

بررسی آزمایشگاهی تاثیر تزریق اسید مغناطیسی برافزایش تراوایی پلاگ‌های کربناته و مقایسه آن با اسید معمولی

احسان خامه‌چی^{۱*}، محمد طبسی^۲ و سعید دشتکی پور^۱

۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۲۳

چکیده

یکی از روش‌های مؤثر و متداول برای به حداقل رساندن آسیب سازند در مخازن هیدروکربنی، اسیدکاری می‌باشد. این روش به طور گسترده در مخازن کربناته برای افزایش تراوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اسید، مواد آسیب زنده سازند را از بین برده و کانال‌های جریانی در سازند ایجاد می‌کند. ولی لازم است قبل از تزریق اسید به سنگ آزمایشاتی روی سنگ مخزن در آزمایشگاه انجام شود چرا که در بعضی موارد تزریق اسید مشکلاتی به مراتب پیچیده‌تر از مسدود شدن خلل و فرج مانند ایجاد شدن امولسیون و... ایجاد نماید. در این پژوهش، آزمایشات تزریق هیدروکلریک اسید معمولی و مغناطیسی در دو غلظت ۵٪ و ۱۵٪ انجام شده است. هیدروکلریک اسید مغناطیسی از رقیق نمودن هیدروکلریک اسید غلیظ با آب مغناطیسی شده عبور داده شده از میدان مغناطیسی حاصل شده است. در غلظت ۵٪ به علت اضافه نمودن آب مغناطیسی بیشتر جهت رقیق نمودن، تراوایی به میزان قابل ملاحظه ای بیشتر از حالت ۱۵٪ افزایش یافت.

کلمات کلیدی: آسیب‌های سازندی، اسیدکاری، مخازن کربناته، اسید مغناطیسی، تراوایی

مقدمه

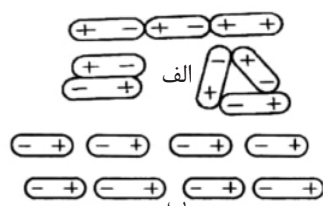
به این هدف تاثیر اسید مغناطیسی بررسی شده است. اسید مغناطیسی مورد بحث، از رقیق نمودن هیدروکلریک اسید ۳۷٪ با آب مغناطیسی تولید شده است. در پژوهش‌های گذشته، اثر تزریق اسید مغناطیسی به سازند مورد بررسی قرار نگرفته است و این کار پژوهشی جدید در این زمینه می‌باشد. در پژوهش‌های پیشین برای جلوگیری از تشکیل رسوبات در مخزن، آب تزریقی به مخزن مغناطیسی شده و بدین ترتیب از تشکیل رسوب جلوگیری و یا فرآیند تشکیل رسوب به کندی صورت می‌پذیرفت.

یکی از راه‌های مؤثر برای به حداقل رساندن ضریب پوسته در مخازن کربناته، اسیدکاری است. در فرآیند اسیدکاری همواره باید تلاش خود را در جهت افزایش هر چه بیشتر از مخازن با کمترین میزان آسیب به سازند معطوف نمائیم. چه بسا اگر فرآیند به درستی صورت نپذیرد آسیب جدی به مخزن وارد گردد. در این پژوهش برای رسیدن

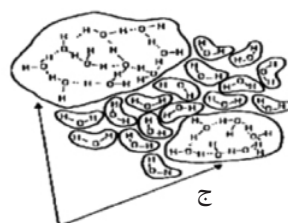
مولکول آب دارای یک بار مثبت در یک سمت و یک بار منفی در سمت دیگر می‌شود. برخی می‌گویند این عملکرد ممکن است باعث شود مولکول آب شبیه یک آهنربای میله‌ای کوچک عمل کند. این عمل به‌عنوان دوقطبی لحظه‌ای یک مولکول نامیده می‌شود. دوقطبی لحظه‌ای یک کمیت برداری است و دلیلی برای حلالیت، یکی از خواص مهم آب، می‌باشد. بر اساس گفته‌های Quinn، مولکول‌های قطبی جهت‌گیری‌های مختلفی تحت تأثیر میدان مغناطیسی به خود می‌گیرند. هرچه میدان مغناطیسی قوی‌تر باشد تعداد بیشتری از دوقطبی‌ها در جهت میدان قرار می‌گیرند [۸]. خواص غیرعادی آب را می‌توان به پیوند هیدروژنی گسترده بین مولکول‌های آن نسبت داد. مشاهده شده است که مولکول‌ها می‌توانند ساختار خوشه‌ای همانند شکل ۱- الف تشکیل دهند. بر اساس مطالعات Su و Wu این پیوستگی و ناپیوستگی بین مولکول‌های آب در تعادل ترمودینامیکی است. به‌طور کلی، هر خوشه شامل حدود ۱۰۰ مولکول آب در دمای اتاق است که در شکل ۱ ج نشان داده شده است. در حضور میدان مغناطیسی، نیروی مغناطیسی می‌تواند خوشه‌ها را به تک مولکول‌ها یا خوشه‌های کوچک‌تر بشکند، همان‌طور که در شکل ۱ ب نشان داده شده است. بنابراین فعالیت آب بهبود می‌یابد [۹].

تاریخچه کاربرد اسیدکاری

اسیدکاری، یکی از اولین روش‌هایی است که برای افزایش تولید استفاده شده است. این روش برای اولین بار در سال ۱۸۹۵ مورد آزمایش قرار گرفت و حق ثبت اختراع آن در سال ۱۸۹۶ منتشر شد [۱۰].



ایده اسید مغناطیسی از این تجربیات گرفته شده است. بر اساس گفته‌های Brower، مطالعات در مورد موفقیت آب مغناطیسی به سال ۱۸۰۳ برمی‌گردد. اثر مغناطیس برای اولین بار زمانی ثبت شد که تفاوت قابل توجهی در تجمع مواد معدنی در کتری مشاهده شد. کتری‌ها روی آتش قرار داده می‌شد و سنگ‌های بزرگی برای جلوگیری از حرکت در شرایط نامناسب هوایی درون آن‌ها قرار می‌گرفت. بنا به گزارش‌ها در ۲ عدد از کتری‌ها، که تمامی آن‌ها از فلز چدن ساخته شده بودند، رسوب زیادی تشکیل نشد. بعدها معلوم شد که دو عدد از سنگ‌هایی که برای نگهداری کتری‌ها در شرایط نامناسب آب و هوایی استفاده می‌شد سنگ آهن بود که از سنگ‌های مغناطیس طبیعی است [۱]. از سال ۱۸۹۰ به بعد، موضوع مغناطیسی کردن آب به‌شدت بحث‌برانگیز شد. یک شرکت به نام Solavite، مستقر در فرانسه، ابزار مغناطیسی نمودن آب را در سال ۱۹۳۶ به بازار ارائه نمود. در کشورهای بلوک شرق، به‌ویژه روسیه، تحقیقات و برنامه‌های کاربردی ابزار مغناطیسی کردن پس از جنگ جهانی دوم افزایش یافت [۲]. در اثر مغناطیسی نمودن آب ممکن است خواص فیزیکی آن از قبیل pH [۳-۵] و یا کشش سطحی تغییر کند [۶ و ۷]. یک مولکول آب متشکل از یک اتم اکسیژن و دو اتم هیدروژن است. پیوند کووالانسی که هر اتم هیدروژن را به اتم اکسیژن متصل می‌کند، نتیجه‌ی اشتراک یک جفت الکترون است. به دلیل اینکه دو اتم هیدروژن در یک‌طرف الکترون‌ها را به اشتراک می‌گذارند،



شکل ۱- مولکول‌های آب، اثر دوقطبی میدان مغناطیسی روی مولکول‌های آب (الف) خوشه‌های آب پایدار ترمودینامیکی، (ب) مولکول‌های آب پس از عبور از میدان مغناطیسی. (ج) ساختار خوشه‌ی مولکولی آب [۹]

مطالعات گذشته در زمینه سیلاب زنی

صفری و همکارانش در پژوهشگاه صنعت نفت میزان دبی بهینه تزریق هیدروکلریک اسید را برای یکی از مخازن کربناته جنوب ایران به دست آوردند [۱۱]. اولین کارها در جهت سیلاب زنی به پلاگ‌ها توسط Daccord انجام شد که در آن آب به پلاگ‌های پلاستری تزریق شد. این مطالعه به عنوان سنگ‌بنای تمام مطالعات مربوط به الگوهای انحلال سنگ توسط اسید بوده است [۱۲]. Hung و همکارانش مدلی برای یک گرم‌راهه^۱ مجزا گسترش دادند (یک استوانه که بیانگر گرم‌راهه بود) تا بتواند اثرات هرزروی سیال، اثر واکنش بر رشد گرم‌راهه و چگالی را مطالعه کنند [۱۳]. در فرآیند اسیدکاری پنج الگوی انحلال مشاهده می‌گردد. مطالعات گذشته نشان داده‌اند که این الگوها بستگی به سرعت تزریق اسید به محیط دارد [۱۴-۱۶]. در سرعت‌های تزریق پائین، اسید فقط به سطح ورودی نفوذ کرده و بقیه نقاط تحت تاثیر اسید قرار نمی‌گیرد. در سرعت‌های تزریق بالا، اسید به سرعت از محیط خارج می‌گردد در این الگوی انحلال قسمت عمده‌ای از اسید با محیط واکنش نمی‌دهد؛ به این الگو، الگوی یکنواخت گفته می‌شود. در حالت بهینه یک گرم‌راهه با شاخه‌های متعدد تشکیل می‌گردد. Wang و همکارانش مشاهده نمودند که سرعت تزریق بهینه، با دما، غلظت اسید و نوع سنگ تغییر می‌کند. در حالیکه، جنس سنگ بیشترین تاثیر را در سرعت تزریق بهینه دارد [۱۷]. Mummallah فاکتورهای تأثیر گذار بر واکنش‌پذیری هیدروکلریک اسید را با سنگ‌های کربناته مورد بررسی قرار داد [۱۸]. وی معیارهایی را جهت طراحی و اجرای اسیدکاری مخازن شکاف‌دار معرفی نمود. او اثر پارامترهای دما، فشار، غلظت اسید، شدت جریان اسید و اثر نیروی جاذبه را بر سرعت واکنش اسید با سنگ بررسی نمود. او نشان داد، سرعت واکنش با افزایش دما تا ۲۰۰°F افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر دما تابعیت سرعت از دما

حذف می‌شود. وی نشان داد که سرعت واکنش اسید با افزایش غلظت تا ۱۵٪ افزایش می‌یابد.

دستگاه بررسی میزان آسیب سازند

این پروژه در جهت بررسی تغییرات تراوایی سنگ در فرآیند تزریق اسید معمولی و اسید مغناطیسی انجام شده است. آزمایش‌ها در سه مرحله تزریق آب سازندی، تزریق اسید و در نهایت تزریق اسید انجام شده است. دستگاه آسیب سازند با هدف ارزیابی نحوه و میزان نفوذ سیالات نفوذپذیر از گل و یا سیمان حفاری، سیالات ورودی به سازند در اثر عملیات تمیزکاری و یا اسید کاری چاه‌ها، طراحی و ساخته شده است. ارزیابی‌ها بر مبنای اندازه‌گیری تراوایی مطلق نمونه‌ها نسبت به سیالات مختلف و مقایسه آن‌ها در مراحل زمانی مختلف (مثلاً قبل و بعد از تزریق هر سیال خاص) صورت می‌پذیرد. حداکثر فشار قابل اعمال به اطراف نمونه پلاگ به‌عنوان فشار روباره^۲ ۱۰۰۰۰ psi و حداکثر فشار منفذی^۳ و فشار گل قابل اعمال ۵۰۰۰ psi است. حداکثر دمای عملیاتی دستگاه نیز ۱۵۰°C است. پلاگ نگهدار قادر به نگهداری و انجام آزمایش بر روی نمونه‌های به قطر ۱/۵ in و حداکثر به طول ۴ in است. متالورژی تجهیزات به‌گونه‌ای است که به‌کارگیری شیمیایی مواد مختلف متداول در صنعت نفت و مخصوصاً اسیدها را امکان‌پذیر می‌سازد. شماتیک دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است.

دستگاه ایجاد میدان مغناطیسی

برای مغناطیسی نمودن سیال، دستگاه میدان مغناطیسی طراحی و ساخته شده است. این دستگاه قادر است میدان مغناطیسی با قدرت (Gs) ۴۵۰۰ ایجاد نماید. در شکل ۳ نمایی از دستگاه میدان مغناطیسی نشان داده شده است. اگر یک شکاف هوایی در یک سلف ایجاد شود چگالی شار در شکاف هوایی با چگالی شار در هسته برابر است.

1. Wormhole
2. Confining Pressure
3. Pore Pressure

دلیل احتمال وجود رس در سازند امکان تزریق آب مقطر نبوده و از آب نمک ۴۰۰۰۰ ppm به عنوان آب سازندی برای تزریق به درون پلاگ استفاده شده است.

محیط متخلخل

در همه آزمایش‌ها، پلاگ کربناته مورد استفاده قرار گرفته شد (این پلاگ‌ها از پلاگ‌های کربناته گرفته شده‌اند). هیچ‌گونه نفتی در پلاگ‌ها وجود نداشت و همه پلاگ به وسیله تولوئن در دستگاه سوکسله^۱ شستشو و در یک کوره حرارتی در دمای 100°C خشک شدند. در جدول ۱ مشخصات فیزیکی پلاگ‌ها ارائه شده است. در شکل ۴ نمایی پلاگ‌های کربناته مورد استفاده، نشان داده شده است.

مراحل انجام کار

اشباع پلاگ و اندازه‌گیری تخلخل

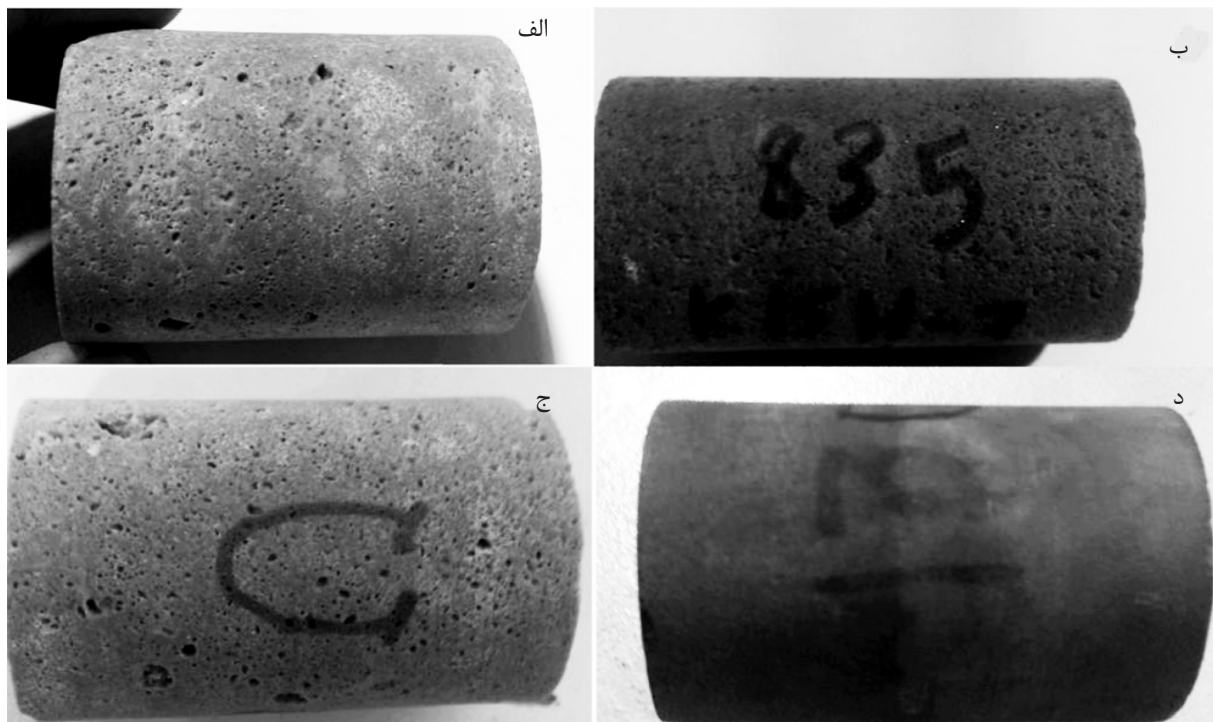
قبل از هر آزمایش نمونه پلاگ شسته شده توسط oven در دمای 100°C به‌طور کامل خشک می‌شود و وزن آن توسط ترازو اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۳- دستگاه میدان مغناطیسی

با بررسی هسته‌های فرو مغناطیسی موجود در بازار تصمیم گرفته شد از هسته آهنی با نفوذپذیری 4500 H/m در ساخت دستگاه استفاده شود. هسته‌های آهنی در اندازه‌ها و اشکال مختلف در بازار وجود دارد که در ساخت این دستگاه از هسته آهنی UI استفاده گردید. اسید تزریقی و آب سازندی

اسید تزریقی از رقیق کردن هیدروکلریک اسید ۳۷٪ ساخت شرکت مرک با آب مغناطیسی حاصل شده و برای تزریق به نمونه‌های موجود استفاده شد. به



شکل ۴- نمایی از پلاگ‌های کربناته مورد استفاده

جدول ۱- مشخصات فیزیکی پلاگ‌های کربناته مورد استفاده

پلاگ	طول (cm)	قطر (cm)	حجم منافذ (cm ³ /g)	تخلخل (%)	نفوذپذیری مطلق (md)
A	۵/۴۱	۳/۸	۰/۰۸۳	۱۶/۹	۰/۶۴
B	۸/۰۶	۳/۸۴	۰/۰۲۵	۶/۵۷	۵۳/۶۵
C	۵/۱	۳/۸۴	۰/۰۵۱	۱۶/۳۷	۴۲/۴۳
D	۵/۱	۳/۸۴	۰/۰۵۱	۱۶/۵۷	۶۳/۶۵

شده به حالت پایا برسد و تغییری در آن مشاهده نشود. افت فشار در هر دبی تزریقی توسط دستگاه، اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.

آزمایش تزریق اسید

بعد از اندازه‌گیری نفوذپذیری، سیلندر اسید با اسید مورد نظر پر می‌شود. به دلیل اینکه در هنگام پر کردن سیلندر، فشار ورودی پلاگ دچار کاهش می‌شود، دوباره آب سازندی تزریق می‌شود تا اختلاف فشار دو سر پلاگ به حالت پایا برسد. پس از به تعادل رسیدن اختلاف فشار دو سر پلاگ، تزریق اسید شروع می‌شود. در طول تزریق اسید، اسید با سازند واکنش داده و اختلاف فشار دو سر پلاگ افزایش می‌یابد که این افزایش اختلاف فشار توسط دستگاه ثبت می‌شود سپس اختلاف فشار رو به کاهش می‌گذارد. هنگامی که افت فشار دو سر پلاگ ثابت می‌شود، جریان اسید قطع می‌گردد. پس از قطع جریان اسید، آب سازندی به درون پلاگ تزریق می‌گردد. هنگامی که اختلاف فشار دو سر پلاگ ثابت گردید، دوباره از پلاگ تراوایی گرفته می‌شود.

طراحی آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها و کاربرد آن‌ها جهت رسیدن به هدف مطلوب نیاز به طرح منظمی است. به همین منظور آزمایش‌های لازم مطابق با الگوی شکل ۵ انجام پذیرفت. کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه آسیب سازند دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است.

پلاگ خشک شده در دسیکاتور خلأ حاوی آب سازندی قرار داده می‌شود و دسیکاتور خلأ به پمپ خلأ وصل شده و به مدت ۲۴ hr پلاگ تحت شرایط خلأ نگهداری می‌شود. پس از اشباع شدن پلاگ از آب سازندی، دوباره توسط ترازو، وزن پلاگ اندازه‌گیری می‌شود. با تقسیم کردن اختلاف وزن‌ها بر چگالی آب سازندی، حجم فضای خالی پلاگ محاسبه می‌گردد که با تقسیم کردن این حجم به حجم کل پلاگ، تخلخل پلاگ محاسبه می‌شود.

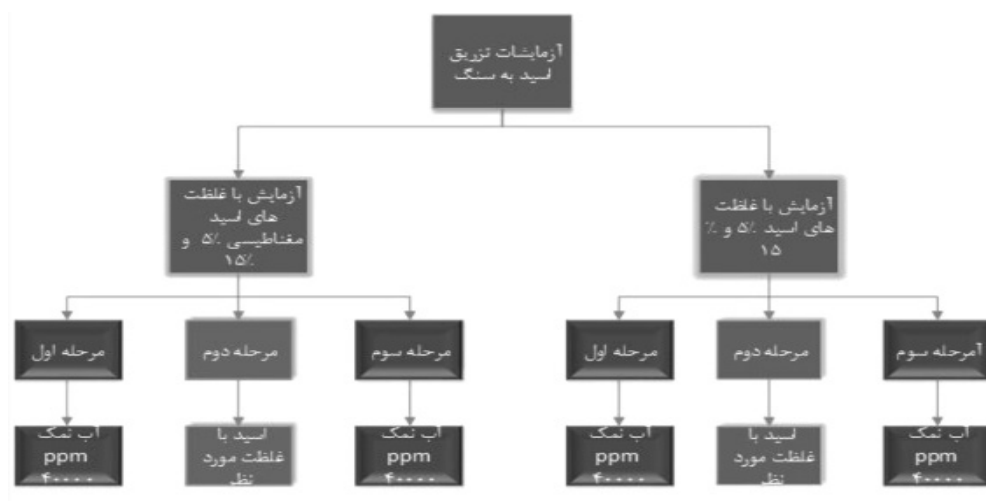
مغناطیسی نمودن آب

برای مغناطیسی کردن آب، دستگاه میدان مغناطیسی با پمپ گل دستگاه آسیب سازند، ترکیب می‌شود. برای مغناطیسی نمودن قبل از هر آزمایش آب به مدت ۲ hr توسط پمپ می‌چرخد. قابل ذکر است که انجام فرایند مغناطیسی نمودن هم زمان با اندازه‌گیری نفوذپذیری پلاگ توسط دستگاه آسیب سازند صورت می‌گیرد. پس از مغناطیسی نمودن آب، اسید غلیظ با آب مغناطیسی رقیق می‌شود.

اندازه‌گیری نفوذپذیری اولیه

پلاگ اشباع از آب سازندی در نگهدارنده پلاگ^۱ قرار داده شده و مسیرهای جریان به پلاگ نگهدار متصل می‌شود. با استفاده از پمپ دستی فضای خالی بین پلاگ نگهدارنده و sleeve از روغن سیلیکون پر شده و فشار روباره به اندازه ۵۰۰ psi بیشتر از فشار ورودی تنظیم می‌شود. فشار پشتی نیز روی ۵۰۰ psi تنظیم می‌شود. سیلندر تزریق آب‌نمک از آب سازندی پر می‌گردد و به پلاگ در دبی‌های مختلف تزریق می‌شود. تزریق آب سازندی در دبی‌های مختلف تا جایی ادامه پیدا می‌کند که افت فشار اندازه‌گیری

1. Core Holder



شکل ۵- طراحی کلی آزمایش‌ها

بحث و نتایج

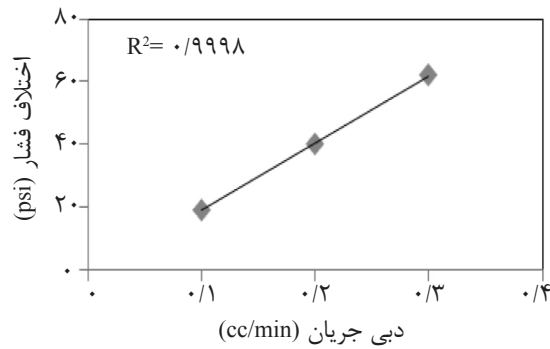
هدف اصلی این بخش بررسی تغییر نفوذپذیری حاصل از تزریق اسید در دو حالت اسید معمولی و اسید مغناطیسی و مقایسه اثر میدان مغناطیسی بر فرآیند نفوذپذیری حاصل از اسیدکاری ماتریکس می‌باشد.

تزریق هیدروکلریک اسید ۵٪ معمولی

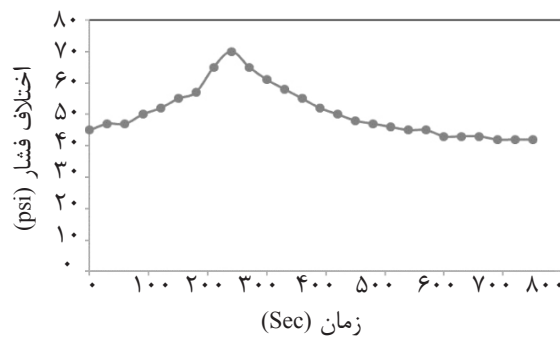
در این آزمایش ابتدا نفوذپذیری پلاگ A توسط آب سازندی (آب نمک ppm ۴۰۰۰۰) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری دستگاه روی سه دبی تنظیم گردید. پس از آن سیلاب‌زنی به نمونه آغاز شد. هنگامی که اختلاف فشار دو سر نمونه به حالت پایا می‌رسید اختلاف فشار توسط سیستم ثبت شده و سیستم به طور اتوماتیک دبی بعد از اندازه‌گیری می‌کرد. پس از ثبت سه اختلاف فشار نموداری مطابق با نمودار شکل ۶ توسط نرم‌افزار متصل به سیستم رسم می‌شد. پس از رسم این نمودار نفوذپذیری نیز توسط دستگاه ارائه می‌شد. با توجه به نمودار شکل ۶ نفوذپذیری پلاگ A برابر با ۰/۶۴۱ mD به دست می‌آید. پس از اندازه‌گیری نفوذپذیری تزریق هیدروکلریک اسید ۵٪ با دبی ۰/۲ ml/min ادامه یافت. پس از ایجاد حالت پایا، برای به دست آوردن تغییرات نفوذپذیری حاصل از تزریق اسید، مرحله تزریق آب سازندی برای اندازه‌گیری نفوذپذیری حاصله از تزریق اسید شروع شد. نمودار

افزایش اختلاف فشار دو سر پلاگ بر حسب زمان و بر حسب حجم خلل و فرج^۱ در طی فرآیند تزریق اسید معمولی در اشکال ۷ و ۸ نشان داده شده است. در ابتدای ورود اسید فشار به شدت افزایش پیدا می‌کند و در ادامه فشار به تدریجی کاهش یافته و هنگامی که به حالت تقریباً پایا رسید، تزریق اسید به نمونه متوقف گردید. (هنگامی که اسید به ابتدای سنگ می‌رسد به دلیل واکنش اسید با سنگ اختلاف فشار افزایش می‌یابد. این افزایش فشار بیانگر تولید کرم‌راهه می‌باشد. هنگامی که اختلاف فشار کاهش یابد بدین معنی است که کرم‌راهه تشکیل شده است و این کرم‌راهه در حال رشد است در این حالت اختلاف فشار به حالت پایا می‌رسد. باید توجه داشت که اگر در این مرحله تزریق اسید به موقع قطع نشود کرم‌راهه شبیه به یک لوله عمل کرده و اختلاف فشار دو طرف پلاگ صفر می‌شود در این حالت حتی نمی‌توان تراوایی پلاگ را با آب اندازه‌گیری نمود). سپس جریان آب سازند به نمونه شروع و با پایا شدن فرآیند، اختلاف فشار نفوذپذیری مجدداً اندازه‌گیری شد. نمودار اختلاف فشار بر حسب دبی برای محاسبه نفوذپذیری پلاگ A پس از تزریق اسید ۵٪ معمولی در شکل ۹ نشان داده شده است نفوذپذیری به ۰/۷۲۵۸ mD رسیده است.

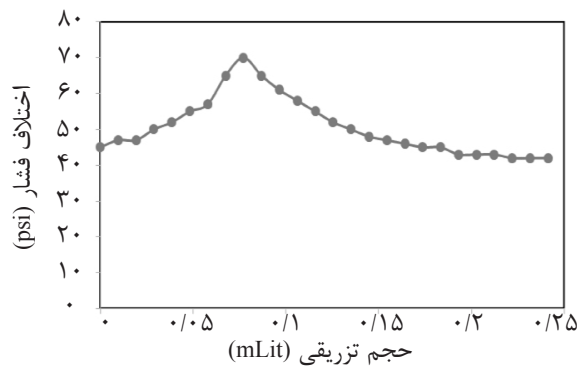
1. Pore Volume



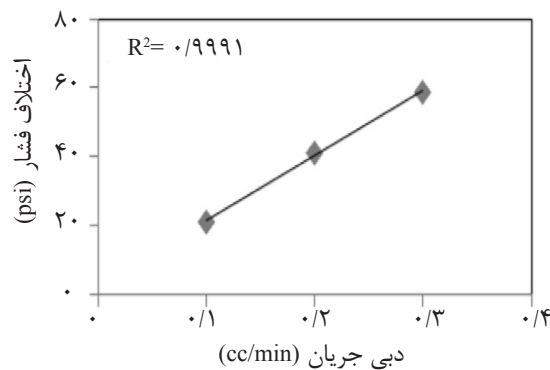
شکل ۶- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ A برحسب دبی آب سازند تزریقی به پلاگ A. قبل از تزریق اسید



شکل ۷- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ A برحسب زمان



شکل ۸- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ A برحسب حجم اسید تزریق شده



شکل ۹- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ A برحسب دبی آب سازند تزریقی بعد از تزریق اسید

آزمایش اول می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که اسید مغناطیسی به مراتب عملکردی بهتر از اسید معمولی در افزایش نفوذپذیری دارد.

تزریق هیدروکلریک اسید ۱۵٪ معمولی

این آزمایش به‌منظور بررسی تأثیر هیدروکلریک اسید ۱۵٪ روی نفوذپذیری انجام پذیرفت. روند این آزمایش نیز شبیه آزمایشات پیشین می‌باشد. نفوذپذیری پلاگ C در شرایط آزمایش و با توجه به شکل ۱۴، ۴۲/۴۳ mD است. در این آزمایش نیز پس از اندازه‌گیری نفوذپذیری، سیلندر تزریق اسید با هیدروکلریک اسید ۱۵٪ پر شد. چون در هنگام پر کردن سیلندر تزریق، اختلاف فشار دو سر پلاگ افت پیدا می‌کند برای پایا شدن اختلاف فشار دو سر پلاگ آب سازندی با دبی ۱ mL/min به پلاگ تزریق شد و پس از آن مرحله تزریق اسید شروع شد. همانند روند آزمایش‌های پیشین، در اثر واکنش شیمیایی، اختلاف فشار دو سر پلاگ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ اختلاف فشار برحسب زمان و اختلاف فشار برحسب حجم اسید تزریق‌شده برای پلاگ C نشان داده شده است. روند آزمایش در حین تزریق اسید را نشان می‌دهد. از شکل ۱۷ نفوذپذیری پلاگ C بعد از تزریق اسید محاسبه شده است. در این آزمایش تراوایی به میزان ۵۰٪ نسبت به حالت اولیه افزایش یافته است و به مقدار ۶۳/۶۵ mD رسیده است. همان‌طور که انتظار داشتیم، عملکرد بهتری از اسید ۵٪ داشته است.

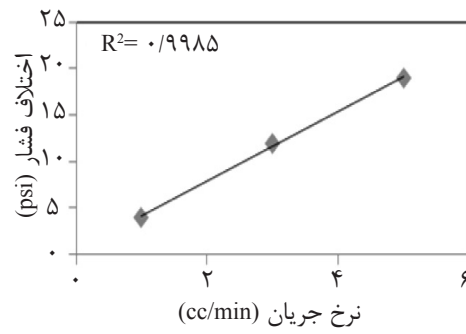
تزریق اسید مغناطیسی ۱۵٪ با چگالی شار ۰/۴۵ تسلا (۴۵۰۰ Gs)

در این آزمایش نیز همانند آزمایش‌های پیشین، ابتدا نفوذپذیری پلاگ D محاسبه شده است. نفوذپذیری با توجه به شکل ۱۸، ۶۳/۶۵ mD است. در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ اختلاف فشار برحسب زمان و اختلاف فشار برحسب حجم اسید تزریق‌شده به پلاگ برای پلاگ D نشان داده شده است.

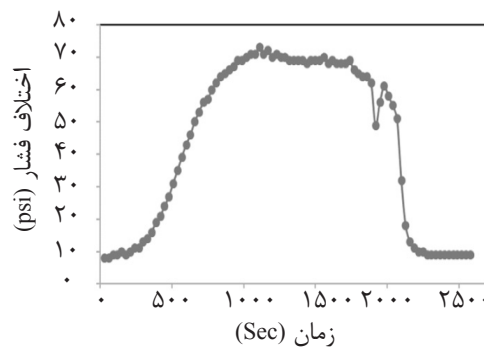
به دلیل کم بودن تراوایی سنگ در این آزمایش نسبت به آزمایشات دیگر از درصد افزایش تراوایی نسبت به قبل از آزمایش در فرآیند اسیدکاری استفاده شده است. با مقایسه نفوذپذیری قبل و بعد از فرآیند، نفوذپذیری به مقدار ۱۳/۲٪ افزایش پیدا کرده است.

تزریق اسید مغناطیسی ۵٪ با چگالی شار ۰/۴۵ تسلا (۴۵۰۰ Gs)

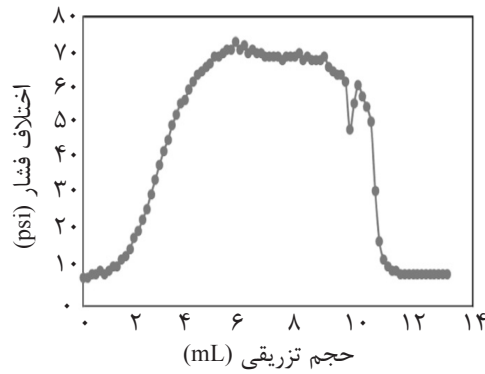
در این آزمایش نیز همانند آزمایش اول ابتدا نفوذپذیری پلاگ B در سه دبی اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نمودار اختلاف فشار برحسب دبی، اختلاف فشار برحسب زمان و اختلاف فشار برحسب حجم اسید تزریق‌شده به پلاگ برای پلاگ B نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ نفوذپذیری پلاگ B برابر با ۵۳/۶۵ mD به دست می‌آید. هم‌زمان با اندازه‌گیری نفوذپذیری، آب توسط پمپ گل با دبی ۳ L/min به گردش درآورده شده و از میدان با چگالی شار ۴۵۰۰ Gs عبور داده می‌شود. گردش آب از میدان مغناطیسی به مدت ۲ hr به طول می‌انجامد. پس از اندازه‌گیری نفوذپذیری و رقیق نمودن اسید غلیظ با آب مغناطیسی، سیلندر تزریق اسید با اسید مغناطیسی پر می‌شود. چون در هنگام پر کردن سیلندر تزریق اختلاف فشار دو سر پلاگ افت پیدا می‌کند برای پایا شدن اختلاف فشار دو سر پلاگ آب سازندی با دبی ۲ mL/min به پلاگ تزریق می‌شود. پس از پایا شدن اختلاف فشار، مرحله تزریق اسید مغناطیسی شروع می‌شود. در این مرحله دبی تزریق ۲ mL/min می‌باشد. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، روند نمودار ابتدا صعودی و سپس نزولی تا رسیدن به حالت پایا می‌باشد. نمودار اختلاف فشار بر حسب دبی به منظور محاسبه نفوذپذیری پلاگ B که بعد از تزریق اسید مغناطیسی است در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است نفوذپذیری بعد از فرآیند به میزان قابل توجهی افزایش داشته است و به میزان ۸۰/۴۸ mD رسیده است (حدود ۵۰٪ افزایش داشته است). از دو



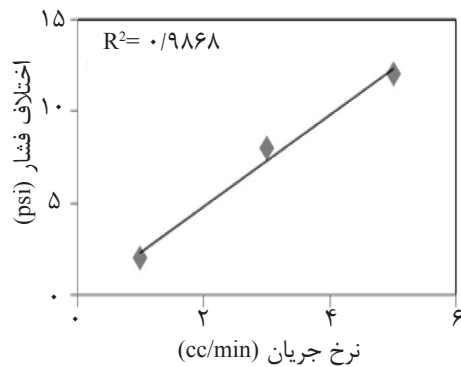
شکل ۱۰- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ B برحسب دبی آب سازند تزریقی قبل از تزریق اسید



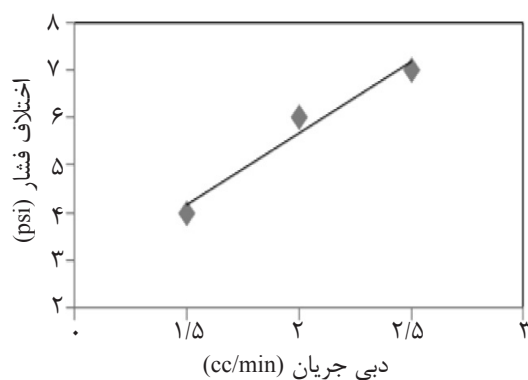
شکل ۱۱- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ B برحسب زمان



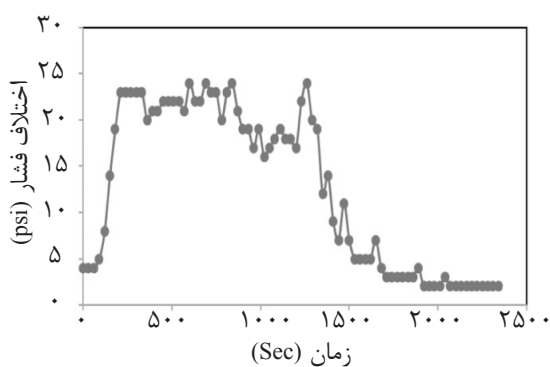
شکل ۱۲- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ B برحسب حجم اسید تزریق شده



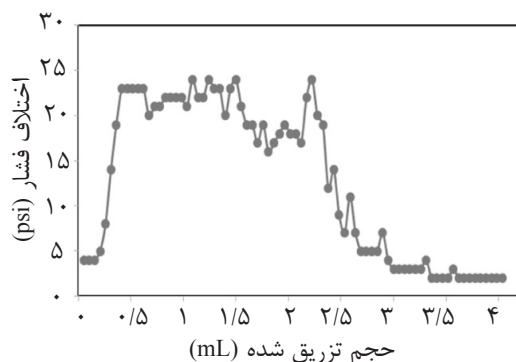
شکل ۱۳- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ B برحسب دبی آب سازند تزریقی بعد از تزریق اسید



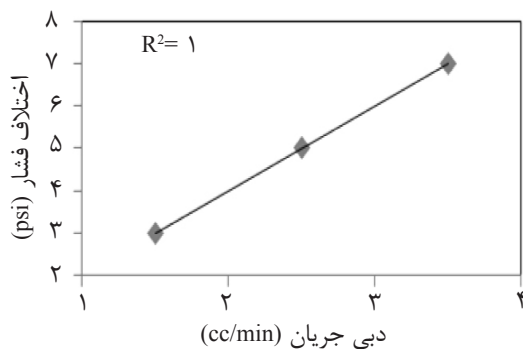
شکل ۱۴- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ C برحسب دبی اسید تزریقی قبل از تزریق اسید



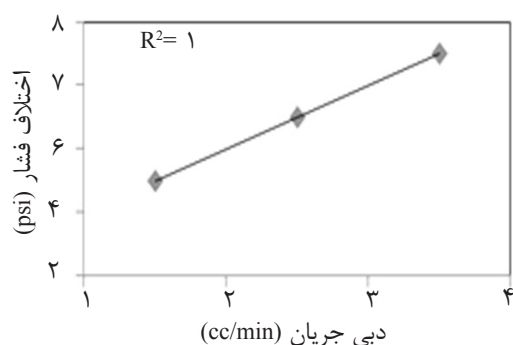
شکل ۱۵- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ C برحسب زمان



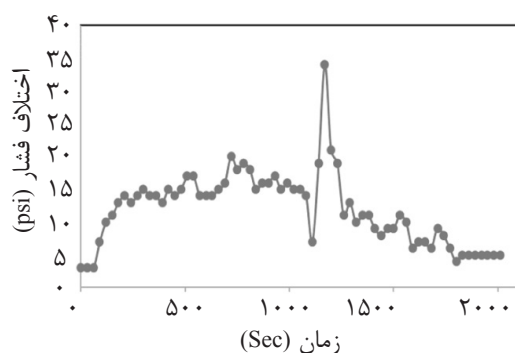
شکل ۱۶- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ C برحسب حجم اسید تزریق شده



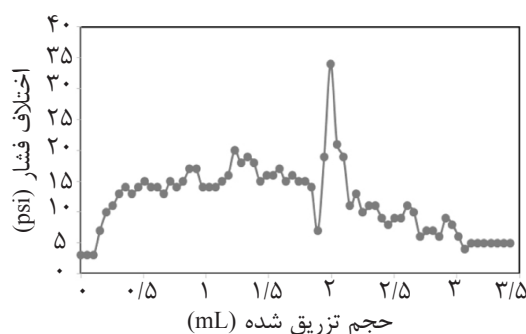
شکل ۱۷- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ C برحسب دبی آب سازند تزریقی بعد از تزریق اسید



شکل ۱۸- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ D برحسب دبی اسید تزریقی قبل از تزریق اسید



شکل ۱۹- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ D برحسب زمان



شکل ۲۰- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ D برحسب حجم اسید تزریقی

ابتدا صعودی و سپس نزولی تا رسیدن به حالت پایا می‌باشد (هنگامی که اسید به ابتدای سنگ می‌رسد به دلیل واکنش اسید با سنگ اختلاف فشار افزایش می‌یابد. این افزایش فشار بیانگر تولید کرم‌راهه می‌باشد. هنگامی که اختلاف فشار کاهش یابد بدین معنی است که کرم‌راهه تشکیل شده است و این کرم‌راهه در حال رشد است در این حالت اختلاف فشار به حالت پایا می‌رسد. باید توجه داشت که اگر در این مرحله تزریق اسید به موقع قطع نشود کرم‌راهه شبیه به یک لوله عمل کرده و اختلاف فشار دو طرف پلاگ صفر می‌شود در این حالت حتی نمی‌توان تراوایی پلاگ را با آب اندازه‌گیری نمود). نمودار اختلاف

هم‌زمان با اندازه‌گیری نفوذپذیری، آب توسط پمپ گل با دبی ۳ mL/min به گردش درآمده و از میدان با چگالی شار ۴۵۰۰ Gs عبور داده شد. گردش آب از میدان مغناطیسی به مدت ۲ hr به طول انجامید. پس از اندازه‌گیری نفوذپذیری و رقیق نمودن اسید با آب مغناطیسی، سیلندر تزریق اسید با اسید مغناطیسی پر شد. چون در هنگام پر کردن سیلندر تزریق اختلاف فشار دو سر پلاگ افت پیدا می‌کند برای پایا شدن اختلاف فشار دو سر پلاگ آب سازندی با دبی ۱ mL/min به پلاگ تزریق شد و پس‌از آن، مرحله تزریق اسید مغناطیسی شروع شد. در این مرحله دبی تزریق همان ۱ mL/min است. همان‌طور که انتظار داشتیم، روند نمودار

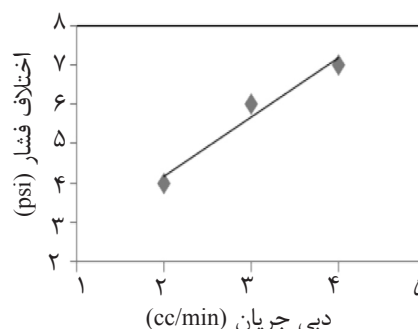
جدول ۲- میزان افزایش نفوذپذیری برحسب نوع اسید

نوع اسید	میزان افزایش نفوذپذیری
هیدروکلریک اسید ۵٪ معمولی	٪۱۸
هیدروکلریک اسید ۵٪ مغناطیسی	٪۵۰
هیدروکلریک اسید ۱۵٪ معمولی	٪۵۰
هیدروکلریک اسید ۱۵٪ مغناطیسی	٪۳۳

نتیجه گیری

تزریق اسید در غلظت های متفاوت در دو حالت اسید معمولی و اسید مغناطیسی نتایج جالبی را در بر داشت که با بررسی های بیشتر در غلظت های دیگر می توان نتایج را به مقیاس میدان بسط داد. اسید در حالت ۵٪ معمولی حدود ۱۸٪ بهبود تراوایی نشان داد در حالی که این مقدار بهبود تراوایی در حالت ۵٪ مغناطیسی حدود ۵۰٪ گزارش شد. این مقدار تفاوت در بهبود تراوایی در اثر تزریق اسید، یک نکته قابل توجه می باشد. مسلماً با بهبود تراوایی بیشتر در اثر تزریق اسید مغناطیسی در میدان نفتی تحت عملیات اسیدکاری می تواند باعث رشد چشمگیر میزان تولید کالای استراتژیک نفت شود. اما در حالت ۱۵٪ نتایج متفاوت تری ثبت گردید. در این حالت ۱۵٪ عادی چیزی حدود ۵۰٪ بهبود تراوایی را نشان داد در صورتی که در حالت مغناطیسی این غلظت تنها ۳۳٪ بهبود تراوایی را شاهد بودیم. علت این امر همان گونه که قبلاً گفته شد به علت ساختار مولکولی آب مغناطیسی و اثر آن بر عملکرد اسید می باشد. چون در اسید ۵٪ مغناطیسی میزان بیشتری آب مغناطیسی استفاده شده است بهبود بیشتری را شاهد بودیم. این نتایج ثبت شده گواه این مطلب است که استفاده از اسید مغناطیسی تا یک غلظت بهینه می تواند نتایج قابل قبول و مناسبی داشته باشد. همان گونه که اسید ۱۵٪ مغناطیسی بهبود تراوایی کمتر از عملکرد اسید ۵٪ مغناطیسی داشته است که نشانگر این مطلب است که غلظت ۱۵٪ بالاتر از آن غلظت بهینه مذکور می باشد. برای رسیدن دقیق به این غلظت نیز نیازمند بررسی نمونه های مشابه پلاگ و همچنین غلظت های متفاوت تر می باشد که شرایط انجام این آزمایشات در این مطالعات صورت گرفته، وجود نداشت.

فشار دوسر پلاگ D بر حسب دبی برای محاسبه نفوذپذیری این که بعد از تزریق اسید مغناطیسی است در شکل ۲۱ نشان داده شده است. نفوذپذیری به با مقایسه نفوذپذیری قبل و بعد از فرآیند اسیدکاری می توان اینگونه نتیجه گرفت که نفوذپذیری افزایش داشته است (حدود ۳۳٪). از دو آزمایش که با اسید ۱۵٪ جرمی صورت گرفت می توان اینگونه نتیجه گرفت، که اسید معمولی ۱۵٪ عملکرد بهتری از اسید مغناطیسی ۱۵٪ جرمی دارد.



شکل ۲۱- نمودار اختلاف فشار دوسر پلاگ D برحسب دبی آب سازند تزریقی بعد از تزریق اسید

تفسیر نتایج

از دلایل افزایش تراوایی اسید مغناطیسی ۵٪ نسبت به حالت معمولی، می توان به خواص غیرعادی آب مربوط به پیوند هیدروژنی گسترده بین مولکول های آن اشاره کرد. همان طور که پیش از این نیز اشاره شد، مولکول های آب می توانند ساختار دسته های تشکیل دهند. به طور کلی، هر دسته شامل حدود ۱۰۰ مولکول آب در دمای اتاق است. در حضور میدان مغناطیسی، نیروی مغناطیسی می تواند دسته ها را به تک مولکول ها یا دسته های کوچک تر بشکند و بدین ترتیب فعالیت آب بهبود می یابد [۹]. در فرآیند اسیدکاری کربناته ها برای بهبود فرآیند بایستی کرم راهه تشکیل گردد به نظر نویسندگان هنگامی که مولکول ها در یک راستا جهت گیری نمایند، منجر به تولید یک کرم راهه بدون شاخه و یا با شاخه های محدود می شود در حالی که استفاده از اسید معمولی ممکن است شاخه های متعدد به دلیل عدم وجود نظم خاص در حرکت مولکول ها ایجاد گردد. مقدار آب موجود در اسید مغناطیسی ۱۵٪ به مراتب کمتر از مقدار آب موجود در اسید مغناطیسی ۵٪ است به همین دلیل تراوایی در اسید ۵٪ مغناطیسی افزایش بیشتری نسبت به اسید ۱۵٪ دارد. خلاصه نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

مراجع

- [1]. Brower J., "Magnetic water treatment," Pollution Engineering, Vol. 37, pp. 26-28, 2005.
- [2]. Lobley J., "The magnetic treatment of water for scaling, corrosion and biological control-fact or fiction," The 1990 International Maintenance Management Conference, 1990.
- [3]. Tai C. Y., Chang M. C., Shieh R. J., and Chen T. G., "Magnetic effects on crystal growth rate of calcite in a constant-composition environment," Journal of Crystal Growth, Vol. 310, pp. 3690-3697, 2008.
- [4]. Busch K. W., and Busch M. A., "Laborator studies on magnetic water treatment and their relationship to a possible mechanism for scale reduction," Desalination, Vol. 109, pp. 131-148, 1997.
- [5]. Parsons S. A., Wang B. L., Judd S. J., and Stephenson T., "Magnetic treatment of calcium carbonate scale—effect of pH control," Water Research, Vol. 31, pp. 339-342, 1997.
- [6]. Sueda M., Katsuki A., Nonomura M., Kobayashi R., and Tanimoto Y., "Effects of high magnetic field on water surface phenomena," The Journal of Physical Chemistry C, Vol. 111, pp. 14389-14393, 2007.
- [7]. I. Otsuka, S. Ozeki, "Does magnetic treatment of water change its properties?," The Journal of Physical Chemistry B, Vol. 110, pp. 1509-1512, 2006.
- [8]. Quinn C. J., Molden T. C., and Sanderson C. H., "Magnetic treatment of water prevents mineral build-up," Iron and Steel Engineer, Vol. 74 pp. 47-52, 1997.
- [9]. Su N. and Wu C. F., "Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash," Cement and Concrete Composites, Vol. 25 pp. 681-688, 2003.
- [10]. Williams B. B., Gidley J. L., and Schechter R. S., "Acidizing fundamentals," Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers of AIME, 1979.
- [11]. Safari A., Rashidi F., Kazemzadeh E., and Hassani A., "Determining optimum acid injection rate for a carbonate gas reservoir and scaling the result up to the field conditions: A case study," Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 20, pp. 2-7, 2014.
- [12]. Daccord G., Chemical dissolution of a porous medium by a reactive fluid, Physical review letters, Vol. 58, pp. 479, 1987.
- [13]. Hung K., Hill A., and Sepehrnoori K., "A mechanistic model of wormhole growth in carbonate matrix acidizing and acid fracturing," Journal of Petroleum Technology, Vol. 41, pp. 59-66, 1989.
- [14]. Fredd C. and Miller M., "Validation of carbonate matrix stimulation models," in: SPE International Symposium on Formation Damage Control, pp. 39-52, 2000.
- [15]. Golfier F., Zarcone C., Bazin B., Lenormand R., Lasseux D., and Quintard M., "On the ability of a Darcy-scale model to capture wormhole formation during the dissolution of a porous medium," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 457 pp. 213-254, 2002.
- [16]. Fredd C. and Fogler H., "Optimum conditions for wormhole formation in carbonate porous media: Influence of transport and reaction," SPE Journal, Vol. 4, pp. 196-205, 1999.
- [17]. Wang Y., Hill A., and Schechter R., "The optimum injection rate for matrix acidizing of carbonate formations," in: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 1993.
- [18]. Mumallah N., "Factors influencing the reaction rate of hydrochloric acid and carbonate rock," in: SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Society of Petroleum Engineers, 1991.