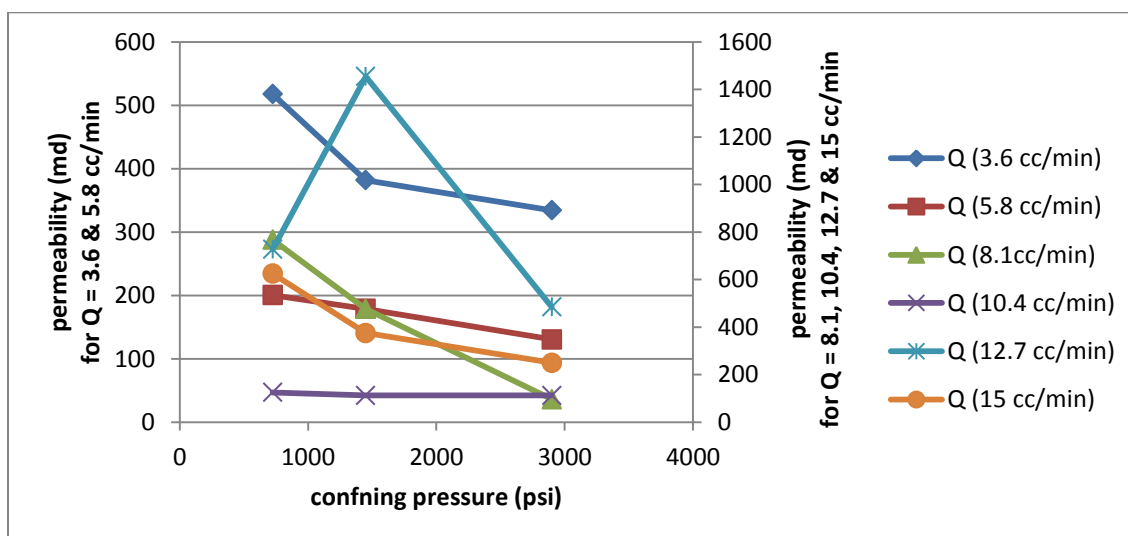
شکل ۶-۳۷. تراوایی مغزه ۲۶۹۱/۶۶ در فشارهای محصورکننده 725 psi، 1450 psi و 2900 psi.



شکل ۶-۳۸. تراوایی مغزه ۲۶۹۱/۶۶ بر حسب فشارهای محصورکننده مختلف.

نتایج بدست آمده از انجام آزمایشات نشان می‌دهد که میزان تراوایی در تمامی نمونه‌ها به جز ۲۷۱۲/۱۹ پس از عملیات اسیدزنی کاهش یافته است که این کاهش قابل پیش‌بینی بود. در نمونه ۲۷۱۲/۱۹، این افزایش را می‌توان ناشی از خطاهای غیرارادی و یا وجود برخی عوامل طبیعی کاهنده تراوایی که پیش از این اشاره شد دانست.

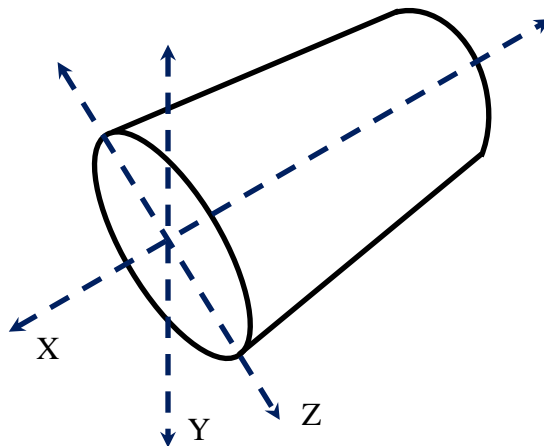
در مورد برخی نمونه‌ها مقدار تراوایی نسبت به سایر نمونه‌ها بالاست. این مقدار احتمالاً به دلیل ذات تراوایی آنها به دلیل برداشت از مناطق خاصی از مخزن می‌باشد.



شکل ۶-۳۹. روند کاهشی میزان تراوایی با افزایش مقدار فشار محصورکننده در مقادیر مختلف پس از عملیات اسیدزنی.

۶-۵ تحلیل تصاویر سی تی اسکن مغزه‌ها

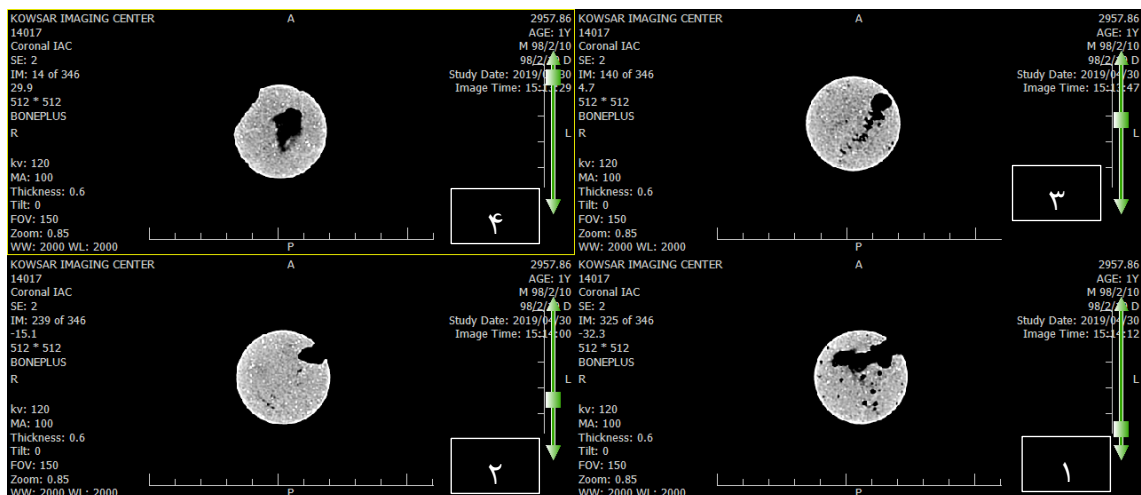
پس از اتمام آزمایش‌های اسیدزنی، جهت مطالعه ساختار داخلی مغزه‌ها، شناسایی شکستگی‌ها، نحوه‌ی ارتباط فضای متخلخل و نحوه‌ی توزیع طول حفره کرمی شکل در اثر عملیات اسیدزنی تصاویر سی تی اسکن در سه جهت مختلف و در مقاطع طولی و عرضی فراهم شده است. در نهایت با تصاویری که از سی تی اسکن انجام شده در تعداد ۳۵۰ برش در جهت طولی و ۱۸۰ برش در دو جهت عرضی مغزه بدست آمده است (شکل ۶-۴۰)؛ همچنین در نظر گرفتن زمان عملیات اسیدزنی و طول حفره کرمی شکل ایجاد شده، مناسب ترین نرخ تزریق فشار در این آزمون ارائه شده است.



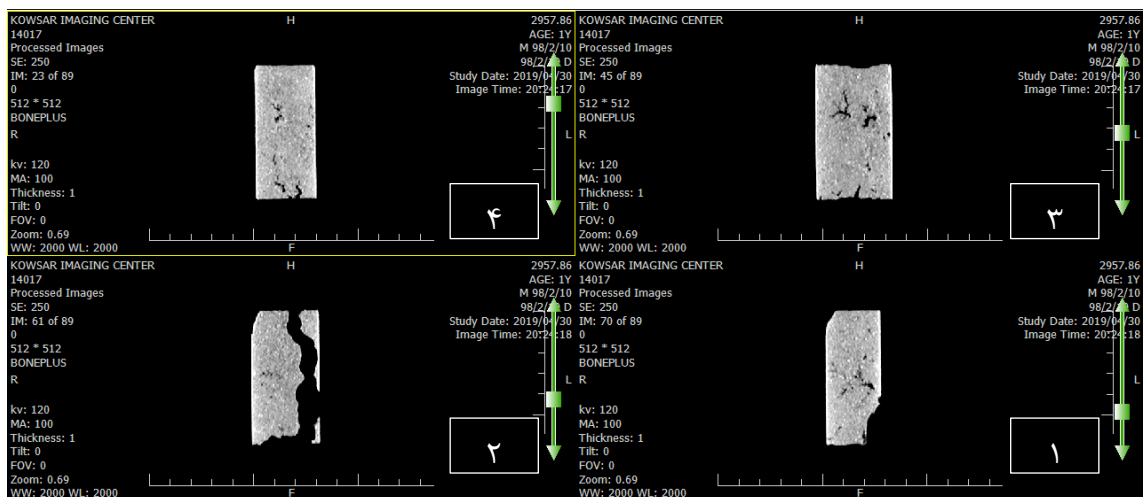
شکل ۶-۴۰. امتداد سه راستای در نظر گرفته شده برای سی تی اسکن مغزه‌ها.

۶-۵-۱ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۹۵۷/۸۶

در شکل‌های ۶-۴۱ تا ۶-۴۳ 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 ۶-۴۱، 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.



شکل ۶- ۴۱. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۵۷/۸۶ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی.



شکل ۶- ۴۲. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۵۷/۸۶ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی.



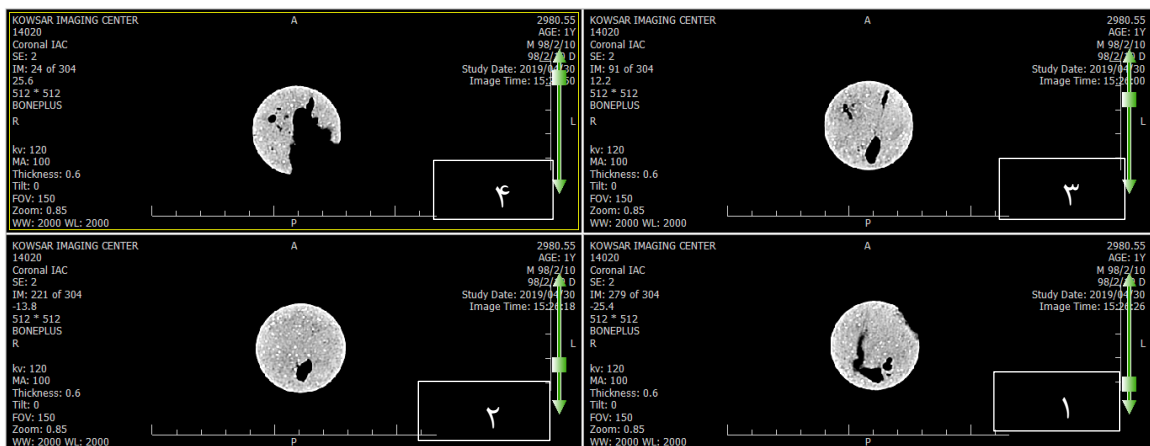
شکل ۶- ۴۳. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۵۷/۸۶ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی.

همچنین با توجه به مقاطع برشی در جهات محور Y و Z، دبی پایین تزریق

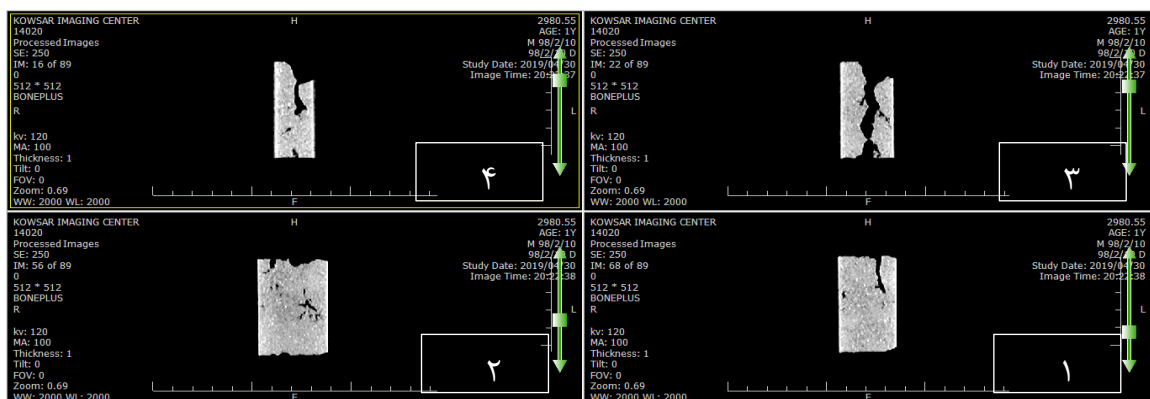
۳/۶ سی سی بر دقیقه) باعث شده که در اطراف ساختار کرمی شکل، تراکم سنگ تقریباً به میزان قابل ملاحظه‌ای حفظ شود.

۶-۵-۲ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۹۸۰/۵۵

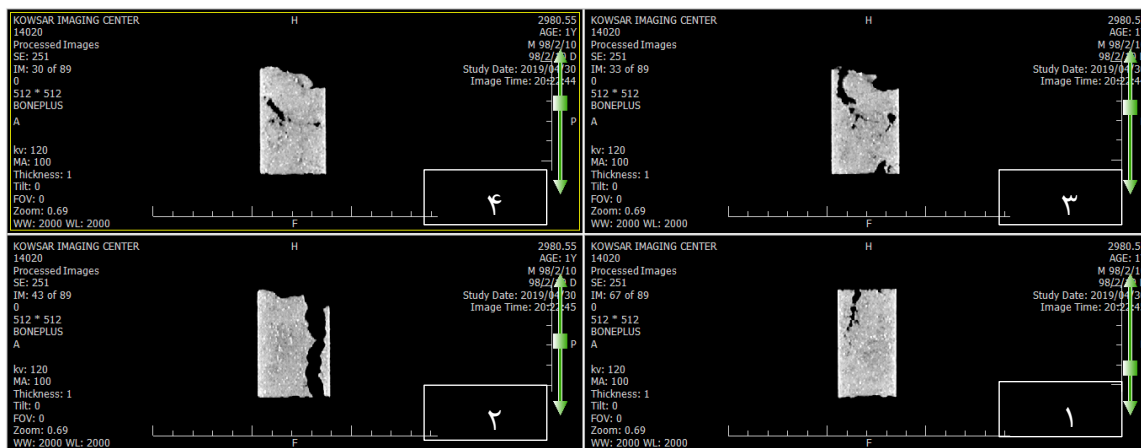
همان‌گونه که در تصاویر ۴۴-۶ تا ۴۶-۶ ملاحظه می‌گردد، با افزایش دبی تزریق (۵/۸ سی سی بر دقیقه) ساختار کرمی شکل ایجاد شده مشابه با دبی تزریق ۳/۶ سی سی بر دقیقه می‌باشد. با این تفاوت که در این نمونه تخریب بیشتری ایجاد شده است که می‌تواند به دلیل تغییر سینتیک واکنش ناشی از افزایش فشار تزریق باشد.



شکل ۶-۴۴. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۸۰/۵۵ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی.



شکل ۶-۴۵. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۸۰/۵۵ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی.

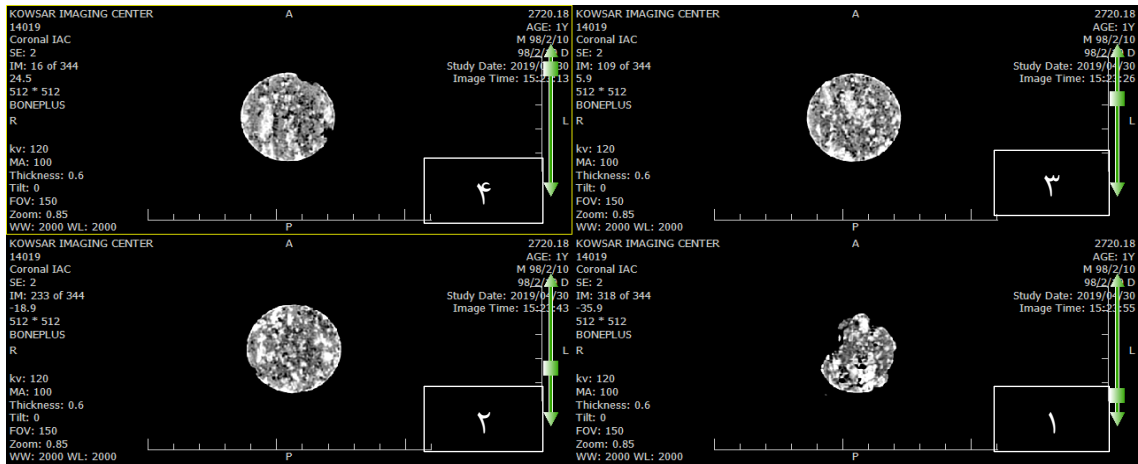


شکل ۶-۴۶. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۹۸۰/۵۵ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی.

با توجه به شکل‌های ۴۵-۶ و ۴۶-۶، حفره کرمی شکل در راستای محور Y و Z به ترتیب در مقاطع شماره ۲۲ و ۴۳ مشاهده می‌شود. علاوه بر این چنانچه در این تصاویر دیده می‌شود انسجام سنگ تقریباً حفظ شده است.

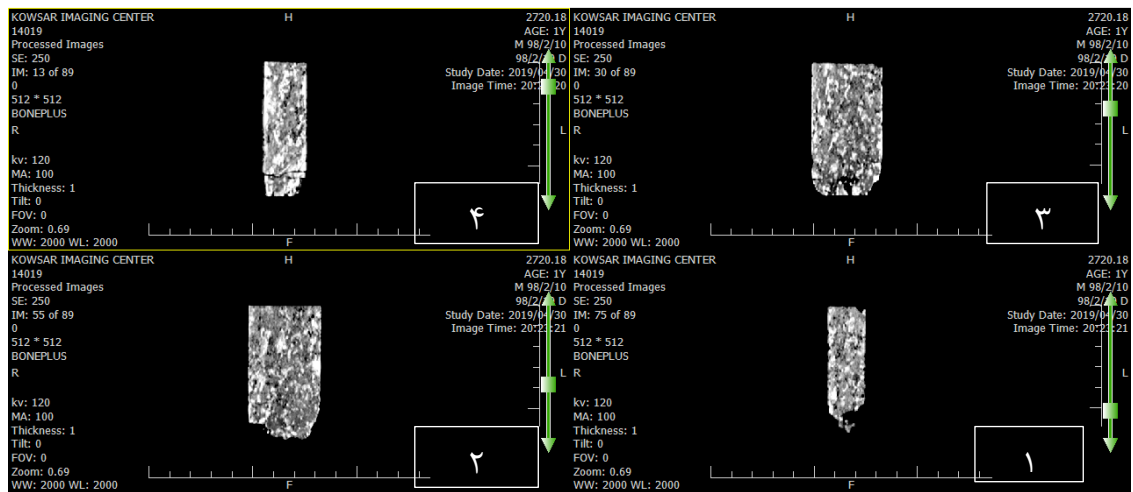
۶-۵-۳ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۷۲۰/۱۸

مطابق با تصاویر ۴۷-۶ تا ۴۹-۶، نمونه رفتاری متفاوت با دو نمونه قبلی دارد. به اینصورت 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.

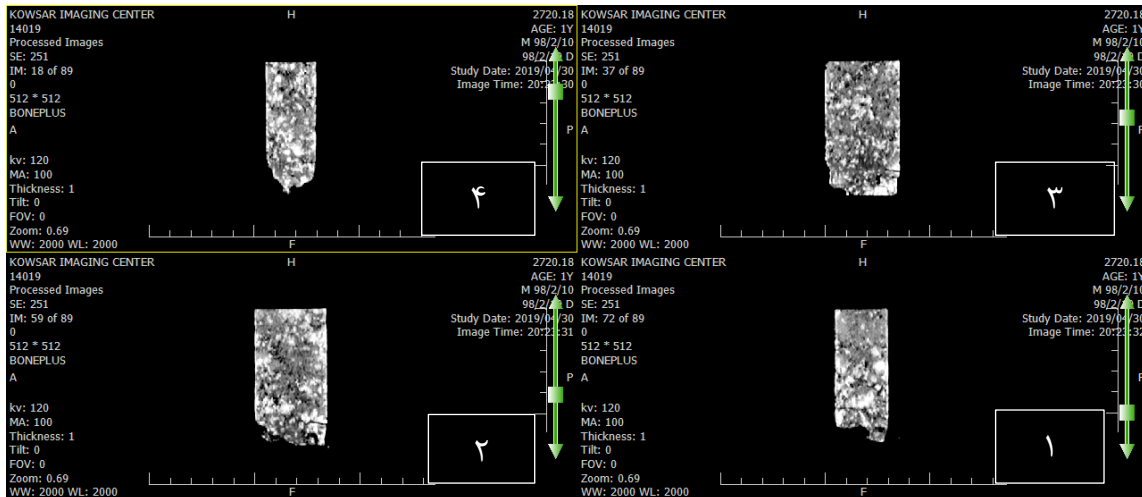


شکل ۶-۴۷. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۲۰/۱۸ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی.

این موضوع به دلیل تراوایی اولیه بالاتر این نمونه به نسبت سایر نمونه‌ها بوده و باعث رخ دادن چنین رفتاری شده است.



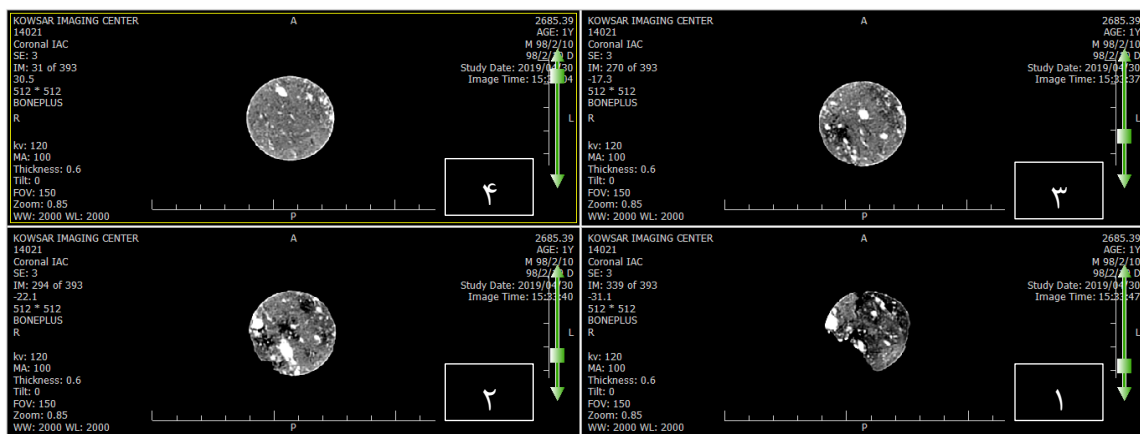
شکل ۶-۴۸. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۲۰/۱۸ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی.



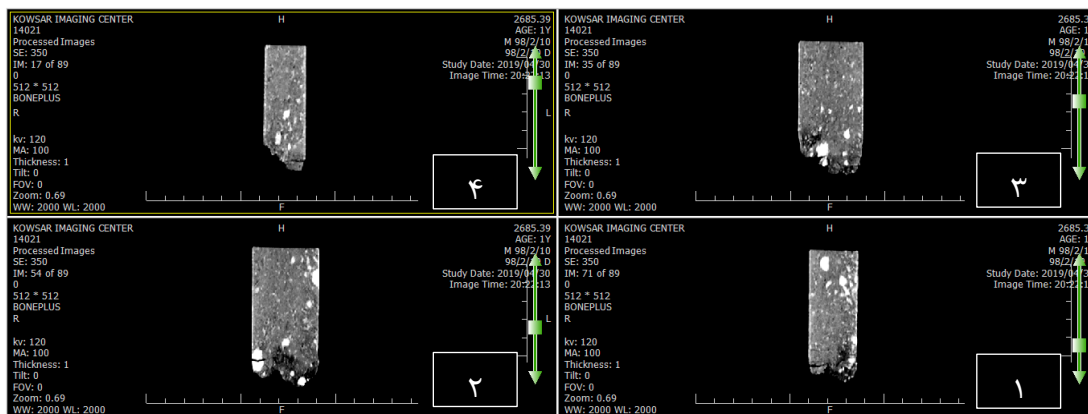
شکل ۶- ۴۹. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۲۰/۱۸ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی.

۶-۵-۴ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۶۸۵/۳۹

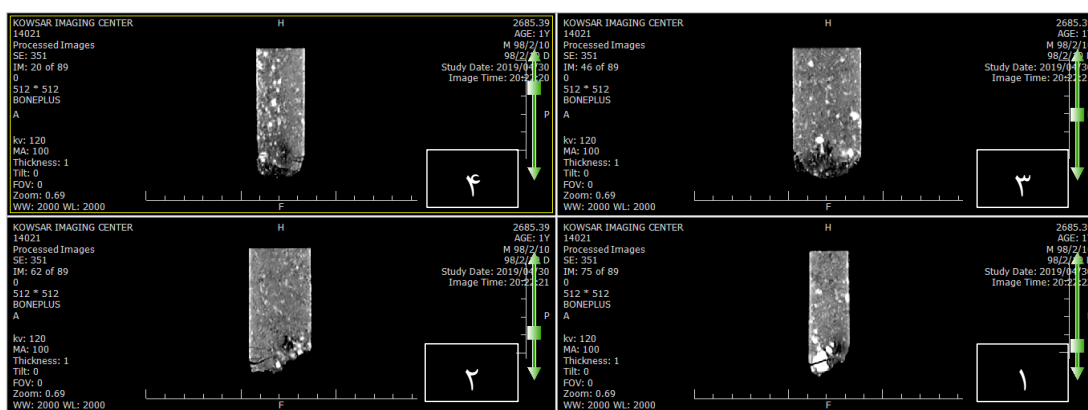
با مشاهده شکل‌های ۶-۵۰ تا ۶-۵۲ آثار هجوم اسید در ابتدای نمونه کاملاً واضح است. این نمونه نیز عملاً بدون ساختار کرمی شکل، اسید را از تمام فضای خود عبور داده است. این اتفاق به دلیل افزایش فشار ناشی از افزایش دبی تزریق است که منجر شده تا ساختار کرمی شکل پنهان موجود در سنگ تا انتهای نمونه حفظ نشود.



شکل ۶- ۵۰. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۸۵/۳۹ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی.



شکل ۶-۵۱. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۸۵/۳۹ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی.



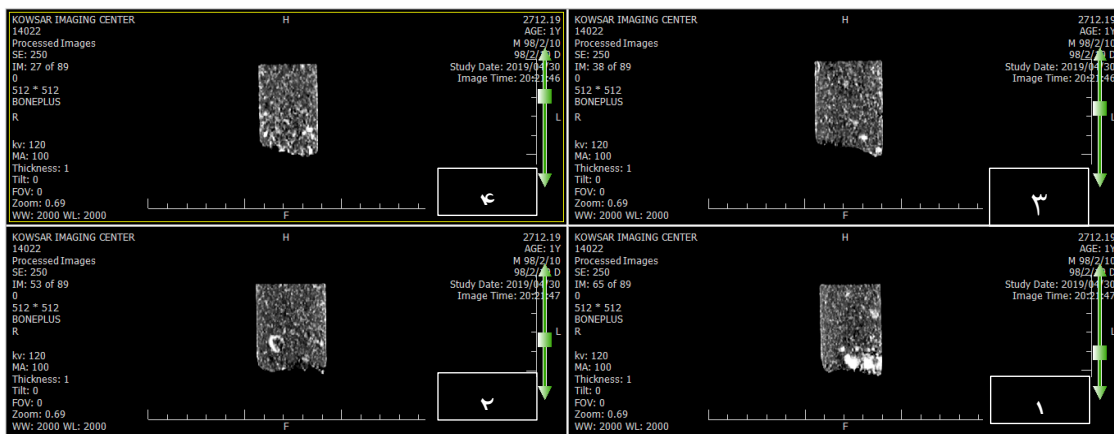
شکل ۶-۵۲. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۸۵/۳۹ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی.

۶-۵-۵ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۷۱۲/۱۹

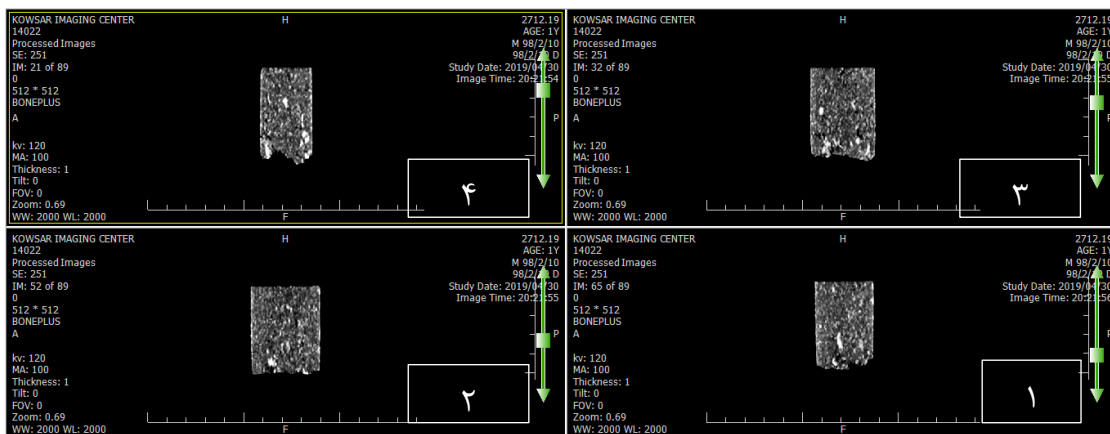
در شکل ۶-۵۳ تا ۶-۵۵ نیز در اثر تزریق اسید همانند دو نمونه قبلی در دبی‌های تزریق ۸/۱ سی سی بر دقیقه و ۱۰/۴ سی سی بر دقیقه، حفره گرمی شکل مشاهده نمی‌شود. عملاً در این نمونه تخریب صورت گرفته به ابتدای آن محدود نشده و بخش زیادی از آن را از بین برده است. شواهد موجود در تصاویر مذکور نیز حاکی از تراکم کم نمونه در بخش‌های باقی‌مانده آن است.



شکل ۶-۵۳. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۱۲/۱۹ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی.



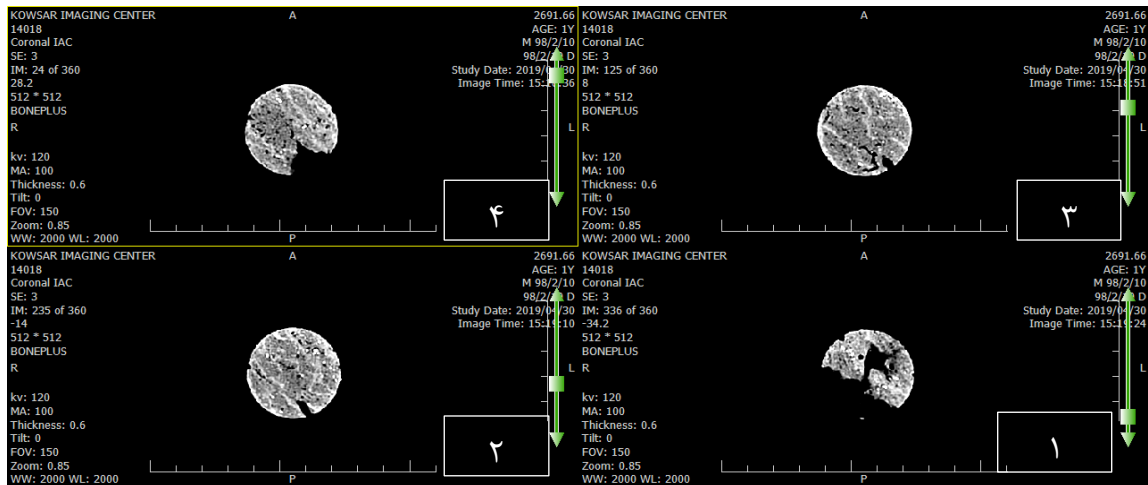
شکل ۶-۵۴. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۱۲/۱۹ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی.



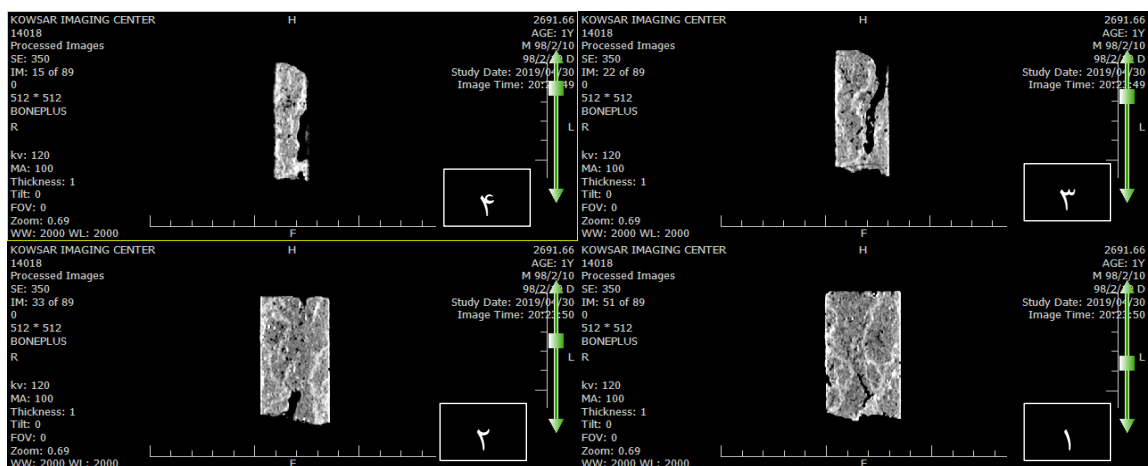
شکل ۶-۵۵. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۷۱۲/۱۹ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی.

۶-۵-۶ تصاویر سی تی اسکن مغزه ۲۶۹۱/۶۶

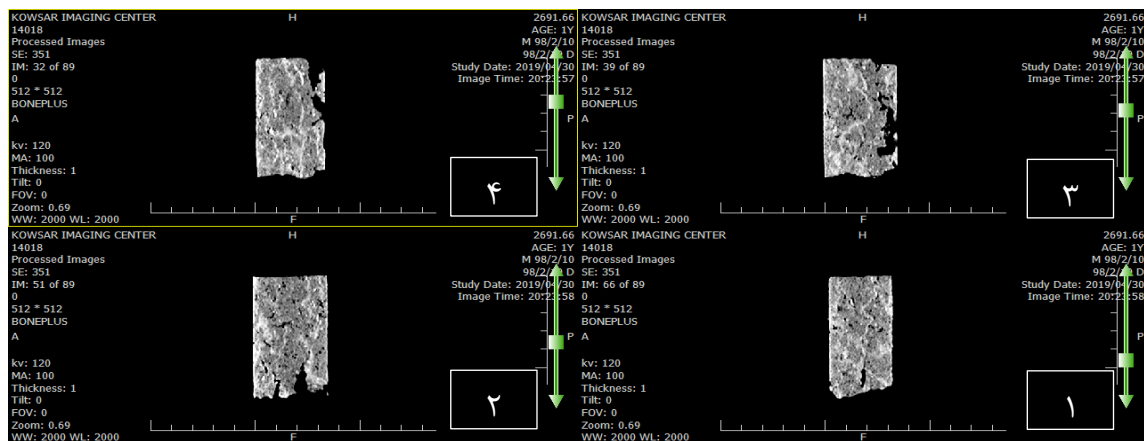
همانگونه که در شکل‌های ۶-۵۶ تا ۶-۵۸ ملاحظه می‌گردد، با توجه به مقدار تراوایی اولیه کمتری که نسبت به سایر نمونه دارد، افزایش دبی تا حداکثر میزان قابل تزریق توسط پمپ دستگاه (۱۵ سی سی بر دقیقه) باعث شده تا تلفیقی از تخریب حاصل از هجوم اولیه اسید و همچنین ایجاد ساختار کرمی شکل در نمونه اسیدزنی شده مشاهده شود. همچنین تشکیل حفره کرمی شکل در شکل ۶-۵۷، مقطع شماره ۳ در برش ۶۷ به وضوح نمایان می‌باشد.



شکل ۶-۵۶. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۹۱/۶۶ عمود بر محور X بعد از عملیات اسیدزنی.



شکل ۶-۵۷. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۹۱/۶۶ عمود بر محور Y بعد از عملیات اسیدزنی.



شکل ۶-۵۸. تصویر سی تی اسکن برش‌های مغزه ۲۶۹۱/۶۶ عمود بر محور Z بعد از عملیات اسیدزنی.

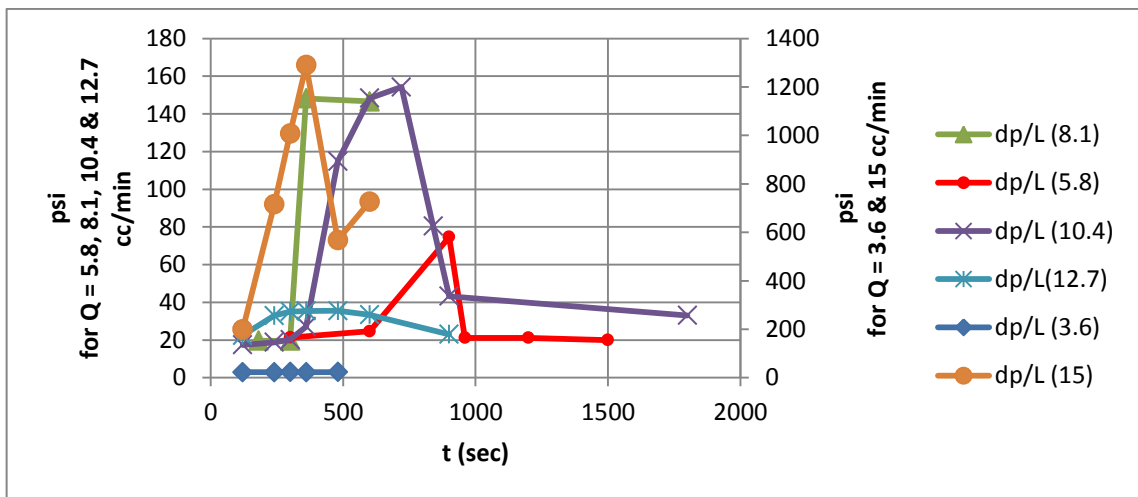
۶-۶ بحث و بررسی

با توجه به تزریق اسید در دبی‌های مختلف به درون مغزه‌ها، ساختار نفوذپذیر ایجاد شده در نمونه‌ها به اشکال متفاوتی ایجاد شده است. همانطور که در فصول قبل 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) بطور مناسبی مشاهده کرد.

بررسی نتایج رخ داده نشان می‌دهد که افزایش تراوایی مغزه‌ها به میزان قابل قبولی در تمامی آنها مشاهده می‌شود. اما در سه نمونه ۲۹۵۷/۸۶، ۲۹۸۰/۵۵ و ۲۶۹۱/۶۶، آثار ایجاد ساختار کرمی شکل به وضوح دیده می‌شود. در سه نمونه دیگر، این ساختار یا ایجاد نشده و یا بصورت 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 به وضوح ملاحظه می‌گردد.

نکته قابل توجه در مورد سه نمونه ۲۹۵۷/۸۶، ۲۹۸۰/۵۵ و ۲۶۹۱/۶۶، نمودار افت فشار مربوط به دو سر مغزه نسبت به زمان است. در مورد نمونه ۲۹۵۷/۸۶ که متناظر با دبی تزریق ۳/۶ می‌باشد، افت

فشار حدوداً در زمان ۳۰۰ ثانیه رخ می‌دهد. در مورد نمونه ۲۹۸۰/۵۵، این اتفاق پس از حدوداً ۹۰۰ ثانیه حادث می‌شود و در مورد نمونه ۲۶۹۱/۶۶، پس از حدوداً ۳۶۰ ثانیه این اتفاق رخ می‌دهد (شکل ۶-۵۹). بنابراین شرایط تزریق طبق برنامه اجرا شده برای دو نمونه ۲۹۵۷/۸۶ و ۲۶۹۱/۶۶، مناسب‌تر از نمونه ۲۹۸۰/۵۵ می‌باشد. این درحالیست 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 ۶-۱). بدین منظور از مقادیر میانگین برای محاسبه تراوایی اولیه (جدول ۶-۲) و ثانویه (جدول ۶-۳) می‌توان استفاده کرد.



شکل ۶-۵۹. مقایسه آثار هجوم اسید در دبی‌های تزریق متفاوت.

جدول ۶-۱. مقایسه میانگین تراوایی مغزه‌ها قبل و بعد از عملیات اسیدزنی.

K2/k1	میانگین تراوایی ثانویه (k2)	میانگین تراوایی اولیه (k1)	دبی تزریق (cc/min)	نمونه	ردیف
۲۸۵/۵۹	۴۱۱/۲۶	۱/۴۴	۳/۶	۲۹۵۷/۸۶	۱
۵۳/۴۱	۱۶۹/۸۵	۳/۱۸	۵/۸	۲۹۸۰/۵۵	۲
۱/۱۳	۴۴۷/۰۷	۳۹۶/۰۵	۸/۱	۲۷۲۰/۱۸	۳
۳/۵۳	۱۱۶/۵۰	۳۲/۹۸	۱۰/۴	۲۶۸۵/۳۹	۴
۲۵/۰۴	۸۸۸/۸۲	۳۵/۵۰	۱۲/۷	۲۷۱۲/۱۹	۵
۵۳۴/۰۷	۴۱۶/۵۸	۰/۷۸	۱۵/۰	۲۶۹۱/۶۶	۶

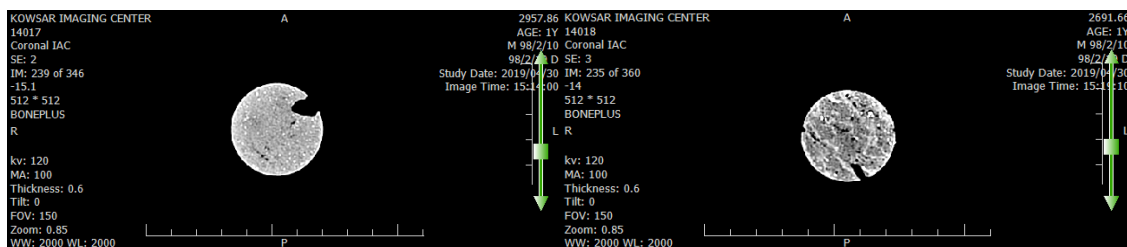
جدول ۶-۲. مقایسه تراوایی مغزه‌ها قبل از عملیات اسیدزنی در فشارهای محصورکننده مختلف.

مقادیر تراوایی در فشارهای محصورکننده مختلف			نمونه	ردیف
فشار محصورکننده psi ۲۹۰۰	فشار محصورکننده psi ۱۴۵۰	فشار محصورکننده psi ۷۲۵		
۱/۱۷	۱/۳۴	۱/۸۲	۲۹۵۷/۸۶	۱
۳/۰۱	۳/۱۸	۳/۳۵	۲۹۸۰/۵۵	۲
۸/۸۴	۷۰۷/۵۹	۴۷۱/۷۳	۲۷۲۰/۱۸	۳
۱۳/۰۸	۳۱/۴۳	۵۴/۴۴	۲۶۸۵/۳۹	۴
۷/۰۳	۲۷/۸۵	۷۱/۶۲	۲۷۱۲/۱۹	۵
۰/۰۵۲	۰/۰۹	۰/۹۳۴	۲۶۹۱/۶۶	۶

جدول ۶-۳. مقایسه تراوایی مغزه‌ها بعد از عملیات اسیدزنی در فشارهای محصورکننده مختلف.

مقادیر تراوایی در فشارهای محصورکننده مختلف			نمونه	ردیف
فشار محصورکننده psi ۲۹۰۰	فشار محصورکننده psi ۱۴۵۰	فشار محصورکننده psi ۷۲۵		
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

ضمن اینکه تأثیر اسید در نمونه ۲۶۹۱/۶۶، به تشکیل حفرات کرمی شکل محدود نمی‌شود؛ بلکه نتایج سی‌تی اسکن در شکل ۶-۶۰ نشان می‌دهد که در قیاس با ساختار مشابه رخ داده نسبت به نمونه ۲۹۵۷/۸۶، تراکم فضای اطراف حفره اصلی نیز به مراتب کاهش یافته است.

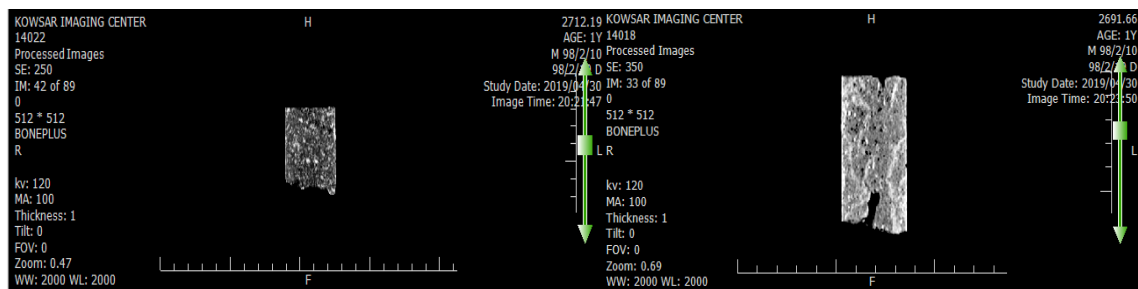


نمونه ۲۹۵۷/۸۶

نمونه ۲۶۹۱/۶۶

شکل ۶-۶۰. مقایسه تراکم فضای اطراف حفره کرمی شکل ایجاد شده در مغزه.

همچنین با توجه به شکل ۶-۶۱ و قیاس با ساختار مشابه ایجاد شده در نمونه ۲۷۱۲/۱۹، در اثر هجوم اسید طول نمونه آسیب خیلی کمتری دیده و حفره کرمی شکل به وضوح در آن تشکیل شده است.



نمونه ۲۷۱۲/۱۹

نمونه ۲۶۹۱/۶۶

شکل ۶-۶۱. مقایسه آثار هجوم اسید در اثر تزریق و تشکیل حفره کرمی شکل.

۶-۷ جمع بندی

با توجه به موارد مذکور، مشاهده می شود که تراوایی نمونه ۲۶۹۱/۶۶، بیش از ۵۳۰ برابر و تراوایی نمونه ۲۹۵۷/۸۶ بیش از ۲۸۵ برابر افزایش داشته است. این میزان برای نمونه ۲۹۸۰/۵۵ بیش از ۵۳ برابر بوده و در خصوص مابقی نمونه‌ها، مقدار کمتری دارد. این موضوع نشان می‌دهد که تشکیل حفرات کرمی شکل کامل درون نمونه‌ها در افزایش تراوایی آنها نقش مهمی ایفا کرده است. بنابراین با در نظر گرفتن موضوع زمان تأثیر و میزان افزایش تراوایی، می‌توان نمونه ۲۶۹۱/۶۶ و مقادیر متناظر با آن را به عنوان نمونه‌های برتر در اجرای قابل قبول عملیات اسیدزنی انتخاب کرد. چرا که از نظر زمانی اختلاف چندانی با نتیجه بدست آمده نسبت به نمونه ۲۹۵۷/۸۶ ندارد اما در مورد تراوایی، افزایش چشمگیری دارد. بنابراین شرایط طراحی شده برای آن را می‌توان به عنوان نتایج مطلوب این پژوهش برگزید.

فصل ہفتم : نتیجہ گیری و پیشہادات

۷-۱ نتیجه گیری

۱- نتایج آزمایشات نشان می‌دهد در تمامی نمونه‌ها افزایش تراوایی به میزان قابل توجهی رخ داده است. این افزایش حتی در نمونه ۱۸/۲۷۲۰ که تراوایی اولیه بالایی از خود نشان داده نیز به روشنی دیده می‌شود.

۲- با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مشاهده می‌شود که تراوایی نمونه ۲۶۹۱/۶۶، بیش از ۵۳۰ برابر و تراوایی نمونه ۲۹۵۷/۸۶ بیش از ۲۸۵ برابر افزایش داشته است. این میزان برای نمونه ۲۹۸۰/۵۵ بیش از ۵۳ برابر بوده و در خصوص مابقی نمونه‌ها، مقدار بسیار کمتری دارد. این موضوع نشان می‌دهد که تشکیل حفرات کرمی شکل کامل درون نمونه‌ها در افزایش تراوایی آنها نقش مهمی ایفا کرده است.

۳- 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، به وضوح دیده می‌شود. دلیل این امر را می‌توان نزدیک شدن ذرات تشکیل دهنده سنگ به یکدیگر و در نتیجه کاهش فضاهای خالی ما بین آنها دانست.

۴- مقایسه تراوایی اولیه و ثانویه نمونه‌ها حاکی از افزایش ۵۳۰ برابری تراوایی نمونه ۲۶۹۱/۶۶ است که درخور توجه می‌باشد. این افزایش همراه با ساختار غالب حفره‌ی شکل گرفته در ماتریس اثر پذیرفته از اسید است؛ فلذا افزایش تراوایی با شکل‌گیری حفره غالب اتفاق افتاده که کاملاً مورد پذیرش می‌باشد.

۵- مقایسه زمان عبور اسید از طول نمونه‌ها نشان می‌دهد زمان تأثیر اسید تزریق شده با نرخ ۱۵ سی‌سی بر دقیقه با توجه به افزایش تراوایی کاملاً مطلوب است.

۶- نتایج اسیدکاری نشان می‌دهد که افزایش تراوایی با توجه به الگوی حفره کرمی شکل

تشکیل شده در ساختار سنگ در مورد دو نمونه‌ی ۲۶۹۱/۶۶ و ۲۹۵۷/۸۶ کاملاً قابل قبول بوده و حفره کرمی شکل به صورت مناسبی در هر دو تشکیل شده است. این ساختار در خصوص نمونه ۲۶۹۱/۶۶ با نرخ تزریق ۱۵ سی‌سی بر دقیقه بیانگر ساختار غالب می‌باشد که با نتایج وانگ و همکاران (۱۹۹۳) نیز مطابقت دارد.

۲-۷ پیشنهادها

در این پژوهش، مطالعه آزمایشگاهی بررسی تأثیر تراوایی اولیه سنگ کربناته در تعیین نرخ بهینه تزریق اسید مورد بررسی قرار گرفت. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های بعدی موارد زیر مورد تحقیق قرار گیرند:

۱- آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های کربناته با تنوع تخلخل بیشتر، دمای مختلف، تغییر نوع اسید مصرفی و غلظت‌های متفاوت انجام شود.

۲- در صورت امکان، قبل از انجام آزمایشات اسیدزنی، آزمایش سی‌تی اسکن از نمونه‌ها گرفته شود تا اطلاعات بهتری از بافت و ساختار داخلی آنها بدست آید.

۳- با توجه به مخرب بودن آزمایش‌های اسیدزنی بخش‌هایی از نمونه در حین انجام آزمایش بر اثر انحلال در اسید از بین می‌رود. این موضوع منجر به کاهش میزان مقاومت سنگ قرار گرفته، تحت فشارهای وارده می‌شود. از آنجاییکه چنین رخدادی نیازمند داشتن شناختی دقیق در خصوص بازه مقاومتی نمونه‌ها است؛ در صورت امکان تهیه نمونه‌های بیشتر می‌توان با انجام آزمایش‌های مقاومتی، شناخت کافی در این خصوص بدست آورد تا بتوان طراحی دقیق‌تری نسبت به محدوده مجاز اعمال فشارهای مختلف انجام داد.

۴- در صورت امکان دسترسی به اطلاعات کامل و کافی از نمونه‌های مخزنی مورد مطالعه به مدلسازی فرآیند اسیدکاری با استفاده از نرم افزار Frac CADE پرداخته و نتایج آن با مطالعه آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق مقایسه گردد.

مراجعة

آقایی، ا. ردائی، ع. (۱۳۹۱)، "مطالعه و بررسی اسیدزنی ماتریسی در مخازن کربناته جهت افزایش تراوایی"، دومین همایش نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گچساران.

توفیقی، ج. (۱۳۷۱)، "کتابچه مهندسی بهره‌برداری و تولید"، شرکت نفت مناطق نفت‌خیز جنوب.

چراغی، ر. (۱۳۹۳)، "بررسی اسیدهای آلی مورد استفاده در عملیات اسید کاری به منظور افزایش تولید در مخازن کربناته"، کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی، تهران.

لطفی، م. (۱۳۹۷)، "تجهیزات آزمایشگاهی مطالعات هیدروکربوری دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک". دانشگاه صنعتی شاهرود. ۵۱ صفحه.

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

عادل‌زاده، م. (۱۳۹۳)، "مبانی مهندسی بهره‌برداری نفت و گاز"، تهران: انتشارات راه نوین.

یاوری، ع. (۱۳۸۳)، "شیمی عمومی ۱" (تألیف چارلز مورتمیر)، تهران: مرکز نشر علوم دانشگاهی.

عسکری، م. معصومیان، م. (۱۳۹۱)، "اصول مهندسی مخازن هیدروکربوری" (تألیف طارق احمد)، تهران: انتشارات ستایش.

- Abou-Sayed IS, Shuchart CE, Gong M (2005) Well Stimulation Technology for Thick Carbonate Reservoirs. International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, 21-2.
- Al-Ghamdi AH, Mahmoud MA, Wang G, Hill AD, Nasr-El-Din HA (2014) Acid diversion by use of viscoelastic surfactants: the effects of flow rate and initial permeability contrast. SPE J. 1203–1216
- Anderson MS, Fredrickson SE (1987) Dynamic Etching Tests Aid Fracture Acidizing Treatment Design. Low Permeability Reservoirs Symposium. Society of Petroleum Engineers.
- Bazin B (2001) From matrix acidizing to acid fracturing: a laboratory evaluation of acid/rock interactions. SPE Production & Facilities 16(1): 22-29.
- Ben-Naceur K, Economides MJ (1989) Acid Fracture propagation and production in Reservoir Stimulation, M.J. Economides and K.G. Nolte, eds., prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, Chap.18.
- Buijse MA (1997) Understanding Wormholing Mechanisms Can Improve Acid Treatments in Carbonate Formations. SPE European Formation Damage Conference, The Hague, Netherlands.
- Buijse MA, Glasbergen G (2005) A Semiempirical Model to Calculate Wormhole Growth in Carbonate Acidizing. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 9-12.
- Cohen, C.E., Ding, D., Quintard, M., Bazin, B., (2008) From pore scale to wellbore scale: impact of geometry on wormhole growth in carbonate acidization. Chem Eng. Sci. 63, 3088–3099.
- Cruz-Maya, J.A., Rosas-Flores, J.A., Godoy-Alcantar, M., Jan-Roblero, J., Silva, F.S., (2011) A real-time virtual monitoring system of the skin factor for matrix acidizing treatments. Flow Meas. Instrum. 22, 413–420.
- Daccord G (1987) Chemical Dissolution of a Porous Medium by a Reactive Fluid. Physic Review Letters 58(5): 479-482.

- Daccord G, Lennormand R (1987) Fractal Patterns from Chemical Dissolution. *Nature*, 325: 41-43.
- Daccord G, Touboul E, Lenormand R (1989) Carbonate Acidizing: Toward a Quantitative Model of the Wormholing Phenomenon. *SPE Production Engineering* 4(1): 63-68. SPE-16887-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/16887-PA>.
- Economides MJ, Hill AD, Ehlig-Economides C, Zhu D (2013) *Petroleum Production Systems*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Fredd CN, Fogler HS (1999) Optimum Conditions for Wormhole Formation in Carbonate Porous Media: Influence of Transport and Reaction. *SPE Journal* 4(3): 196-205.
- Frick T, Mostofizadeh B, Economides M (1994) Analysis of Radial Core Experiments of Hydrochloric Acid Interaction with Limestones. *International Symposium on Formation Damage Control*, Lafayette, Louisiana 7-10.
- Furui K, Burton RC, Burkhead DW (2012) A Comprehensive Model of High-Rate Matrix-Acid Stimulation for Long Horizontal Wells in Carbonate Reservoirs; Part I-Scaling up Core-Level Acid Worm-holing to Field Treatments. *SPE Journal* 17(1): 271-279.
- Gdanski RD (1994) SPE, Halliburton Energy services. Fluosilicate Solubilities Affect HF acid Compositions, *SPE Production & Facilities*, 27404-PA.
- GDANSKI RD (1999) Kinetic of the secondary reaction of HF on ALUMINO-SILICATES. *SPE production & facilities*. 14(4): 260-268.
- Glasbergen G, Kalia N, Talbot MS (2009) The Optimum Injection Rate for Wormhole Propagation. Myth or Reality Presented at the SPE European Formation Damage Conference, Scheveningen, The Netherlands, 27-29.
- Golfier F, Bazin B, Zarcone C (2001) Acidizing Carbonate Reservoirs: Numerical Modeling of Wormhole Propagation and Comparison to Experiments. Presented at the SPE European Formation Damage Conference, The Hague, Netherlands, 21-22.
- Grebe S (1935) Production enhancement with acid simulation.
- Ghommam, M., Dyer, S., Zhao, W., (2014) Carbonate acidizing: model development and analysis of wormhole formation. *Schlumberger J. Model. Simul.* 5, 63–71.
- Halliburton (2000) Halliburton Hydraulic Fracturing: Over 60 Years of Successful Performance Focused on the Environment.
- Halliburton (2005) SurgiFrac service – Fracture Stimulation SeTechnique for Horizontal Completions in Low- to Medium-Permeability Reservoirs
- Hoefner ML, Fogler HS (1988) Pore Evolution and Channel Formation During Flow and Reaction in Porous Media. *AiChE Journal* 34(1): 45-54.
- Hoefner ML, Fogler HS (1989) Fluid-velocity and reaction-rate effects during carbonate acidizing. application of network model. *SPE production engineering* 4(1): 56-62.
- Hung KM, Hill AD, Sepehrnoori K (1989) A Mechanistic Model of Wormhole Growth in Carbonate Matrix Acidizing and Acid Fracturing. *IPT* 41(1): 59-66.
- Kalia N, Balakotaiah V (2009) Effect of Medium Heterogeneities on Reactive Dissolution of Carbonates. *Chemical Engineering Science* 64: 376-390.
- Kumar R, He J, Nasr-El-Din HA (2014) Effect of oil saturation on acid propagation during matrix acidization of carbonate rocks. *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Maracaibo, Venezuela.
- Lo KK, Dean RH, (1989) Modeling of Acid Fracturing. *SPEPE*. PP. 194-200.
- Mazel JM, Poitrenaud HM, Mbouyou PEM (2007) Acid Stimulation of Extended Reach Wells: Lessons Learnt From N’Kossa Field. *SPE European Formation Damage Conference*, Scheveningen, The Netherlands.

- McDuff D, Jackson S, Shuchart C (2010) Understanding Wormholes in Carbonates: Unprecedented Experimental Scale and 3D Visualization. *Journal of Petroleum Technology* 62(10): 78-81.
- McLeod HO (1984) Matrix acidizing. *Journal of Petroleum Technology* 36(12): 2-055.
- Mostofizadeh B, Economides MJ (1994) Optimum Injection Rate from Radial Acidizing Experiments. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana*, 25-28.
- Nevito Gomez J (2006) Design, set up, and testing of a matrix acidizing apparatus. Diss. Texas A & M University.
- Nierode DE, Williams BB (1972) Characteristics of Acid Reactions in Limestone formations. *SPEJ*, pp. 306-314.
- Paccaloni G, Tambini M (1993) Advances in matrix stimulation technology. *Journal of Petroleum Technology* 45(3): 256-263.
- Panga MKR, Ziauddin M, Balakotaiah V (2005) Two scale continuum model for simulation of wormholes in carbonate acidization. *AIChE journal*, 51(12): 3231-3248.
- Pichler T, Frick TP, Economides MJ, Nittmann J (1992) Stochastic Modeling of Wormholing Growth with Biased Randomness. *SPE paper* 25004.
- Roberts LD, Guin JA (1974) The Effect of surface Kinetics in Fracture Acidizing. *SPEJ*, PP.385-396, *Trans. AIME*, 257.
- Russell John, (2004) *Fundamentals of enhanced oil recovery*. University of Texas at Austin. First edition.
- Schechter RS, (1992) *Oil well stimulation*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Schechter RS, Gidley JL (1969) The Change in pore Size Distribution from surface Reaction in porous Media. *AIChE J.*, 15: 339-350.
- Settari A (1991) Modeling of Acid Fracturing Treatment. *SPE Paper* 21870.
- Talbot MS, Gdanski RD (2008) Beyond the Damköhler Number: A New Interpretation of Carbonate Wormholing. Presented at the Europec / EAGE Conference and Exhibition, Rome, Italy, 9-12.
- Terrill RM (1965) Heat Transfer in Laminar Flow between parallel porous plates. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8:1491-1497.
- Wang Y, Hill AD, Schechter RS (1993) The optimum injection rate for matrix acidizing of carbonate formations. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Williams BB, Gidley IL, Schechter RS (1979) *Acidizing Fundamentals*, Monograph Series, Richardson, TX: SPE.
- Zakaria AS, Nasr-El-Din HA, Ziauddin M (2015) Predicting the Performance of the Acid-Stimulation Treatments in Carbonate Reservoirs With Nondestructive Tracer Tests.
- Ziauddin M, Bize E (2007) The Effect of Pore-Scale Heterogeneities on Carbonate Stimulation Treatments. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, Kingdom of Bahrain.

Abstract

Permeability is one of the dynamic parameters of the reservoir in calculating the performance of projects for the uptake of oil and gas reservoirs. Rate production and final recycling rates are heavily influenced by this parameter, but this parameter is low in some carbonate reservoirs and requires an appropriate solution to increase it. In the meantime, acidizing operations are one of the most common methods for increasing oil and gas production and the utilization rate of reservoirs. Hence, in this study, the purpose of this study was to investigate the effect of injection and confining pressure in a laboratory study of the permeability of reservoir rocks during acid-bed corrosive operations. Considering this approach, 6 samples of carbonate reservoir rock from one of Iran's oil fields have been prepared. After determining the physical and mechanical properties of the samples, the effect of the confining pressure and the injection pressure on Permeability variations and optimal flow rates were studied. Examination of the results of the experiments as well as the CT scans of the samples after acidizing operation showed that permeability increased to an acceptable level in all samples. In lower injection rates, the acid has enough time to react with the rock, wormhole are well-formed, and the rest of the sample space retains its density to a large extent, but with increasing acid injection rates, there are wormhole Changing itself with the complete destruction of the Primary core section, and the remaining density has been reduced. This is accompanied by a combination of the two above-mentioned behaviors, with increasing the rate to a maximum of 15 cc / min. This has led to an increase of over 530 times permeability over the initial value of the sample. However, there is a slight difference between the formation time of the formation of Wormholes in the injected sample with maximum discharge and the sample injected with a minimum of (3.6 cc / min). However, there is a slight difference between the formation time of the formation of Wormhole in the injected sample with maximum rate and the sample injected with a minimum of (3.6 cc / min).

Key words: Acidizing, permeability, CT scans, Wormholes, acid injection rate, confining pressure, carbonate reservoirs



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Rock Mechanics

Experimental Investigation of the Carbonate Rock Initial Permeability in Determining the Optimal Acid Injection Rate

By:

Farnaz Sheikhi Bojani

Supervisor:

Dr. Ahmad Ramezanzadeh

July 2019