

روش‌های بهینه‌سازی و افزایش بازده اسیدکاری در مخازن هیدروکربنی

سید مجتبی بصیر*، خلیل شهبازی، دانشگاه صنعت نفت اهواز

چکیده

اسیدکاری^۱ به عنوان روشی جهت انگیزش چاه^۲ در صنعت نفت به طور گسترده کاربرد دارد. البته این روش صرفاً جهت رفع آسیب دهانه چاه^۳ ناشی از اثر گل حفاری و تکمیل و مشبک کاری^۴ چاه استفاده می‌شود و برای افزایش تراوایی مخزن کاربرد ندارد. همانند سایر روش‌های انگیزش، در این روش نیز باید برخی ملاحظات علمی و عملیاتی در نظر گرفته شود تا فرآیند به صورت بهینه انجام شود. برای دستیابی به این مهم، در تاریخچه اسیدکاری، برخی روش‌های معرفی شده آزمایشگاهی، میدانی و مدل‌سازی مانند بهینه‌سازی دبی تزریق، استفاده از روش‌های تاخیری^۵ در اسیدکاری، پیش تزریق^۶ مناسب و روش‌های انحراف جریان اسید^۷ به نواحی کم تراوا در مخازن ماسه سنگی و کربناته معرفی شده است. در این مقاله به معرفی این روش‌ها با هدف بهبود کیفیت عملیات اسیدکاری توسط شرکت‌های پیمانکار و آشنایی محققین با زمینه‌های جدید پژوهش در موضوع اسیدکاری پرداخته شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۵/۲۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۷/۰۶

واژگان کلیدی:

اسیدکاری، انگیزش چاه، بهینه‌سازی، مخازن ماسه سنگی، مخازن کربناته

مقدمه

اسیدکاری در مخازن ماسه سنگی و کربناته معرفی شده و نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی، میدانی و مدل‌سازی انجام شده در هر کدام از روش‌ها، در بخش‌های ۱ تا ۶ به تفصیل بیان شده است.

۱- انتخاب مناسب نوع اسید و غلظت آن

امروزه در اسیدکاری، هم از اسیدهای معدنی و هم اسیدهای آلی استفاده می‌شود. اسیدهای معدنی مانند هیدروکلریک اسید و هیدروفلوئوریک اسید (HF) و اسیدهای آلی مانند فرمیک اسید و استیک اسید، از مواردی هستند که در اسیدکاری متداول است. از هیدروکلریک اسید به تنهایی معمولاً برای سازندهای کربناته استفاده می‌شود، ولی از هیدروفلوئوریک اسید فقط به صورت ترکیبی با هیدروکلریک اسید استفاده می‌شود. این اسید با اضافه کردن آمونیوم بی‌فلوئورید (ABF) به هیدروکلریک اسید به دست می‌آید. هیدروفلوئوریک اسید می‌تواند، سیلیکا (ماسه) یا سیلیکات رسی، گل، شیل و فلدسپار را در خود حل کند. در حالی که هیدروکلریک اسید، محصولات واکنش‌های ثانویه را در خود حل کرده و بر نرخ واکنش تاثیر دارد. اسیدهای آلی مانند فرمیک اسید و استیک اسید ضعیف‌تر از هیدروکلریک اسید بوده و فرمیک اسید قوی‌تر از استیک اسید است. این اسیدها به علت درجه خوردگی کمتر، برای اسیدکاری در دمای بالا کاربرد دارند. همچنین از این اسیدها جهت کاهش قدرت هیدروکلریک اسید برای رسیدن اسید به عمق بیشتر استفاده می‌شود [۲].

برای اولین بار استفاده از اسید جهت انگیزش چاه و افزایش تولید نفت‌خام از مخازن نفتی در سال ۱۸۹۵ آزمایش شد. در آن زمان از هیدروکلریک اسید (HCl) و سولفوریک اسید (H₂SO₄) جهت اسیدکاری استفاده می‌شد. البته اگرچه این روش مؤثر واقع شد، اما خوردگی تجهیزات فلزی سرچاهی و درون چاهی باعث شد این روش تا مدت‌ها کنار گذاشته شود [۱].

بین سال‌های ۱۹۲۵ تا ۱۹۳۰، دوباره اسیدکاری آزمایش شد. این بار از هیدروکلریک اسید جهت انحلال رسوبات چاه‌های میدان گلن پول در اوکلاهما و افزایش تولید از سازند سنگ آهکی جفرسون در کنتاکی استفاده شد. هیچ کدام از این تلاش‌ها به نتیجه نرسید تا اسیدکاری بار دیگر کنار گذاشته شود [۱].

با کشف مواد ضد خوردگی حاوی آرسنیک در سال ۱۹۳۲، اسیدکاری چاه‌های نفتی مجدد احیا شد. این مواد به هیدروکلریک اسید اجازه می‌داد، بدون خوردگی ادوات فلزی، با سنگ مخزن واکنش داده و باعث بهبود تراوایی آن یا رفع آسیب سازند شود. در آن زمان، شرکت‌های پیروویل و دو کمیکال از این مواد به همراه هیدروکلریک اسید جهت انگیزش چاهی از سازندی سنگ آهکی در ایزابلا کانتی استفاده کردند که نتایج عالی به دست آمد. وقتی این روش برای چاه‌های مجاور نیز انجام شد نتایج بسیار خوبی حاصل شد تا صنعت اسیدکاری از آن زمان متولد شود [۱].

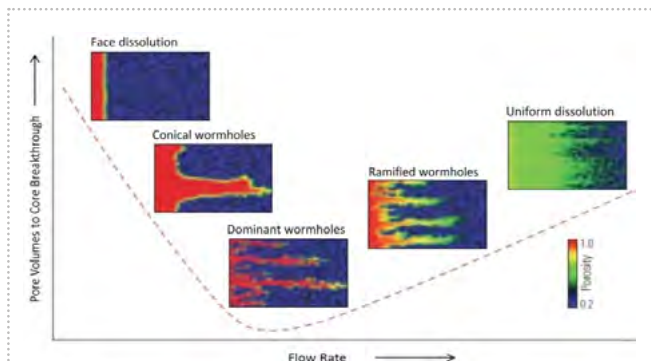
در این مقاله، روش‌های مختلف جهت بهینه‌سازی و افزایش بازده

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (s.m.bassir@put.ac.ir)

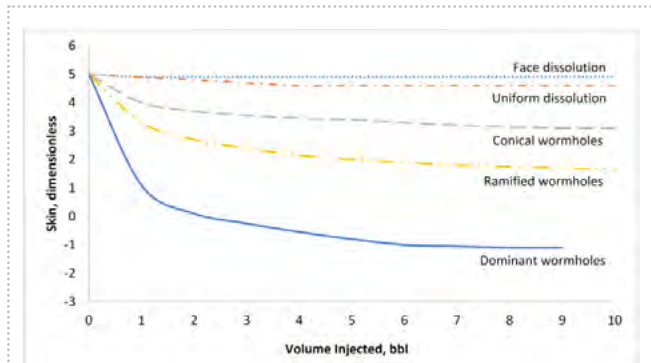
بالا تر، حفره جریانی مخروطی شکل^{۱۱} ایجاد می‌شود و مقدار قابل توجهی از اسید به جای پیشروی در مغزه، با دیواره حفره جریانی واکنش داده و شعاع آن به تدریج افزایش می‌یابد؛ در صورتی که مطلوب، افزایش طول حفره جریانی و نه شعاع آن است. در دبی متوسط (دبی تزریق بهینه)، اسید با سرعت متوسطی حرکت کرده و یک حفره جریانی غالب^{۱۲} به وجود می‌آورد. در دبی بیشتر از بهینه، اسید به درون منافذ ریز سنگ هل داده می‌شود و حفره جریانی به صورت شاخه‌دار^{۱۳} می‌شود. در دبی بسیار بالا، اسید وارد محیط متخلخل می‌شود، اما به علت زمان کم با سنگ واکنش نداده و الگوی انحلال یکنواخت^{۱۴} را به وجود می‌آورد [۸].

البته الگوی انحلال سنگ بر میزان کاهش ضریب پوسته تاثیر مستقیم دارد. زیرا میزان نفوذ اسید در سنگ را نشان می‌دهد. شکل ۲- تاثیر ساختار حفره جریانی بر بازده اسیدکاری را نشان می‌دهد که بیشترین کاهش در ضریب پوسته مربوط به حفره جریانی غالب است. این الگوی انحلال زمانی رخ می‌دهد که اسید با دبی بهینه تزریق شود. این دبی با مطالعات آزمایشگاهی برای هر سیستم سنگ و سیال مشخص می‌شود [۸].

این و همکارانش در سال ۲۰۱۵ رابطه دبی بهینه را با تراوایی و ساختار منافذ سنگ به طور آزمایشگاهی بر روی چهار مغزه سنگ آهکی با تراوایی متفاوت بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد حجم



شکل ۱ | انواع الگوهای انحلال سنگ توسط اسید [۸]



شکل ۲ | تاثیر ساختار حفره جریانی بر میزان کاهش ضریب پوسته [۸]

توماس و همکارانش در سال ۲۰۰۲ تاثیر نسبت جرمی هیدروکلریک اسید به هیدروفلوئوریک اسید را بر رسوب هیدرات سیلیکات در یک مخزن گازی ماسه سنگی با دمای بالا بررسی کردند که مشخص شد، در خروجی مغزه‌ها، غلظت سیلیسیم به آلومینیم رابطه معکوس با میزان رسوب دارد و نسبت بزرگ‌تر، بهتر است. تا اواسط دهه ۱۹۹۰، نسبت جرمی ۹ درصد هیدروکلریک اسید به ۱ درصد هیدروفلوئوریک اسید معمول بود، ولی آزمایش‌ها نشان داد، نسبت سیلیسیم به آلومینیم خروجی برای نسبت اسید ۹ به ۱ کمتر از ۱۲ به ۳ است و کمترین نسبت سیلیسیم به آلومینیم مربوط به نسبت اسید ۴ به ۱ می‌باشد. بنابراین بهترین حالت برای جلوگیری از تشکیل رسوب هیدرات سیلیکات، نسبت جرمی ۱۲ درصد هیدروکلریک اسید به ۳ درصد هیدروفلوئوریک اسید است [۳].

در سال‌های اخیر، استفاده از آمینو پلی کربوکسیلیک اسید (APC) جهت استفاده در عملیات اسیدکاری در سازندهای ماسه سنگی و سنگ آهکی در دمای بالا رواج پیدا کرده است. علت آن، قدرت اسیدی پایین نسبت به هیدروکلریک اسید و حتی اسیدهای آلی است که به تبع آن کاهش خوردگی فلزات و افزایش عمر ادوات فلزی را به همراه دارد [۴].

ریس و همکارانش در شرکت‌های هالیرتون و شورون در سال ۲۰۱۵، انجام موفقیت‌آمیز اسیدکاری به وسیله آمینو پلی کربوکسیلیک اسید را در چاهی از یک میدان کربناته و فراساحلی در غرب آفریقا، گزارش کردند. آنها مزایایی این اسید را قدرت نفوذ بیشتر به علت قدرت اسیدی کمتر، نیاز کمتر به اضافه کردن مواد ضد خوردگی، ضد امولسیون و ضد لجن، سازگاری بیشتر با سنگ مخزن و کاهش خطر آسیب سازند [۵] اعلام کردند.

۲- بهینه‌سازی دبی تزریق

وقتی اسید به سازند تزریق می‌شود، مقداری از سنگ اطراف چاه را در خود حل کرده و به درون سازند نفوذ می‌کند. به کانال جریانی که به وسیله اسید در سنگ تشکیل می‌شود، حفره جریانی^۸ گفته می‌شود. هرچه طول حفره جریانی بیشتر باشد، مقدار ضریب پوسته^۹ کمتر شده و در واقع اسیدکاری موثرتر است [۶]. دبی تزریق پایین باعث مصرف اسید در عمق نفوذ کم و در واقع نفوذ سطحی اسید می‌شود در حالی که دبی تزریق بالای اسید باعث منشعب شدن حفره جریانی می‌شود؛ بنابراین باید یک دبی بهینه انتخاب شود تا حفره جریانی خطی، باریک و بدون انشعاب در محیط متخلخل تشکیل شود. این دبی بهینه به عواملی مانند جنس کانی‌های سنگ، غلظت اسید و دمای واکنش بستگی دارد [۷].

در شکل ۱- رابطه دبی تزریق اسید و الگوی انحلال کانی‌های سنگ توسط اسید نشان داده شده است. براین اساس دبی تزریق کم باعث می‌شود، ورودی مغزه به صورت سطحی^{۱۱} خورده شود و باید حجم زیادی از اسید تزریق شود تا به خروجی مغزه برسد. در دبی‌های کمی

دیگر این روش، صرفه‌جویی در مقدار اسید مورد نیاز جهت برگرداندن تراوایی سنگ به حالت اولیه و یا افزایش بیشتر آن است. برای مثال، با حجم اسیدی که در حالت بدون پیش تزریق می‌تواند تراوایی را فقط به حالت اولیه بازگرداند، بعد از تزریق گاز، تراوایی سنگ حدود ۳۰۰ درصد تراوایی اولیه افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد، به علت انحلال‌پذیری بیشتر دی‌اکسید کربن در نفت و توانایی بیشتر آن در جابه‌جا کردن نفت، استفاده از این گاز نسبت به نیتروژن مؤثرتر است [۱۲]. در سال ۲۰۰۳ نیز شکلا و همکارانش با انجام آزمایش بر روی مغزه‌های کربناته، وجود گاز در محیط متخلخل سنگ را قبل از اسیدکاری مؤثر ارزیابی کرده و نشان دادند در این روش، هم حجم اسید مصرفی کمتر شده و هم حفره جریانی باریک‌تر و کم‌شاخه‌تری در سنگ به وجود می‌آید [۶].

در سال ۲۰۰۰، العنازی و همکارانش در شرکت سعودی آرامکو، پیش تزریق آمونیوم کلرید (NH_4Cl) ۵۰ درصد جرمی را با موفقیت در میدانی ماسه سنگی در عربستان سعودی آزمایش کردند. در این حالت یون‌های سدیم و پتاسیم از کانی‌های رسی و فلدسپار جدا شده و به مناطق دور از دهانه چاه منتقل می‌شوند [۱۳].

۴- اسیدهای تاخیری

هدف از اسیدکاری، ایجاد کانال‌های جریانی در اطراف چاه است؛ از طرفی قدرت اسیدی بالا، باعث انحلال سطحی بیشتر در سنگ و عدم نفوذ اسید به اعماق بیشتر و ایجاد کانال‌های جریانی می‌شود. بنابراین محققین زیادی به دنبال ماده افزودنی برای کاهش قدرت اسید، بدون کاهش بازده اسیدکاری بوده‌اند [۱۴].

اولین بار، ناکس و همکارانش در سال ۱۹۶۴، عاملی تاخیری به هیدروکلریک اسید اضافه کردند. این عامل سورفاکتانتی^{۱۸} آنیونی بود که باعث کند شدن واکنش اسید با سنگ می‌شود و در صورتی که سورفاکتانت‌های کاتیونی و غیریونی چنین تاثیری ندارند [۱۴].

گوئیدری و همکارانش در سال ۱۹۸۹ روشی جدید برای اسیدکاری سازند آهکی شیعیبا- سازندی نفتی با تراوایی پایین- در شمال عمان ارائه کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد، افزودن نیتروژن به صورت امولسیون در سیستم اسیدی باعث کاهش نرخ واکنش بین اسید و سنگ می‌شود. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که نیتروژن‌دار کردن اسید باعث تشکیل سه فاز امولسیون قطرات اسید، حباب‌های نیتروژن و نفت می‌شود. چرا که نیتروژن در اسید و نفت حل نمی‌شود. بنابراین به صورت فازی گسسته باقی می‌ماند. در واقع فاز پیوسته نفت، دو فاز اسید و نیتروژن را در بر می‌گیرد؛ بنابراین در این شرایط حباب‌های نیتروژن و قطرات اسید برای واکنش با سنگ رقابت می‌کنند و به سبب سطح انرژی بالاتر حباب‌های نیتروژن، این حباب‌ها زودتر واکنش می‌دهند. در نتیجه وجود نیتروژن در اسید، مانعی برای واکنش اسید با سنگ بوده و باعث می‌شود، اسید تا شعاع بیشتری از سازند پیشروی کند. شکل- ۳ نشان می‌دهد نیتروژن‌دار کردن سیستم اسیدی، به طور قابل توجهی

اسید تزریق شده تا لحظه خروج اسید از انتهای مغزه، با تراوایی رابطه لگاریتمی دارد؛ ولی دبی بهینه غالباً توسط ساختار منافذ سنگ، کنترل می‌شود و اندازه بزرگ‌ترین منفذ، تاثیر مستقیم روی میزان طول حفره جریانی دارد [۹].

جمعه و همکارانش در سال ۲۰۱۵ تزریق اسید با دبی ثابت^{۱۵} (CVR) و فشار ثابت^{۱۶} (CIP) را به طور آزمایشگاهی بر روی مغزه‌های سنگ آهکی ایندیانا با هم مقایسه کردند. تزریق اسید با دبی ثابت مرسوم‌تر است؛ ولی در اینجا هدف، بررسی مزایای تزریق با فشار ثابت نسبت به دبی ثابت است و تمامی الگوهای انحلال (شامل سطحی، مخروطی، حفره جریانی غالب، شاخه‌دار و یکنواخت) در هر دو روش مشاهده شد. اما برخلاف روش دبی ثابت که در آن الگو ثابت می‌ماند، در روش فشار ثابت الگوی انحلال تغییر کرده و به تدریج به سمت شاخه‌دار می‌رود. در الگوی انحلال شاخه‌دار، روش دبی ثابت حجم اسید کمتری جهت رسیدن اسید به انتهای مغزه نیاز دارد. در الگوی حفره جریانی غالب، هر دو روش تقریباً نیاز به حجم اسید برابر جهت رسیدن به خروجی مغزه دارند. در روش فشار ثابت، دبی تزریق نسبت به حجم اسید تزریقی به صورت نمایی افزایش می‌یابد. سیستم تصویربرداری سی تی اسکن^{۱۷} از مغزه‌ها نشان می‌دهد، در روش فشار ثابت در دبی تزریق کم، الگوی انحلال بصورت یکنواخت است [۱۰].

چنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۶، تاثیر گاز دی‌اکسید کربن آزاد شده در واکنش هیدروکلریک اسید با کلسیم کربنات را بر طول حفره جریانی به طور آزمایشگاهی در مغزه‌های سنگ آهکی ایندیانا بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد در دبی‌های کمتر از دبی بهینه، دی‌اکسید کربن باعث کاهش طول و افزایش قطر حفره جریانی می‌شود. در حالی که در دبی‌های بیشتر از بهینه، دی‌اکسید کربن تاثیر ناچیزی بر حفره جریانی خواهد داشت [۱۱].

۳- پیش تزریق مناسب

در سازندهای ماسه سنگی، تجربه اسیدکاری چاه‌های نفت و گاز نتایج متفاوتی دارد. در چاه‌های نفتی، بهبود تراوایی تا مقداری خاص از حجم اسید تزریقی ادامه دارد و تزریق پیش‌تر، تاثیری بر تراوایی سازند اطراف چاه ندارد و باعث تضعیف کانی‌ها می‌شود؛ در صورتی که در چاه‌های گازی، بهبود تراوایی و حجم اسید تزریقی متناسب بوده و با افزایش حجم اسید می‌توان تراوایی بیشتری را شاهد بود [۱۲].

آگور و همکارانش در سال ۲۰۰۰ راه حلی برای این مشکل چاه‌های نفتی پیشنهاد کردند. به نظر آنها، پیش تزریق گاز قبل از اسیدکاری باعث هدایت نفت به نقاط دورتری از چاه می‌شود. چراکه تماس محصول‌های اسید مصرف شده با نفت باعث تشکیل امولسیون یا لجن و کاهش تراوایی می‌شود که با دور کردن نفت از ناحیه هدف اسیدکاری، می‌توان مانع از بروز این مشکل شد. در این آزمایش‌ها از هر دو گاز نیتروژن و دی‌اکسید کربن استفاده شد که با افزایش حجم اسید تزریقی بعد از تزریق گاز، بهبود پیوسته تراوایی مشاهده شد. مزیت

کربناته مخازن عربستان سعودی را بررسی کرد. دو پلیمر پلی اکریلامید (PAA) و پلی ساکارید (زانتان) و سه اسید هیدروکلریک اسید، استیک اسید و فرمیک اسید در این مطالعه استفاده شدند و در این مطالعه ویسکوزیته محلول‌های پلیمر-اسید آماده شده به عنوان تابعی از نرخ برش^{۱۹}، شوری^{۲۰}، دما و غلظت اسید برای تشخیص سازگاری اسید با پلیمر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که حضور پلی اکریلامید در اسید، تاثیر قابل توجهی بر ویسکوزیته محلول اسید ندارد؛ در حالی که ویسکوزیته محلول زانتان-اسید، با افزایش غلظت اسید کاهش می‌یابد. به علاوه، واکنش محلول‌های اسید-پلیمر با ذرات سنگ زیر میکروسکوپ بررسی و مشاهده شد، نرخ واکنش محلول اسید و پلی اکریلامید در مقایسه با محلول اسید تفاوتی ندارد. بنابراین پلی اکریلامید نمی‌تواند به عنوان عامل تاخیری عمل کند. در حالی که محلول زانتان-اسید نرخ واکنش با سنگ را نسبت به محلول اسید، کاهش می‌دهد. به این دلیل از زانتان برای آزمایش دیسک چرخان^{۲۱} (RDR) در فشارهای مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد، حضور زانتان باعث افزایش زمان واکنش اسید و کاهش نرخ واکنش آن با نمونه سنگ می‌شود؛ بنابراین می‌توان از زانتان به عنوان عامل تاخیری در اسیدکاری استفاده کرد [۱۶]. علاوه بر آن، با استفاده از میکروسکوپ اسکن الکترونیکی^{۲۲} (SEM) نمونه سنگ قبل و بعد از اسیدکاری بررسی شد که توصیف دقیق‌تری از تغییرات حاصل از واکنش اسید-پلیمر با سنگ را نشان داد. شکل‌های ۴- و ۵ منافذی از نمونه سنگ قبل و بعد از انجام اسیدکاری توسط زانتان-استیک اسید را نشان می‌دهد [۱۶].

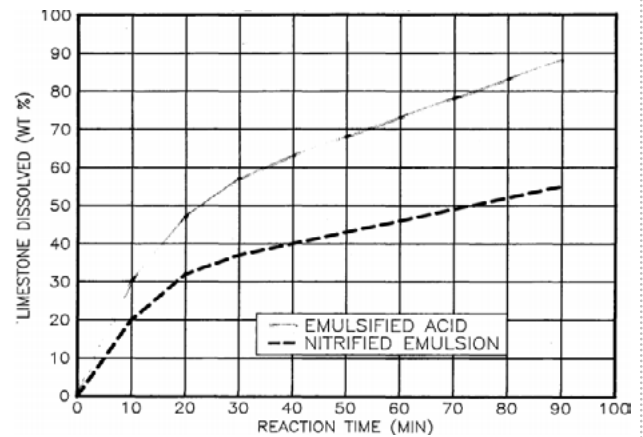
در شکل-۵، پلیمر به صورت گسترده روی سطح کانی‌های سنگ قرار گرفته و واکنش اسید با سنگ را کند می‌کند. در این شکل، قسمتی از سنگ (۲۸ درصد ماتریکس اولیه) به علت انحلال ذرات کربناته از بین رفته و بنابراین عملکرد پلیمر صرفاً تاخیر در واکنش اسید با سنگ و نه توقف آن است. وجود حفرات بزرگ نیز نشان از انحلال کانی‌ها توسط اسید دارد. به عبارت دیگر، تا وقتی که تمام اسید مصرف نشود، انحلال کانی‌ها ادامه دارد و پلیمر صرفاً زمان واکنش را افزایش داده و سبب می‌شود، اسید تا عمق بیشتری نفوذ کند [۱۶].

ربیع و همکارانش در سال ۲۰۱۱، با افزودن فرمیک اسید به هیدروکلریک اسید، نرخ واکنش اسید را کاهش دادند تا اسید به عمق بیشتری نفوذ کند. آنها از مغزه‌های سنگ آهکی و غلظت فرمیک اسید بین صفر تا ۳/۶ درصد جرمی و غلظت هیدروکلریک اسید بین صفر تا ۵ درصد جرمی استفاده کردند. برای تعیین نرخ واکنش نیز از آزمایش دیسک چرخان استفاده و دمای واکنش ۲۵۰ درجه فارنهایت تنظیم شد. در این آزمایش مشاهده شد، با افزایش غلظت فرمیک اسید، نرخ واکنش در سرعت‌های بالا و پایین چرخش دیسک کاهش می‌یابد [۱۷].

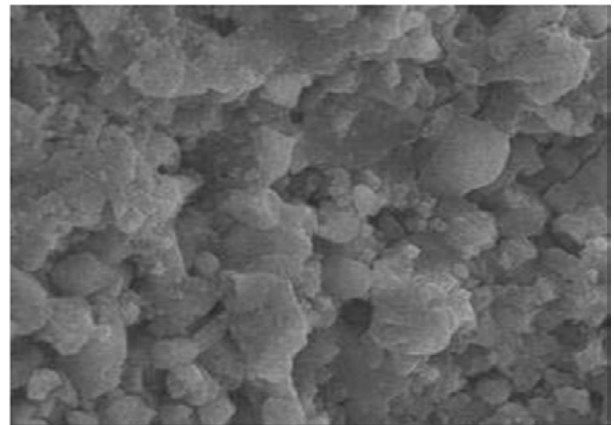
۵- استفاده از روش‌های انحراف جریان

هدف از اسیدکاری، ایجاد ارتباط بیشتر بین سازند و دهانه چاه در

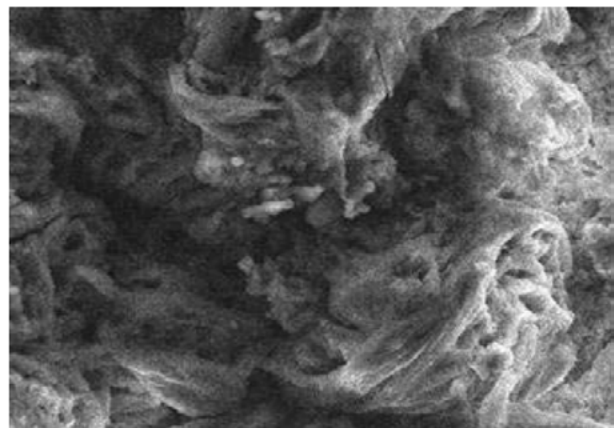
می‌تواند نرخ واکنش اسید با سنگ آهک را کاهش دهد [۱۵].
 امروز در سال ۲۰۰۶، تاثیر افزودن پلیمر به اسید به عنوان عامل تاخیری جهت کنترل و کند کردن واکنش اسید با نمونه سنگ‌های



شکل ۳ | تاثیر افزودن نیتروژن به سیستم اسیدی [۱۵].



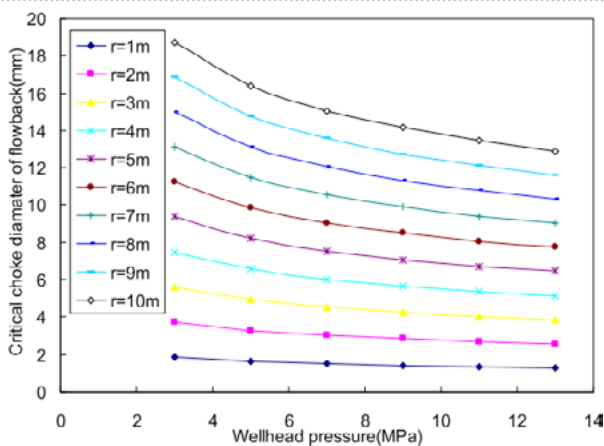
شکل ۴ | منافذ سنگ قبل از اسیدکاری [۱۶]



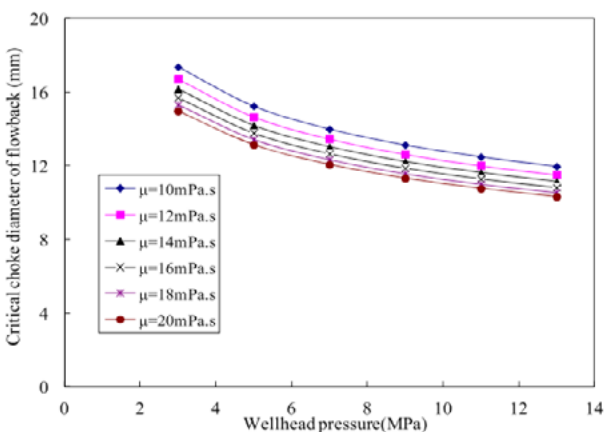
شکل ۵ | منافذ سنگ بعد از اسیدکاری [۱۶]

آزمایش‌های سرعت بحرانی جریان بازگشتی قابل محاسبه است. این اطلاعات می‌تواند به مهندسين میدانی جهت بهینه‌سازی جریان بازگشتی اسید کمک کند. شکل ۶- نشان می‌دهد در شعاع کاوش r^{25} ثابت، با افزایش فشار سرچاهی قطر چوک کاهش می‌یابد. هرچه مقدار اسید بیشتری وارد مخزن شود، چوک بزرگتری برای کنترل جریان بازگشتی نیاز است. چرا که سرعت بحرانی مقداری ثابت است. بنابراین حجم اسید بیشتر، نیازمند قطر چوک بزرگتری است. این شکل می‌تواند توسط مهندسين میدانی استفاده شود. در این محاسبه‌ها ابتدا باید حجم اسید مورد نیاز برای عملیات اسیدکاری مشخص شود. سپس با استفاده از قانون موازنه حجم، شعاع کاوش محاسبه شده و در نهایت براساس فشار سرچاهی، اندازه چوک مورد نیاز انتخاب شود [۲۶].

شکل ۷- چگونگی تاثیر تغییرات ویسکوزیته بر اندازه چوک بحرانی جریان برگشتی را نشان می‌دهد. اندازه چوک با افزایش ویسکوزیته اسید، کاهش می‌یابد. زیرا اسید با ویسکوزیته بالاتر، نیازمند انرژی بیشتر جهت انتقال ذرات ریز حین فرآیند جریان بازگشتی است. جهت جلوگیری از حساسیت سرعت r^{26} و خطر آسیب سازند، چوک



۶ | ارتباط فشار سرچاهی و قطر چوک بحرانی در شعاع‌های کاوش مختلف [۲۶]



۷ | ارتباط فشار سرچاهی و قطر چوک بحرانی در ویسکوزیته‌های مختلف اسید [۲۶]

تمامی ناحیه تولیدی است. بنابراین عملیاتی موفق است که در آن اسید به تمام نواحی مورد نظر برسد. وقتی اسید به درون چاه پمپ می‌شود، به طور طبیعی اسید در مناطقی جریان می‌یابد که بیشترین تراوایی یا کمترین آسیب را داشته باشد. تجربیات میدانی نیز نشان می‌دهد، بدون منحرف کردن جریان، هیچ تضمینی نیست که اسید به تمامی مناطق مورد نظر برسد. بنابراین منحرف کردن جریان همواره در عملیات اسیدکاری توصیه می‌شود [۱۸].

روش‌های انحراف جریان به دو دسته مکانیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. اگرچه روش‌های مکانیکی بسیار موثرند، اما نسبت به روش‌های شیمیایی گران و زمان‌بر بوده و در بعضی موارد مانند چاه‌هایی که به صورت حفرة باز تکمیل شده‌اند، کاربردی و مؤثر نیستند. مهم‌تر اینکه در روش‌های مکانیکی، جریان اسید از دهانه چاه کنترل می‌شود و درون سازند، کنترلی بر جریان اسید نمی‌توان داشت [۱۸]. البرگر و آسلتین در شرکت نفت استاندارد کالیفرنیا در سال ۱۹۷۷ استفاده از اسیدکاری گزینشی را در لایه‌های کم تراوا گزارش کردند [۱۹]. پیل در شرکت سعودی آرامکو نیز در سال ۱۹۸۴، استفاده از توپک‌های شناور نشت بند را جهت انحراف جریان اسید به نواحی هدف اسیدکاری گزارش کرد [۲۰].

روش‌های شیمیایی انحراف جریان شامل استفاده از سیال با ویسکوزیته بالا، مواد افزودنی که بر دیواره حفرة جریانی کیک ایجاد کنند و کف یا ژل جهت کاهش نفوذ اسید در حفرة جریانی است. این کیک باعث ایجاد ضریب پوسته موقت شده و مسیر جریان اسید تزریقی را تغییر می‌دهد [۱۸]. کوهن و همکارانش در سال ۲۰۱۰ از الیاف جهت ایجاد این خاصیت در اسید استفاده کردند [۲۱]. از اسیدهای ژله‌ای و یا حاوی کف نیز جهت انحراف جریان اسید به نواحی کم تراوا استفاده می‌شود [۲۲-۲۴].

زکریا و نصرالدین در سال ۲۰۱۶ برای اولین بار روشی معرفی کردند که در آن با استفاده از اضافه کردن پلیمر و امولسیون کردن اسید در گازوئیل، انحراف جریان به دلیل افزایش ویسکوزیته سیال توسط پلیمر و تاخیر در واکنش اسید و سنگ با استفاده از امولسیون کردن اسید در گازوئیل، را در نظر گرفته بود. در آزمایش‌ها از هیدروکلریک اسید ۱۵ درصد جرمی و نسبت حجمی ۷۰ به ۳۰ اسید/گازوئیل استفاده شد که نشان داد افزایش غلظت پلیمر در فاز درونی امولسیون از صفر به ۱/۵ درصد حجمی می‌تواند باعث کاهش اندازه قطرات امولسیون، افزایش ویسکوزیته ی اسید امولسیونی و افزایش پایداری امولسیون شود. همچنین ویسکوزیته این سیستم اسیدی، با افزایش دما کاهش می‌یابد [۲۵].

۶- مدل چوک بحرانی

هو و همکارانش با استفاده از قوانین موازنه مواد و مکانیک سیالات، در سال ۲۰۱۵ یک مدل چوک بحرانی^{۳۳} برای جریان بازگشتی^{۳۴} اسید ارائه کردند. اندازه چوک بحرانی در فشارهای سرچاهی مختلف به کمک

۲- دومین گام برای موفقیت عملیات اسیدکاری، بهینه‌سازی دبی تزریق است زیرا دبی کم، باعث نفوذ کمتر اسید به محیط متخلخل و دبی بالا باعث منشعب شدن حفره جریانی می‌شود.

۳- استفاده از تزریق گازهایی مانند دی‌اکسید کربن و نیتروژن پیش از اسیدکاری می‌تواند مانع تشکیل امولسیون یا لجن ناشی از وجود نفت در محیط متخلخل و کاهش آسیب سازند شود.

۴- استفاده از اسیدهای تاخیری می‌تواند باعث افزایش عمق نفوذ اسید شود. روش‌هایی مانند افزودن پلیمر و فرمیک اسید و امولسیون کردن اسید باعث کاهش نرخ واکنش اسید با سنگ می‌شوند.

۵- منحرف کردن جریان اسید، روش دیگری است که همواره توصیه شده و بدون استفاده از آن، اطمینانی برای رسیدن اسید به مناطق کم تراوای سازند وجود ندارد. برای رسیدن به این هدف، می‌توان از کف، الیاف و یا اسید ژله ای استفاده کرد.

۶- مدل چوک بحرانی می‌تواند توسط مهندسين ميدانی جهت تنظيم اندازه چوک و فشار سرچاهی جریان بازگشتی اسید به سطح زمین استفاده شود.

کوچکتر باید انتخاب شود. بنابراین در شرایط فشار سرچاهی برابر، ویسکوزیته اسید نقش مهمی دارد. ویسکوزیته پایین‌تر اسید اجازه می‌دهد اندازه چوک بزرگتر انتخاب شود تا اثر جریان بازگشتی اسید تقویت شود [۲۶].

نتیجه‌گیری

در این مقاله، پژوهش‌های مهندسين نفت در زمینه روش‌های بهینه‌سازی و افزایش بازده اسیدکاری در مخازن ماسه سنگی و کربناته گردآوری شده که نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی، میدانی و مدل‌سازی به دست آمده از آنها، در زیر به اختصار بیان می‌شود:

۱- انتخاب مناسب نوع و غلظت اسید، اولین گام برای یک عملیات اسیدکاری موفق است. متداول‌ترین نسبت جرمی، ۱۲ درصد هیدروکلریک اسید و ۳ درصد هیدروفلوئوریک اسید است. همچنین از اسیدهای آلی مانند استیک اسید و فرمیک اسید و اخیراً از آمینو پلی کربوکسیلیک اسید به عنوان اسیدهای ضعیف‌تر استفاده می‌شود.

پانویس‌ها

- | | | |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| 1. Acidizing | 10. Face Dissolution | 19. Shear Rate |
| 2. Well Stimulation | 11. Conical Wormhole | 20. Salinity |
| 3. Wellbore Damage | 12. Dominant Wormhole | 21. Rotating Disk Reactor (RDR) |
| 4. Perforation | 13. Ramified Wormhole | 22. Scanning Electronic Microscopy (SEM) |
| 5. Retardation Methods | 14. Uniform Dissolution | 23. Critical Choke Model |
| 6. Pre Flush | 15. Constant volumetric Rate (CVR) | 24. Backflow |
| 7. Acid Diversion | 16. Constant Injection Pressure (CIP) | 25. Radius of Investigation |
| 8. Wormhole | 17. Computed Tomography (CT) Scan | 26. Velocity Sensitivity |
| 9. Skin Factor | 18. Surfactant | |

منابع

- [1] Coulter Jr., A.W., Hendrickson, A.R., and Martinez, S.J. Acidizing. In Petroleum Engineering Handbook, ed. Howard B. Bradley, 1987, Chap. 54, Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers.
- [2] Taylor, R., Fyten, G.C., and McNeil, F. Acidizing—Lessons from the Past and New Opportunities. SPE 162238, Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [3] Thomas, R.L., Nasr-El-Din, H.A., Mehta, S., Hilab, V., and Lynn, J.D. The Impact of HCl to HF Ratio on Hydrated Silica Formation During the Acidizing of a High Temperature Sandstone Gas Reservoir in Saudi Arabia. SPE 77370, Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [4] Legemah, M.U., Gomaa, A., Bilden, D., Lowe, C., Boles, J., Qu, Q., Sun, H., Wang, X., and Li, L. Sequential Injection Process Enhances Acidizing Treatment of High-Temperature Wells. SPE 173626, Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [5] Reyes, E.A., Rispler, K., Davis, J., Stimatz, R., Ouedraogo, M., Beuterbaugh, A., LaBlanc, A., Williams, W., Res, S., Bungo, F., Kintomba, P., Aguiar, I., and De Moraes, E. Acidizing of High Temperature and Highly Sensitive Multilayered Carbonate Well with Aminopolycarboxylic Acid Low-pH Fluid: Field Implementation and Laboratory Validation. SPE 175839, Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [6] Shukla, S., Zhu, D., and Hill, A.D. The Effect of Phase

- Saturation Conditions on Wormhole Propagation in Carbonate Acidizing. SPE 82273, SPE Journal, Society of Petroleum Engineers, September 2006, 11(03), pp. 273-281.
- [7] Wang, Y., Hill, A.D., and Schechter, R.S. The Optimum Injection Rate for Matrix Acidizing of Carbonate Formations. SPE 26578, Society of Petroleum Engineers, 1993.
- [8] Akanni, O.O., and Nasr-El-Din, H.A. The Accuracy of Carbonate Matrix-Acidizing Models in Predicting Optimum Injection and Wormhole Propagation Rates. SPE 172575, Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [9] Etten, J., Zhu, D., and Hill, A.D. The Combined Effect of Permeability and Pore Structure on Carbonate Matrix Acidizing. SPE 174314, Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [10] Gomaa, A.M., Nino-Penaloza, A., Cutler, J., and Chaudhary, S. Insights of Wormhole Propagation During Carbonate Acidizing: Constant Pressure vs. Constant Rate. SPE 174790, Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [11] Cheng, H., Zhu, D., and Hill, A.D. The Effect of Evolved CO₂ on Wormhole Propagation in Carbonate Acidizing. SPE 178962, SPE Production & Operations, Society of Petroleum Engineers, October 2016.
- [12] Aggour, M.A., Al-Muhareb, M.A., Abu-Khamsin, S.A. and Al-Majed, A.A. Improving Sandstone Matrix Acidizing for Oil Wells by Gas Preconditioning. SPE 63180, Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [13] Al-Anazi, H.A., Nasr-El-Din, H.A., Hashem, M.K., and Hopkins, J.A. Matrix Acidizing of Water Injectors in a Sandstone Field in Saudi Arabia: A Case Study. SPE 62825, Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [14] Knox, J.A., Lasater, R.M., and Dill, W.R. A New Concept In Acidizing Utilizing Chemical Retardation. SPE 975, Society of Petroleum Engineers, 1964.
- [15] Guidry, G.S., Ruiz, G.A., and Saxon, A. SXE/N₂ Matrix Acidizing. SPE 17951, Society of Petroleum Engineers, 1989.
- [16] Amro, M.M. Extended Matrix Acidizing Using Polymer-Acid Solutions. SPE 106360, Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [17] Rabie, A.I., Gomaa, A.M., and Nasr-El-Din, H.A. HCl-Formic In-Situ Gelled Acid for Carbonate Acidizing: Core Flood and Reaction Rate Study. SPE 140138, Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [18] Chang, F.F., Qiu, X., and Nasr-El-Din, H.A. Chemical Diversion Techniques Used for Carbonate Matrix Acidizing: An Overview and Case Histories. SPE 106444, Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [19] Ellenberger, C.W., and Asetline, R.J. Selective Acid Stimulation To Improve Vertical Efficiency in Injection Wells - A Case History. Journal of Petroleum Technology, Society of Petroleum Engineers, January 1977, 29(01), pp. 25-29.
- [20] Bale, G.E. Matrix Acidizing in Saudi Arabia by Using Buoyant Ball Sealers. Journal of Petroleum Technology, Society of Petroleum Engineers, October 1984, 36(10), pp. 1748-1752.
- [21] Cohen, C.E., Tardy, P.M.J., Lesko, T., Lecerf, B., Pavlova, S., Voropaev, S., and Mchaweh, A. Understanding Diversion with a Novel Fiber-Laden Acid System for Matrix-Acidizing of Carbonate Formations. SPE 134495, Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [22] Jones, A.T., Dovle, M., and Davies, D.R., Improving the Efficiency of Matrix Acidizing With a Succinoglycan Viscosifier, SPE Production & Facilities, Society of Petroleum Engineers, August 1996, 11(03), pp. 144-149.
- [23] Zerhboub, M., Touboul, E., Ben-Naceur, K. and Thomas, R.L. Matrix Acidizing: A Novel Approach to Foam Diversion. SPE Production & Facilities, Society of Petroleum Engineers, May 1994, 9(02), pp. 121-126.
- [24] Alvarez, J.M., Rivas, H., and Navarro, G. An Optimal Foam Quality for Diversion in Matrix-Acidizing Projects. SPE 58711, Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [25] Zakaria, A.S., and Nasr-El-Din, H.A. A Novel Polymer-Assisted Emulsified-Acid System Improves the Efficiency of Carbonate Matrix Acidizing. SPE Journal, Society of Petroleum Engineers, June 2016, 21(03), pp. 1061-1074.
- [26] Hu, J., Liu, H., Wu, D., and Zhang, J. Acidizing flow-back optimization for tight sandstone gas reservoirs". Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24, pp. 311-316.