

بررسی آزمایشگاهی اثر تزریق اسید بر میزان بازشدگی شکاف در مخازن شکاف‌دار دولومیتی و کلسیتی

علیرضا تیموری، سعید صادق‌نژاد*، امیرحسین سعیدی دهقانی

گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۸

چکیده

اسید کاری یکی از روش‌های پرکاربرد در فرآیند تحریک چاه به منظور افزایش بازده تولید آن است. در این بین، اسیدکاری در مخازن کربناته شکاف‌دار سبب می‌شود تا در اثر واکنش میان اسید تزریق شده و سنگ کربناته، کانی‌های سطح شکاف در اسید حل شده و به دنبال آن، میزان بازشدگی شکاف در حین فرآیند تزریق اسید تغییر یابد. تغییرات میزان بازشدگی شکاف، سبب حرکت بهتر و راحت‌تر سیال تزریقی/نفت در آن شده و میزان تولید از این میادین را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این نوع از مخازن، پارامترهایی همچون دمای مخزن، دبی تزریق اسید و نوع اسید تزریقی پارامترهایی هستند که به صورت مستقیم بر روی میزان واکنش میان اسید تزریق شده و سنگ کربناته اثرگذار هستند. در این مقاله، به بررسی تزریق استیک اسید درون دو نمونه سنگ کربناته دولومیتی و کلسیتی شکاف‌دار پرداخته شده و اثر نوع سنگ و دبی تزریق اسید بر روی میزان باز شدگی نهایی شکاف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی تزریق اسید نشان می‌دهد که سنگ‌های دولومیتی به دلیل نوع کانی‌های موجود در آنها، واکنش‌پذیری کمتری با اسید تزریقی داشته و در نتیجه، میزان بازشدگی شکاف در آنها کمتر از نمونه سنگ‌های کلسیتی تغییر می‌نماید. از سوی دیگر با کاهش دبی تزریق اسید، میزان بازشدگی نهایی شکاف پس از تزریق اسید افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق شناخت بهتری از تزریق اسید در مخازن کربناته شکاف‌دار فراهم می‌آورد.

کلمات کلیدی: اسید ضعیف، سنگ کربناته، دبی تزریق اسید، بازشدگی شکاف، کلسیت، دولومیت

مقدمه

گرفته‌اند. یکی از این روش‌ها که در مخازن کربناته مورد استفاده قرار می‌گیرد، اسید کاری است. مخازن کربناته ممکن است در حین عملیات حفاری، تکمیل چاه و یا هنگام بهره‌برداری دچار آسیب شوند که این آسیب باعث کاهش دبی تولیدی از چاه می‌شود.

به دنبال افزایش میزان تقاضا برای مصرف انرژی در جهان، شرکت‌های نفت و گاز روش‌های مختلفی را برای افزایش نرخ تولید نفت از چاه‌ها به کار

استفاده نیستند زیرا به‌عنوان مثال تزریق فرمیک اسید و استیک اسید به‌ترتیب در غلظت‌های بیش از ۹ و ۱۳٪ وزنی، سبب رسوب کلسیم استات و کلسیم فرمات می‌شوند [۶]. زویداویان پور و همکاران بهبود عملیات انگیزش چاه با اسید کاری ماتریسی را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که انجام آزمایشات چاه‌آزمایی و آنالیز گرهی پیش از آغاز عملیات اسید کاری، نقش مهمی در مراحل فرآیند اسیدکاری ماتریسی و پیش‌بینی رفتار آینده چاه به‌عهده دارد [۷]. مطالعه اولیه سینتیک واکنش هیدروکلریک اسید با سازندهای دولومیتی توسط لوند و همکاران انجام شد [۸]. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که واکنش‌پذیری دولومیت تا حد زیادی به دما بستگی دارد. اما مطالعات اندرسون که با استفاده از دستگاه دیسک دوار انجام شد، وابستگی کمتر واکنش‌پذیری دولومیت به دما را نشان داد [۹]. تیلور و همکاران واکنش‌پذیری دولومیت در سازندهای مختلف یک مخزن گازی در عربستان سعودی را مورد مطالعه قرار دادند. واکنش‌پذیری به‌دست آمده برای هر آزمایش (سازندهای مختلف) متفاوت بود که به توزیع‌های مختلف کانی‌شناسی در نمونه‌های سنگ نسبت داده شده است [۵ و ۱۰]. علاوه‌بر واکنش‌پذیری اسید با سنگ، هدایت جریانی شکاف نیز یکی از پارامترهای مهم در پیش‌بینی بازده مخازن شکاف‌دار است. یکی از کارهای صورت گرفته برای اندازه‌گیری هدایت جریانی شکاف اسید کاری شده در سنگ دولومیت، بررسی اثرات دمایی بر روی هدایت جریانی در سنگ‌های دولومیت شکاف‌دار بوده که توسط اندرسون و فردریکسون انجام شد [۹]. مشاهدات آنان نشان داد که هدایت جریانی به‌طور قابل توجهی در دماهای بالاتر نسبت به دمای محیط به‌دست می‌آید. همچنین، زبری سطح نیز بر روی هدایت جریانی شکاف تأثیرگذار است که توسط چندین محقق مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱-۱۴].

برای رفع این مشکل معمولاً اسید به درون ساختار سنگ تزریق می‌شود تا با واکنش دادن با سنگ مخزن و ایجاد مسیره‌های جدید برای حرکت سیال، مقاومت در برابر حرکت سیال به‌سمت دهانه چاه کاهش یابد. عملیات اسیدکاری به دو روش انجام می‌شود: (۱) اسیدکاری ماتریس سنگ (۲) ایجاد شکاف با اسید. در اسیدکاری ماتریس سنگ، اسید با فشار کمتری از فشار شکست ساختار سنگ تزریق می‌شود. اسید تزریق شده با نفوذ به درون حفره‌های سنگ و واکنش دادن با آنها باعث به‌وجود آمدن حفره‌های بزرگتری به نام کرمچاله^۱ می‌شود که نهایتاً سبب افزایش تخلخل، تراوایی و دبی سیال تولیدی از چاه می‌شود. اگر ساختار سنگ همگن نباشد و دارای شکاف‌های طبیعی باشد، این شکاف‌ها به علت داشتن تراوایی زیاد، مسیر راحت‌تری برای عبور اسید تزریقی هستند که ورود اسید به درون شکاف‌ها و واکنش دادن با دیواره‌های شکاف باعث افزایش میزان بازشدگی (عرض) شکاف‌ها شده و مسیری راکه به‌خاطر آسیب‌های وارده به سازند مسدود شده بود را باز خواهد کرد [۱ و ۲]. به‌طور کلی، برای اسید کاری مخازن کربناته از اسیدهای معدنی و یا اسیدهای آلی استفاده می‌شود [۳ و ۴]. رایج‌ترین اسید معدنی مورد استفاده هیدروکلریک اسید است. واکنش سریع بین هیدروکلریک اسید و سنگ‌های کربناته نفوذ هیدروکلریک اسید را به‌خصوص در دبی‌های تزریق پایین، محدود می‌کند. علاوه‌بر سرعت واکنش بالا، هیدروکلریک اسید به شدت خورنده بوده و بازدارنده‌های خوردگی در دماهای بالا برای مدت زمان کوتاهی جوابگو هستند. این محدودیت‌ها، تمایل به استفاده از اسیدهای آلی مانند فرمیک اسید و استیک اسید را با هدف انگیزش در چاه‌های با دمای بالا را افزایش داده است. اسیدهای آلی، علاوه‌بر اثر خوردگی کمتر در دماهای بالا، سبب بهبود عمق نفوذ اسید در سازند نیز می‌شوند [۵]. با این حال، اسیدهای آلی در غلظت‌های بالا قابل

1. Worm-Holes

باشند، حجم بیشتری از اسید مورد نیاز است [۱۸]. به‌طور کلی، با توجه به ماهیت تصادفی عملیات اسیدکاری، این کار می‌تواند چالش برانگیز باشد. داده‌های ورودی دقیق برای دستیابی به نتایج منطقی ضروری است. دقیق‌ترین روش برای به‌دست آوردن این داده‌ها، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی سیالات و سنگ‌ها در طول عملیات‌های میدانی و آزمایشگاهی است. اکثر کارها در زمینه اسیدکاری ماتریس سنگ، به‌نحوه انتشار اسید در ماتریس و به‌وجود آمدن کرم چاله‌ها در آن پرداخته‌اند. اما بررسی اثر تزریق اسید در مخازن شکاف‌دار و اثر آن بر روی خصوصیات هندسی شکاف مانند میزان بازشدگی شکاف تاکنون به‌صورت جدی مطالعه نشده است. تغییرات میزان بازشدگی شکاف تأثیر مهمی بر روی توانایی شکاف در عبور سیال دارد که می‌تواند منجر به افزایش میزان تولید نفت شود. در مقاله پیش‌رو، استیک اسید در دو نمونه سنگ کربناته در دو دبی تزریقی $0/3$ و $0/9$ mL/min تزریق می‌شود تا اولاً مشخص شود که جنس سنگ چه تأثیری بر روی میزان بازشدگی شکاف خواهد داشت. ثانیاً در سازندهای مختلف دبی تزریق اسید چگونه می‌تواند بر روی میزان بازشدگی شکاف اثرگذار باشد.

روش کار

مواد مصرفی

برای انجام آزمایش‌ها از دو نمونه سنگ از جنس دولومیت و کلسیت استفاده شده است. این نمونه سنگ‌ها از رخنمون کوه‌های شیراز تهیه شده‌اند. نمونه سنگ دولومیتی دارای تخلخل $14/46\%$ و تراوایی 279 md و نمونه سنگ کلسیتی دارای تخلخل پایین و تراوایی قابل‌نظر است. علت استفاده از این دو نوع سنگ تفاوت در میزان واکنش‌پذیری آن‌ها با اسید است که به‌دلیل وجود کانی‌های مختلف در آن‌ها است. در تمام آزمایش‌ها جهت تزریق اسید از استیک اسید خالص ساخت شرکت مرک

این مطالعات نشان داد که سطح شکاف در دولومیت زبری بیشتری نسبت به سنگ‌های گچی و کلسیتی دارد. بنابراین سطح خورده شده در اثر واکنش اسید با سنگ، در نمونه‌های دولومیتی کمتر از نمونه‌های کلسیتی است که هدایت جریانی خوبی را در تنش برشی بالا ایجاد می‌کند که احتمالاً به‌خاطر استحکام سنگ و زبری سطح شکاف است. مطالعه مدل‌سازی ایجاد شکاف با اسید در سازندهای دولومیتی توسط بن و اکونومیدز انجام شد [۱۵]. این محققین نشان دادند که فرآیند خوردگی سنگ در اثر واکنش با اسید در سازندهای دولومیتی با حداکثر هدایت جریانی در فواصل دور از چاه به‌وجود می‌آید. آن‌ها این رفتار را به دماهای پایین‌تر نزدیک چاه نسبت دادند که سبب می‌شود فرآیند واکنش انحلال اسید در سازندهای دولومیتی محدود شود. گدانسکی و لی ایجاد شکاف با اسید را در سازندهای دولومیتی شبیه‌سازی کردند و مشاهده کردند که خوردگی سنگ توسط اسید می‌تواند در فواصل دور از چاه رخ دهد [۱۶]. نویسندگان پیشنهاد کردند که هدایت جریانی ضعیف در سازندهای دولومیت ناشی از این پدیده است. تینکر طراحی متفاوتی برای ایجاد شکاف با اسید در دولومیت را پیشنهاد کرد [۱۷]. این مطالعه براساس مشاهدات میدانی انجام شد. این روش، ایجاد شکاف با اسید تعادلی نام دارد که تزریق اسید با نرخ پایین سبب به حداکثر رساندن زمان تماس با دیواره‌های شکاف می‌شود. فشار باید بالاتر از فشار طبقات بالایی باشد تا شکاف باز بماند، اما زیر فشار انبساط شکستگی قرار دارد. مرحله نرخ تزریق پایین بلافاصله بعد از یک نرخ تزریق بالا است که برای ایجاد ابعاد شکاف مطلوب طراحی شد. به‌علاوه، چن و همکاران با استفاده از یک مدل سه‌بعدی خطی، اثر سایز شکاف، جهت و تراوایی را بر روی انتشار اسید بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شکاف‌های با عرض بیشتر مصرف اسید بیشتری نیز دارند. علاوه‌بر آن، در صورتی که شکاف‌ها عمود بر مسیر تزریق اسید

آلمان با درصد خلوص ۹۸ استفاده شده است.

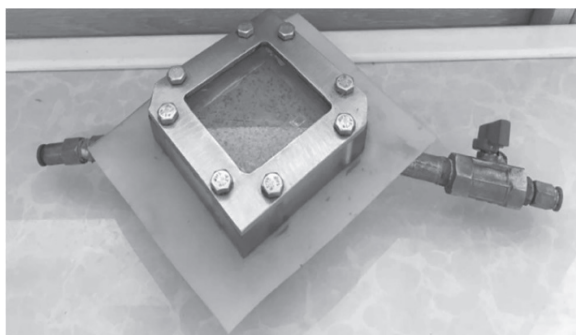
ساخت میکرومدل شفاف

میکرومدل استفاده شده در این مقاله به گونه‌ای ساخته شده است که علاوه بر استفاده از سنگ در داخل آن، امکان مشاهده داخل میکرومدل حین تزریق اسید نیز ممکن باشد. جنس آن از ورق‌های پلکسی گلاس^۱ با ضخامت ۲ cm است که شفافیت و استحکام بالایی دارند. ابعاد میکرومدل ساخته شده ۱۰×۱۰ cm است. برای ساخت این میکرومدل، در مرحله اول محل قرارگیری سنگ داخل میکرومدل ماشین کاری شد. سپس با استفاده از مته ۸ سوراخ با قطر ۰/۸ cm با فاصله‌های منظم در صفحه پلکسی گلاس ایجاد شد که محل قرارگیری پیچ

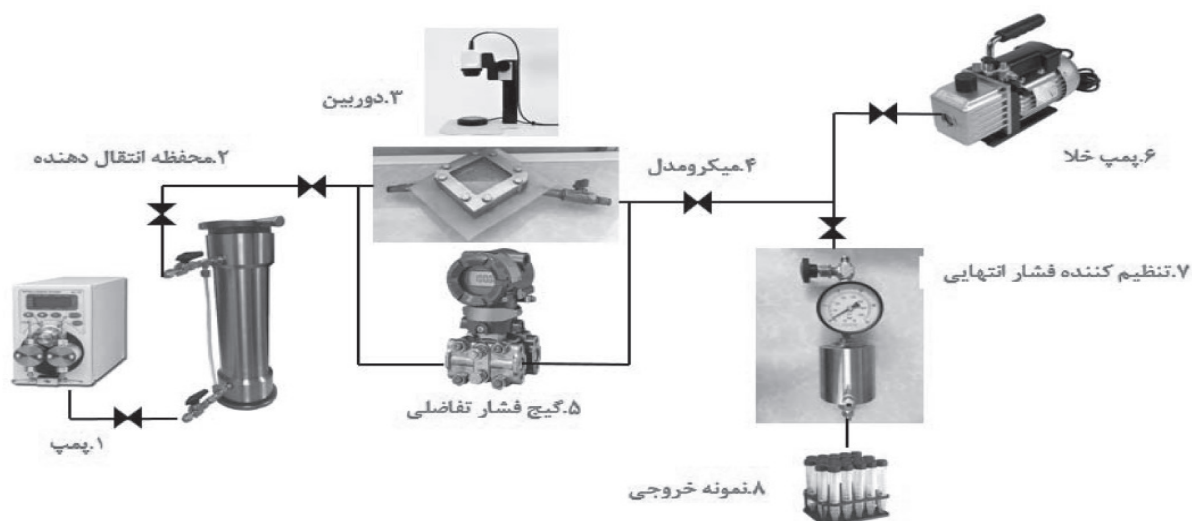
و مهره‌ها را مشخص می‌کند. نهایتاً برای آب‌بندی کردن میکرومدل از لاستیک آب‌بندی سیلیکونی با ضخامت ۲ mm استفاده شده است. شکل ۱ میکرومدل ساخته شده را نشان می‌دهد.

سیستم تزریق

سیستم تزریق به گونه‌ای طراحی شده که بتوان در حین تزریق به صورت هم‌زمان هم افت فشار موجود در سیستم و هم pH خروجی را اندازه‌گیری کرد. در شکل ۲ سیستم تزریق طراحی شده نشان داده شده است. برای تزریق اسید به درون سیستم امکان استفاده مستقیم از پمپ وجود ندارد چرا که اسید باعث خوردگی و زنگ زدگی پمپ و نهایتاً منجر به آسیب آن می‌شود.



شکل ۱ میکرومدل ساخته شده از جنس پلکسی گلاس

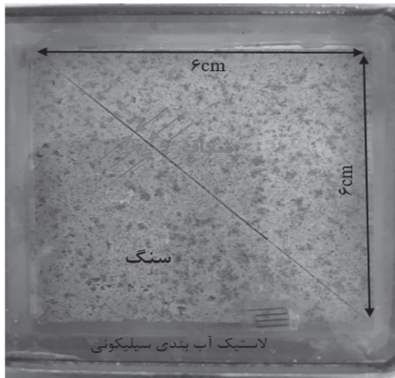


شکل ۲ سیستم تزریق شامل بخش‌های ۱- پمپ ۲- محفظه انتقال دهنده ۳- دوربین ۴- میکرومدل ۵- گیج فشار تفاضلی ۶- پمپ خلا ۷- تنظیم کننده فشار انتهایی ۸- نمونه خروجی

1. Plexi Glass

روش انجام آزمایش‌ها نحوه ایجاد شکاف در سنگ‌ها

برای ایجاد شکاف در سنگ‌ها، از اره مویی استفاده می‌شود. مزیت استفاده از اره مویی این است که می‌توان شکاف‌هایی با ضخامت‌هایی در ابعاد دلخواه در سنگ ایجاد کرد. در شکل ۳ نحوه قرارگیری سنگ شکاف‌دار در داخل میکرومدل داده شده است:



شکل ۳ نحوه قرارگیری سنگ شکاف‌دار در داخل میکرومدل

چگونگی آماده‌سازی محلول استیک اسید

بر طبق آنچه که در پیشینه تحقیق آمده است، اسیدهای ضعیف عملکرد بهتری برای اسیدکاری مخازن شکاف‌دار دارند [۱۹] لذا استیک اسید جهت انجام آزمایش‌ها انتخاب شده است. از سوی دیگر، تزریق اسید با غلظت بیش از ۱۳٪، سبب ایجاد رسوب در مخازن کربناته می‌شود [۶]. بنابراین غلظت ۸٪ وزنی به‌عنوان غلظت اسید تزریقی انتخاب شد. برای ساخت استیک اسید با غلظت ۸٪ وزنی، با توجه به آن که چگالی استیک اسید $1/05 \text{ g/cm}^3$ است، $7/61 \text{ mL}$ اسید به $92/39 \text{ mL}$ آب مقطر اضافه شده و محلول حاصله به مدت 1 h بر روی همزن مغناطیسی قرار داده شد تا اسید به‌طور کامل در آب تفکیک شود. نهایتاً آنچه که به‌دست آمد 100 mL استیک اسید ۸٪ بود.

نحوه تزریق استیک اسید

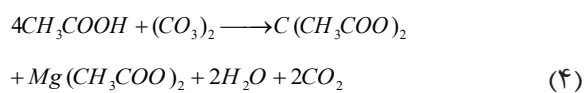
در تمامی آزمایش‌ها قبل از تزریق اسید، آب مقطر به مدت 10 min در سیستم تزریق شده تا سنگ از آب اشباع شود.

لذا می‌بایست از محفظه انتقال‌دهنده استفاده کرد (دستگاه شماره ۲ در شکل ۲).

محفظه انتقال‌دهنده دارای یک پیستون است. در قسمت بالایی پیستون هر نوع مایعی از جمله اسید می‌تواند وجود داشته باشد. آب توسط پمپ به قسمت زیرین پیستون تزریق شده و در اثر جابه‌جایی پیستون فشار آب تزریقی به مایع بالای پیستون منتقل شده و عملیات تزریق انجام می‌شود. همچنین با هدف اندازه‌گیری میزان افت فشار در دوسر سیستم تزریق از افت فشار سنج یوکوگاوا (دستگاه شماره ۵ در شکل ۲) ساخت کشور ژاپن استفاده شد. دقت این دستگاه $\pm 0/065\%$ است. تنظیم‌کننده فشار انتهایی (دستگاه شماره ۷ در شکل ۲) وسیله‌ای است که یک فشار بالادستی مشخص بر روی آن تنظیم می‌شود. برای این کار یک سیال که معمولاً آب است وارد یک محفظه دارای صفحه دیافراگمی می‌شود و به این صفحه به میزان فشار تنظیم شده فشار وارد می‌کند و آن را به سمت پایین حرکت می‌دهد. سپس با وارد شدن سیال از قسمت ورودی تا زمانی که فشار ورودی به فشار تنظیم شده بالادستی نرسیده باشد، سیال از قسمت خروجی خارج نمی‌شود. به این ترتیب می‌توان فشار خروجی را کنترل کرد. دلیل استفاده از این دستگاه این است که با افزایش فشار خروجی و به دنبال آن افزایش فشار کل سیستم، گاز دی اکسید کربن تولید شده در اثر واکنش اسید با سنگ کربناته آزاد نخواهد شد و به‌صورت محلول باقی خواهد ماند.

اهمیت جلوگیری از آزاد شدن این گاز در این است که اولاً حباب‌های گاز تولید شده باعث کم شدن وضوح و کیفیت عکس‌ها و فیلم‌های گرفته شده از میکرومدل می‌شوند و از سوی دیگر، این فشار به نوعی فشار مخزن را در مقیاس کوچک شبیه‌سازی می‌کند و باعث دقیق‌تر شدن نتایج حاصله می‌شود.

در محیط وجود دارد و همچنین، گاز CO₂ به سرعت از محیط واکنش آزاد می‌شود. بنابراین سرعت واکنش رابطه ۳ در جهت تولید فرآورده‌های واکنش افزایش می‌یابد که نتیجه آن مصرف شدن یون H⁺ و کاهش غلظت آن در محیط است. اما غلظت این یون با تفکیک اسید در واکنش رابطه ۱ دوباره جبران می‌شود. بنابراین، واکنش رابطه ۳ به دلیل جایگزینی یون H⁺ از واکنش رابطه ۱ و وجود کانی کلسیت، در ابتدا با سرعت زیاد انجام می‌شود و pH محیط سریع تر افزایش می‌یابد. واکنش استیک اسید با دولومیت به صورت زیر است:



طبق آزمون اسید، وجود منیزیم در ساختار سنگ‌های دولومیتی سبب می‌شود که میزان واکنش پذیری این نوع از سنگ‌ها با اسید ضعیف باشد. در هنگام واکنش استیک اسید با دولومیت با گذشت زمان و در اثر مصرف شدن کانی‌های فعال واکنش دهنده با اسید، سرعت واکنش کاهش می‌یابد. همین امر سبب می‌شود تا pH محیط پیوسته کاهش یابد.

بررسی اثر دبی تزریق استیک اسید بر روی میزان بازشدگی شکاف در نمونه سنگ کلسیتی

با استفاده از اره مویی، شکافی با عرض ۰/۵ mm درون سنگ کلسیتی ایجاد شد. نمونه سنگ داخل میکرومدل قرار داده شد. پیش از آماده‌سازی سنگ، آب به مدت ۱۰ min درون سنگ تزریق شد و سنگ با آب اشباع گردید. در مرحله بعد، اسیداستیک با دبی تزریق ۰/۳ mL/min درون شکاف تزریق شد. بعد از پایان یافتن آزمایش تزریق اسید با دبی ۰/۳ mL/min، به منظور شستشوی سنگ و آماده‌سازی آن برای تزریق اسید با دبی ۰/۹ mL/min، آب مقطر به مدت ۱ h و با دبی ۰/۱ mL/min درون سنگ تزریق شد.

سپس استیک اسید درون محفظه انتقال ریخته شده و با پمپ هیدرولیکی، اسید با دو دبی ۰/۳ و ۰/۹ mL/min تزریق می‌شود. در حین تزریق در فاصله‌های زمانی ۱۰ min، اسید خروجی در لوله فالكون جمع‌آوری شده و سپس pH این محلول با استفاده از pH متر اندازه‌گیری شد. pH اسید خروجی سه بار و در فاصله‌های زمانی منظم اندازه‌گیری شده تا اثر تغییرات دما بر روی اندازه‌گیری pH از بین رود و همچنین، دقیق‌ترین عدد pH گزارش شود.

اندازه‌گیری میزان بازشدگی شکاف

هم‌زمان با تزریق، هر ۱۰ min یک بار با استفاده از دوربین از سنگ درون سیستم عکس‌برداری می‌شود. عکس‌های گرفته شده با استفاده از نرم‌افزار IMAGE J آنالیز شدند. نحوه آنالیز میزان بازشدگی بدین صورت بود که میزان بازشدگی شکاف در فاصله‌های منظم و ثابت در طول شکاف اندازه‌گیری شده و سپس میانگین میزان بازشدگی این نقاط به‌عنوان بازشدگی کل شکاف گزارش شده است.

نتایج و بحث

واکنش استیک اسید با سنگ‌های دولومیتی و کلسیتی

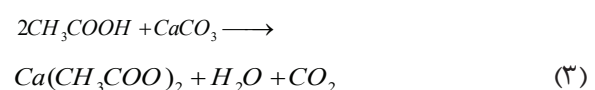
واکنش تفکیک استیک اسید در محلول‌های آبی به شکل زیر است [۲۰]:



که A معادل است با CH₃COO. ثابت تفکیک اسید (K_a) معمولاً به صورت لگاریتمی بیان می‌شود:

$$PK_a = -\log(K_a) \quad (2)$$

و مقدار pK_a برای استیک اسید برابر ۴/۷ است. واکنش استیک اسید با کلسیت به صورت زیر است:



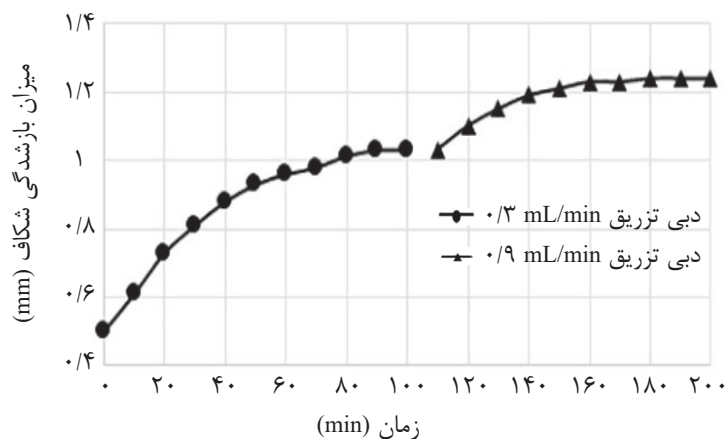
با گذر زمان و مصرف شدن اسید در اثر واکنش با آن با سنگ، pH محلول افزایش می‌یابد که این افزایش pH در ابتدا زیاد است و پس از آن، سرعت افزایش آن کاهش می‌یابد. در زمان‌های اولیه واکنش، مقدار زیادی از کلسیم کربنات و یون H⁺

استیک اسید بتواند برای مدت زمان بیشتری با سطح شکاف در تماس باشد، میزان واکنش و به دنبال آن، میزان بازشدگی شکاف بیشتر است. در دبی تزریق کمتر، استیک اسید تزریقی به دلیل سرعت حرکت کمتر، فرصت بیشتری برای در تماس بودن با دیواره‌های شکاف دارد. بنابراین، میزان واکنش استیک اسید با آن بیشتر و میزان بازشدگی نیز بیشتر است.

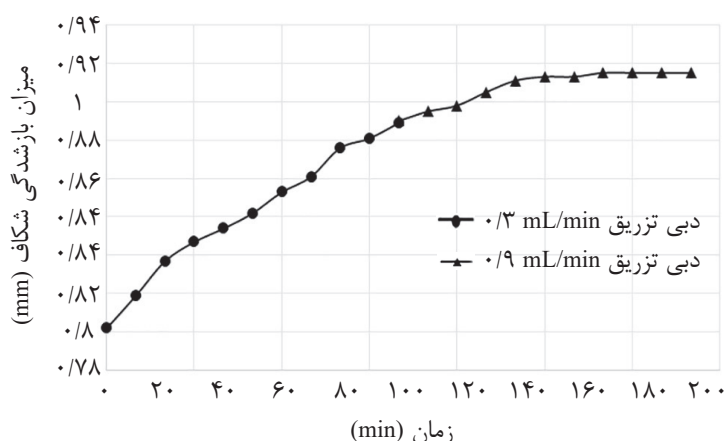
بررسی اثر دبی تزریق استیک اسید بر روی میزان بازشدگی شکاف در نمونه سنگ دولومیتی

سنگ‌های دولومیتی نیز همانند سنگ‌های کلسیتی از نوع کربناته می‌باشند. تفاوت عمده این دو نوع سنگ در میزان کانی‌های کلسیت و دولومیت می‌باشد. این تفاوت سبب تغییر در میزان واکنش آن‌ها با اسید می‌شود. برای بررسی تأثیر دبی تزریق استیک اسید بر روی میزان بازشدگی شکاف، استیک اسید با غلظت ۸٪ وزنی با دو دبی تزریق ۰/۳ mL/min و ۰/۹ mL/min درون شکافی که میزان بازشدگی اولیه آن ۰/۷۸ mm بوده است تزریق شده است. میزان بازشدگی شکاف بر حسب زمان در نمونه سنگ دولومیتی در نمودار شکل ۵ آمده است. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد با کاهش دبی تزریق استیک اسید میزان بازشدگی نهایی شکاف افزایش می‌یابد که این پدیده در نمودار شکل ۵ برای سنگ‌های دولومیتی نیز صادق است.

این تزریق می‌بایست به آرامی صورت گیرد تا آب فرصت ورود به تمام حفرات را داشته باشد و قادر باشد که تمام محصولات واکنش داده و همچنین اسید به‌جای مانده بر روی سطح سنگ و درون حفرات را به‌طور کامل شستشو دهد. سپس کل سیستم به پمپ خلأ متصل شد تا آب، اسید و هوا درون میکرومدل به‌طور کامل خارج شود. نهایتاً کل میکرومدل به مدت ۲ درون آن قرار داده شد تا سنگ کاملاً خشک شود. سپس مجدداً آب به مدت ۱۰ min درون سنگ تزریق شد و سنگ با آب اشباع گردید. در این مرحله، سنگ و میکرومدل آماده تزریق اسید با دبی ۰/۹ mL/min هستند. پس از تزریق اسید، تمام مراحل قبلی مجدداً انجام شد تا میزان بازشدگی شکاف و همچنین، pH اسید خروجی اندازه‌گیری شود. نتایج آزمایش میزان بازشدگی شکاف در نمونه سنگ کلسیتی در نمودار شکل ۴ آمده است: در اینجا، معیار میزان واکنش سنگ با اسید، شیب نمودار است. هرچه نمودار شیب بیشتری داشته باشد، نشان می‌دهد که تغییرات بازشدگی شکاف با سرعت بیشتری اتفاق افتاده است. همان‌طور که در قسمت ۱ در شکل ۴ مشخص است در دبی تزریق ۰/۳ mL/min شیب نمودار بیشتر از دبی تزریق ۰/۹ mL/min است. بنابراین هرچه دبی تزریق کمتر باشد، تغییرات میزان بازشدگی شکاف بیشتر خواهد بود. هرچه



شکل ۴ اثر دبی تزریق بر روی میزان بازشدگی نهایی شکاف در نمونه سنگ کلسیتی



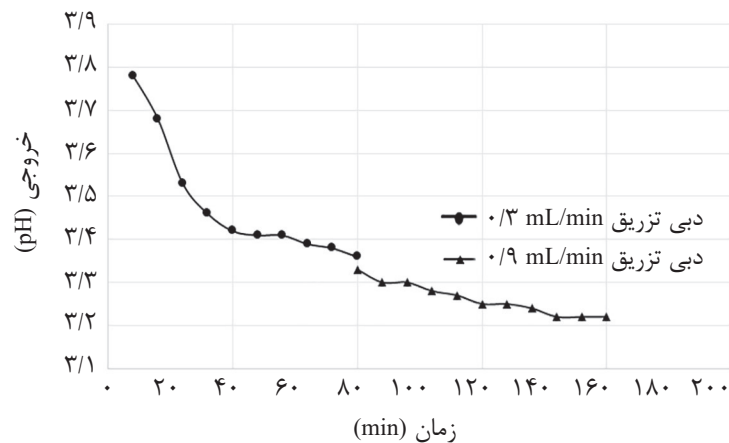
شکل ۵ نتایج میزان شکل بازشدگی شکاف با تزریق استیک اسید در نمونه سنگ دولومیتی

و کانی‌های کمتری را در خود حل کرده است. این مشاهده به نوعی دیگر ادعای کمتر بودن میزان واکنش‌پذیری در اثر سرعت بالای حرکت اسید در سطح شکاف را تأیید می‌کند. از سوی دیگر، کاهش تدریجی شیب منحنی pH در نقاط انتهایی تزریق، نشان‌دهنده آن است که در زمان شروع تزریق، مقدار کانی‌های فعال واکنش‌دهنده با استیک اسید در سطح شکاف زیاد بوده، پس میزان واکنش‌پذیری نیز بیشتر بوده است. اما در زمان‌های انتهایی، میزان واکنش کاهش پیدا کرده و عدد pH به عدد pH استیک اسید تزریقی (۲/۲۲) نزدیک‌تر می‌شود. با هدف مقایسه بهتر، pH خروجی نهایی برای هر دو نمونه سنگ در دبی تزریقی ۰/۳ mL/min در نمودار شکل ۷ مقایسه شده است:

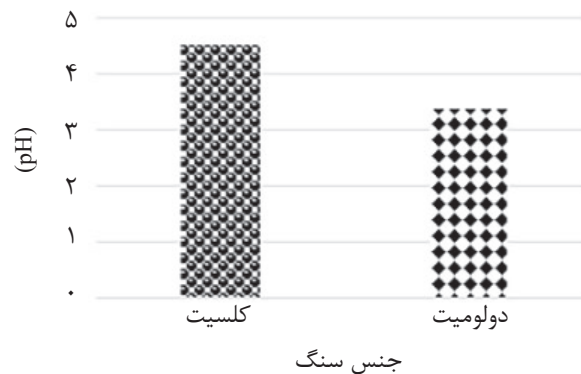
در نمونه سنگ کلسیتی pH نهایی مقدار بیشتری نسبت به pH خروجی در نمونه سنگ دولومیتی دارد. pH بیشتر نشان‌دهنده میزان واکنش بیشتر اسید با نمونه سنگ کلسیت است. همین امر سبب می‌شود تا میزان خورده شدن کانی‌های سطح شکاف نیز بیشتر باشد و به دنبال آن، میزان بازشدگی نهایی شکاف نیز بیشتر باشد. بنابراین، نتایج pH خروجی نیز به نوعی واکنش‌پذیری کمتر دولومیت با استیک اسید را نشان می‌دهد.

اما میزان این افزایش در نمونه سنگ دولومیتی با کلسیت تفاوت دارد. در نمونه سنگ دولومیتی سایز اولیه شکاف قبل از تزریق استیک اسید ۰/۷۸ mm بوده که بعد از تزریق اسید به ۰/۹۱ mm رسیده است که افزایش ۰/۱۳ mm را نشان می‌دهد اما در نمونه سنگ کلسیتی میزان بازشدگی شکاف قبل و بعد از تزریق اسید به ترتیب ۰/۵ mm و ۱/۰۵ mm است که نشان‌دهنده تغییرات بازشدگی بیشتری در نمونه سنگ کلسیتی است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل واکنش‌پذیری کمتر دولومیت با اسید استیک، میزان بازشدگی نهایی شکاف نیز کمتر خواهد بود. برای بررسی بیشتر این موضوع، pH استیک اسید خروجی در فاصله‌های زمانی منظم اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۶ نمایش داده شده است:

در زمان‌های ابتدایی، شیب کاهش نمودار pH بیشتر از زمان‌های انتهایی تزریق بوده و با گذشت زمان این شیب کاهش پیدا کرده است. میزان pH خروجی در دبی تزریق ۰/۹ mL/min، پایین‌تر از نمودار pH خروجی در دبی تزریق ۰/۳ mL/min است. این موضوع نشان‌دهنده آن است که اسید خروجی در دبی‌های بالاتر تزریق، بدون انجام واکنش کامل با سنگ، شکاف را ترک می‌کند. به عبارت بهتر، اسید فرصت کافی برای واکنش با سنگ نداشته



شکل ۶ نتایج pH خروجی پس از تزریق استیک اسید در نمونه سنگ دولومیتی



شکل ۷ مقایسه pH نهایی خروجی در دو نمونه سنگ کلسیتی و دولومیتی

بیشتر است. در نتیجه، تغییرات میزان بازشدگی شکاف محسوس تر و بیشتر است. از سوی دیگر، دبی تزریق اسید نیز بر روی میزان بازشدگی شکاف اثرگذار است. هنگامی که اسید با دبی تزریق کم تزریق می‌شود، اسید تزریقی با سرعت حرکت آهسته تری از روی دیواره‌های سطح شکاف عبور می‌کند و مدت زمان بیشتری فرصت دارد تا با کانی‌های سطح شکاف در تماس باشد. در نتیجه اسید با کانی‌های بیشتری در سطح شکاف وارد واکنش شده و به دنبال آن میزان خوردگی سطح شکاف و میزان بازشدگی شکاف نیز بیشتر می‌شود. همچنین، بررسی نتایج pH اسید خروجی نشان می‌دهد که در نمونه سنگ دولومیتی اسید در pH پایین تری از سیستم خارج می‌شود.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی اسیدهای آلی واکنش‌پذیری کمتری نسبت به هیدروکلریک اسید دارند که سبب می‌شود عمق نفوذ آنها در سازند افزایش یابد. همان‌طور که از آزمایش اسید پیدا است میزان واکنش اسیدها با سنگ‌های دولومیتی کمتر از سنگ‌های کلسیتی می‌باشد. بر طبق نتایج آزمایش بازشدگی شکاف در نمونه سنگ دولومیتی می‌توان دریافت که میزان تغییرات بازشدگی شکاف در واکنش استیک اسید با نمونه سنگ دولومیتی بسیار کم می‌باشد. دلیل این امر این است که هرچه میزان کانی کلسیت در سنگ کمتر باشد، میزان مصرف شدن CaCO_3 نیز کمتر است در نتیجه، میزان واکنش‌پذیری نیز کمتر می‌شود. اما در نمونه سنگ کلسیتی میزان کانی‌های فعال در دسترس اسید برای واکنش دادن

واکنش شده و همین امر باعث کمتر شدن میزان بازشدگی شکاف در نمونه سنگ دولومیتی نسبت به کلسیتی می‌شود.

pH پایین‌تر اسید نشان می‌دهد که اسید خروجی کانی‌های کمتری از سطح شکاف را در خود حل کرده است. به عبارت بهتر، اسید خروجی کمتر وارد

مراجع

- [1]. Rabbani E., Davarpanah, A. and Memariani M., "An experimental study of acidizing operation performances on the wellbore productivity index enhancement," J. Pet. Exp. Prod. Tech., Vol. 8, pp. 1243-1253, 2018.
- [2]. Schechter R. S., "Oil well stimulation," 1992.
- [3]. Younesian-Farid H. and Sadeghnejad S., "Geochemical performance evaluation of pre-flushing of weak and strong acids during pH-triggered polymer flooding," Journal of Petroleum Science and Engineering, 174, pp. 1022-1033, 2019.
- [4]. Younesian-Farid H. and S. Sadeghnejad, "Modeling geochemical reactions of citric acid with ankerite cement during sandstone matrix acidizing," Journal of Petroleum Science and Engineering, 185, pp. 106650, 2020.
- [5]. Taylor K. C., Al-Katheeri M. and Nasr-El-Din H. A., "Development and field application of a new measurement technique for organic acid additives in stimulation fluids," SPE Journal, Vol. 10, pp. 152-160, 2005.
- [6]. Robert J. and Crowe C., "Carbonate acidizing design," In Reservoir Stimulation," 2nd ed. MJ Economides and KG Nolte, Chapter 17, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2000.
- [7]. زویداویان پور م.، شادی زاده ر.، ممبینی س.، "بررسی و بهبود عملیات انگیزش چاه با اسید کاری ماتریکسی در یک مخزن نفتی جنوب ایران"، پژوهش نفت، دوره ۲۰، شماره ۶۲، شماره صفحه ۹۴-۱۰۶، ۱۳۸۹.
- [8]. Lund K., Fogler H. S., McCune C. and Ault J., "Acidization—II. The dissolution of calcite in hydrochloric acid," Chem. Eng. Sci., Vol. 30, pp. 825-835, 1975.
- [9]. Anderson M. and Fredrickson S., "Dynamic etching tests aid fracture acidizing treatment design," SPE/DOE Joint Symposium on Low Permeability Reservoirs, 1987.
- [10]. Taylor K., Al-Ghamdi A. and Nasr-El-Din H., "Measurement of acid reaction rates of a deep dolomitic gas reservoir," J Can. Pet. Tech., Vol. 43, Issue 10, Publication Date October 2004.
- [11]. Al-Momin A., Zhu D. and Hill A., "The effects of initial condition of fracture surfaces, acid spending and acid type on conductivity of acid fracture," Offshore Technology Conference-Asia, Kuala Lumpur (Malaysia), 2014.
- [12]. Melendez M. G., Pournik M., Zhu D. and Hill A. D., "The effects of acid contact time and the resulting weakening of the rock surfaces on acid fracture conductivity," European Formation Damage Conference, Scheveningen (Netherlands), 2007.
- [13]. Nieto C. M., Pournik M. and Hill A. D., "The texture of acidized fracture surfaces: implications for acid fracture conductivity," SPE Production & Operations, Vol. 23, Issue 03, pp. 343-352, 2008.
- [14]. Pournik M., "Laboratory-scale fracture conductivity created by acid etching," PhD Thesis, Texas A&M University, USA, 2008.
- [15]. Ben-Naceur K. and Economides M. J., "Design and evaluation of acid fracturing treatments," Low Permeability Reservoirs Symposium, Society of Petroleum Engineers, 1989.
- [16]. Gdanski R. and Lee W., "On the design of fracture acidizing treatments," SPE Production Operations Symposium, Society of Petroleum Engineers, Oklahoma city (Oklahoma), 1989.
- [17]. Tinker S., "Equilibrium acid fracturing: a new fracture acidizing technique for carbonate formations," SPE

Production Operations Symposium, 1989.

[18]. Chen Y., Ma G., Li T., Wang Y. and Ren F., "*Simulation of wormhole propagation in fractured carbonate rocks with unified pipe-network method,*" Com. Geo., Vol. 98, pp. 58-68, 2018.

[19]. Chang F. F., Nasr-El-Din H.A., Lindvig T. and Qui X., "*Matrix acidizing of carbonate reservoirs using organic acids and mixture of HCl and organic acids,*" SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Colorado (USA), 2008.

[20]. Buijse M., de Boer P., Breukel B., Klos M. and Burgos G., "*Organic acids in carbonate acidizing,*" SPE European Formation Damage Conference, The Hague (Netherlands), 2003.