

سنة الفجر
ع

به نام خدا



واحد خمینی شهر

موضوع پژوهش:

اسیدکاری در مخازن کربناته شکافدار و

نحوه تعامل شکاف و ماتریس

نام و نام خانوادگی:

علیرضا طالبی حبیب آبادی

شماره دانشجویی:

۹۸۲۱۵۷۳۶۹

استاد مربوطه:

جناب آقای دکتر مجتبی رحیمی

زمستان ۱۴۰۱

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان مطلب</u>
	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ اسیدکاری
۴	۱-۲-۱ مفهوم آسیب سازند
۱۱	۲-۲-۱ اسیدکاری سازندهای ماسه‌سنگی
۱۳	۳-۲-۱ روش‌های اسیدکاری و انواع افزایش‌های اسید
۱۵	۴-۲-۱ انواع اسیدهای مورد استفاده در عملیات اسیدکاری
۲۱	۵-۲-۱ روش‌های بهینه‌سازی و افزایش بازده اسیدکاری در مخازن هیدروکربنی
۳۱	۳-۱ مخازن شکافدار
۳۵	۱-۳-۱ مقایسه مخازن معمولی و مخازن شکافدار
۳۶	۲-۳-۱ معایب مخازن شکافدار
	فصل دوم: اسیدکاری مخازن شکافدار
۳۸	۱-۲ مقدمه
۳۹	۲-۲ آزمایشات لازم به منظور عملیات اسیدکاری
۴۰	۳-۲ عوامل رقابتی مؤثر در طراحی عملیات اسیدکاری
۴۱	۴-۲ اصلاح قدرت اسید
۴۱	۵-۲ اسیدکاری مخازن کربناته شکافدار
۴۸	۱-۵-۲ مدل‌سازی دوبعدی فرآیند اسیدزنی ماتریسی در مخازن نفتی کربناته شکافدار
	۲-۵-۲ ارزیابی عملکرد عملیات اسیدکاری ماتریسی در یک مخزن کربناته
۴۹	گاز میعانی چندلایه
	۳-۵-۲ شبیه‌سازی تزریق بهینه اسیدهای قوی و ضعیف در مخازن کربناته
۶۷	شکافدار
۷۸	۶-۲ تعامل شکاف و اسید

ادامه فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان مطلب</u>
	فصل سوم: نتیجه گیری
۸۳	۱-۳ نتیجه گیری
۸۴	۲-۳ پیشنهادها
۸۶	منابع و مأخذ

فهرست جدول‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان جدول</u>
۴۴	جدول ۱-۲: قدرت حل‌کنندگی اسیدهای مختلف
۵۳	جدول ۲-۲: بهبود پارامترهای مختلف چاه بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی، در دبی ثابت ۱۰۰ م.ف.م.ر.
۶۱	جدول ۳-۲: دبی جریان‌ی درون‌چاهی برای هر لایه مخزنی بطور مجزا در طی تمام حالت‌های جریان‌ی و بسته نمودارهای تولید (قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه)
۷۶	جدول ۴-۲: پارامترهای مورد بررسی در آنالیز حساسیت‌های انجام شده
۷۷	جدول ۵-۲: ضریب پوسته‌نهایی در نواحی مختلف تولیدی پس از پایان تزریق اسید جدول ۶-۲: نمودار دبی تجمعی تولیدی برحسب عمق در قبل و بعد از اسیدکاری
۷۸	سازندها با دو اسید مختلف

فهرست شکل‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان شکل</u>
۲۲	شکل ۱-۱: انواع الگوهای انحلال سنگ توسط اسید
۲۳	شکل ۱-۲: تأثیر ساختار حفره جریانی بر میزان کاهش ضریب پوسته
۲۶	شکل ۱-۳: تأثیر افزودن نیتروژن به سیستم اسیدی
۲۷	شکل ۱-۴: منافذ سنگ قبل از اسیدکاری
۲۸	شکل ۱-۵: منافذ سنگ بعد از اسیدکاری
۳۰	شکل ۱-۶: ارتباط فشار سرچاهی و قطر چوک بحرانی در شعاع‌های کاوش مختلف
۳۱	شکل ۱-۷: ارتباط فشار سرچاهی و قطر چوک بحرانی در ویسکوزیته‌های مختلف اسید
۴۷	شکل ۲-۱: لایه شکافی پروپانتی
۴۷	شکل ۲-۲: مکانیزم لایه شکافی با اسید
۵۱	شکل ۲-۳: مقایسه نمودارهای عملکرد سرچاه، قبل و بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی
	شکل ۲-۴: پارامترهای چاه شامل فشار جریانی سرچاهی، میزان انداخت فشار و شاخص بهره‌دهی در دبی ثابت ۱۰۰م.ف.م.ر
۵۲	شکل ۲-۵: نمودار تاریخچه فشار برای تست فشار گذرا قبل از عملیات اسیدکاری
۵۳	شکل ۲-۶: میزان سهم مشارکت هر سه لایه مخزنی در تولید/تزریق و جریان متقاطع رو به بالا در شرایط بسته
۵۴	شکل ۲-۷: نمودار تاریخچه فشار برای تست فشار گذرا بعد از عملیات اسیدکاری
۵۶	شکل ۲-۸: سهم مشارکت هر کدام از لایه‌های مخزنی در تولید/تزریق و جریان متقاطع
	شکل ۲-۹: مقایسه بین تمام حالت‌های جریانی و بسته نمودارگیری تولید، قبل از اسیدکاری (الف) و بعد از اسیدکاری (ب)
۵۷	شکل ۲-۱۰: میزان سهم مشارکت درون‌چاهی زون‌های مخزنی چند لایه بر اساس نتایج تفسیر داده‌های نمودارگیری تولید در دبی جریانی بیشینه
۵۸	شکل ۲-۱۱: دبی جریانی هر کدام از لایه‌های مخزنی در تمام حالت‌های جریانی و بسته نمودارهای تولید
۵۹	شکل ۲-۱۲: درصد مشارکت هر کدام از لایه‌های مخزنی در تولید/تزریق در تمام حالت‌های جریانی و بسته نمودارهای تولید
۶۰	شکل ۲-۱۳: دبی جریانی هر کدام از لایه‌های مخزنی در تمام حالت‌های جریانی و بسته نمودارهای تولید

ادامه فهرست شکل‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان شکل</u>
۶۱	شکل ۲-۱۳: تغییرات شاخص بهره‌دهی لایه‌های مخزنی حاصل از نتایج آنالیز عملکرد جریان انتخابی (قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه).....
۶۲	شکل ۲-۱۴: بهبود فشار ته چاهی بر اساس نتایج اندازه‌گیری نقاط ایستا در طی حالت‌های جریانی نمودارگیری تولید.....
۶۳	شکل ۲-۱۵: آنالیز فشار گذرا قبل از اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف.....
۶۵	شکل ۲-۱۶: آنالیز فشار گذرا بعد از اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف.....
۶۶	شکل ۲-۱۷: ظرفیت جریانی (الف) و ضریب پوسته (ب) لایه‌های مخزنی مختلف.....
۶۷	شکل ۲-۱۸: نمودار عملکرد مخزن برای لایه‌های مختلف، نتایج آنالیز عملکرد جریان انتخابی قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی.....
۶۸	شکل ۲-۱۹: نمودار جریان فرآیندی فرآیند در نرم‌افزار ASPEN HYSYS.....
۷۰	شکل ۲-۲۰: تغییرات ضریب پوسته سازند کربناته در هنگام تزریق هیدروکلریک اسید ۱۵٪.
۷۱	شکل ۲-۲۱: نمودارهای شعاع پیش روی جبهه اسید و جبهه مسیرهای گرمی شکل پس از تزریق ۱۰۰۰ گالن از هیدروکلریک اسید ۱۵٪ با دبی‌های متفاوت تزریق در ناحیه تولیدی اول
۷۳	شکل ۲-۲۲: نمودارهای ضریب پوسته نهایی برحسب دبی تزریقی به ازای تزریق حجم‌های متفاوتی از دو اسید مختلف: الف) تزریق استیک اسید و ب) تزریق فرمیک اسید.....
۷۵	شکل ۲-۲۳: توزیع ضریب پوسته نهایی در طول نواحی تولیدی پس از پایان اسیدکاری سازند با دو الگوی متفاوت به هنگام تزریق ۱۰۰۰ گالن هیدروکلریک اسید ۱۵٪.....
۷۷	شکل ۲-۲۴: نمودار دبی تجمعی تولیدی برحسب عمق در قبل و بعد از اسیدکاری سازندها با دو اسید مختلف.....

چکیده

با توجه به اهمیت نفت در صنایع و زندگی روزمره و کافی نبودن منابع سوخت دیگر، همواره اقداماتی به منظور بازیافت هرچه بیشتر از مخازن نفت انجام می‌گیرد. از جمله مشکلاتی که در مخازن در حال بهره‌برداری، همواره پیش رو قرار دارد، پایین بودن نفوذپذیری در اطراف چاه و آسیب‌های وارده به سنگ مخزن می‌باشد. جهت رفع این گونه مشکلات از روش‌های تحریک چاه به منظور افزایش تولید، استفاده می‌شود. در ایران، به دلیل آن که بیش از ۸۰٪ مخازن از نوع کربناته هستند، از روش‌های اسیدکاری جهت انگیزش چاه‌های نفت و گاز استفاده می‌گردد؛ در حالی که در مخازن ماسه سنگی به دلیل عدم دستیابی به نتیجه مطلوب توسط روش‌های اسیدکاری، معمولاً از روش‌های شکست هیدرولیکی استفاده می‌شود. در این پژوهش، در ابتدا؛ انواع سیستم‌های اسیدکاری، انواع اسیدهای مورد استفاده در فرایندهای اسیدکاری و عوامل مؤثر بر نتایج عملیات اسیدکاری و مخازن کربناته شکافدار و اسیدکاری این مخازن و همچنین؛ تعامل شکاف و ماتریس را مورد بررسی قرار داده و سپس به منظور بررسی مصداق عملیاتی مفاهیم فوق، به مطالعه موردی برخی از پژوهشگران کشورمان در مورد تغییرات برخی از پارامترها مانند فشار، ضریب پوسته، تراوایی و دبی تولیدی، حاصل از عملیات اسیدکاری در چاه‌های نفتی واقع در حوزه خلیج فارس که با موفقیت همراه بوده است، اشاره شده است.

کلمات کلیدی: اسیدکاری - تعامل شکاف و ماتریس - مخازن شکافدار - انگیزش چاه.

فصل اول:

مقدمہ

۱-۱ مقدمه

در مطالعه مخازن نفت و گاز، تلاش می‌شود که در صورت کم بودن نفوذپذیری در سنگ مخزن و اطراف چاه، به نحوی در بالا بردن آن و در نتیجه افزایش دبی تولیدی تلاش گردد. بنابراین باید از روش‌هایی به منظور تحریک و انگیزش چاه‌ها بهره برد؛ همچنین؛ در تولید از مخازن نفت و گاز، همواره اقداماتی در راستای کاهش مقدار آسیب و افزایش میزان تراوایی صورت می‌گیرد. این اقدامات بخش قابل توجهی از هزینه‌های تعمیرات و نگهداری چاه‌ها را شامل می‌شوند و اصولاً با ریسک همراه هستند. روش اصلی مقابله با آسیب‌ها و افزایش گذردهی سازند، تحریک و انگیزش چاه‌ها با استفاده از عملیات اسیدکاری می‌باشد؛ که اولین بار در سال ۱۸۹۴ میلادی؛ در پنسیلوانیا مورد استفاده قرار گرفت. اسید به دلیل دارا بودن قدرت افزایش نفوذپذیری سنگ مخزن و دبی تولیدی چاه، مورد استفاده قرار می‌گیرد و با انحلال ذرات دانه ریز و ایجاد خوردگی در سنگ و یا حمل ذرات و رسوباتی که موجب انسداد در خلل و فرج موجود در سنگ مخزن می‌شوند، این امر را محقق می‌سازد. مواد و رسوبات ایجادکننده آسیب، شامل کیک سیال‌حفاری یا گل‌حفاری و ذرات دانه‌ریز نظیر ذرات مهاجر، آسفالتین، امولسیون و محصولات کروژن، سوسپانسیون و باکتری‌های موجود و ... می‌باشد. و در حقیقت، این عملیات می‌تواند هزینه و زمان برداشت‌نفت را کاهش و میزان شاخص بهره‌دهی را بصورت چشمگیر (بعضاً تا ۵ برابر) افزایش دهد. اولین قدم برای برنامه‌ریزی عملیات اسیدکاری، بررسی نوع آسیب وارده به مخزن می‌باشد که بر اساس آن نوع اسید، حجم اسید، غلظت، نرخ تزریق و ... تعیین و محاسبه می‌گردند. در مورد نوع سازندها، باید در نظر داشت که بطور کلی سنگ‌های مخازن تولیدی هیدروکربن‌ها که توسط اسید مورد انگیزش قرار می‌گیرند، شامل سنگ‌های کربناته (مخلوطی از ترکیبات کربنات کلسیم و سایر مواد) و ماسه سنگ‌ها (مخلوطی از کلسیم منیزیم کربنات و سایر ترکیبات) و یا مخلوطی از این دو نوع سنگ می‌باشند (مؤمنی میانایی، حدادی و داراب‌پور، ۱۳۹۴).

در ایران، به دلیل آن که بیش از ۸۰ درصد مخازن از نوع کربناته هستند، از روش‌های اسیدکاری به منظور تحریک و انگیزش چاه‌های نفت و گاز، استفاده می‌شود؛ در حالی که تجربه نشان داده است که در مخازن ماسه سنگی، به دلیل عدم دستیابی به نتیجه مطلوب توسط روش‌های تحریک با استفاده از اسیدکاری، از سایر روش‌ها از جمله شکست هیدرولیکی استفاده می‌گردد. سنگ‌های کربناته، حاوی بیش از ۵۰ درصد مواد معدنی کربناته هستند و معمول‌ترین مواد معدنی کربناته نیز کلسیت و دولومیت می‌باشند. بیشتر سنگ‌های کربناته در ایران، از نوع ترک‌دار هستند و تولید از این مخازن عمدتاً از طریق همین شکاف‌ها و ترک‌ها صورت می‌گیرد؛ اما عواملی نظیر مهاجرت رسوبات دانه ریز، متورم شدن رس، ته نشین شدن پارافین‌ها، آسیب‌های ناشی از

عملیات حفاری و تکمیل چاه مانند وجود کیک گل حفاری و صدمات وارده طی عملیات مشبک کاری و سیمان کاری، در نهایت موجب بسته شدن کانال‌ها، شکاف‌ها و مجاری ورودی سیال می‌شوند. هنگامی که روی سنگ‌های دولومیتی و آهکی، عملیات اسیدکاری انجام می‌گیرد، اسید به درون روزنه‌های ماتریس سنگ یا ترک خوردگی‌های القا شده یا طبیعی موجود در سنگ، وارد می‌شوند. نکته‌ای که باید در نظر داشت، آن است که طراحی عملیات اسیدکاری، به کمیت‌های اساسی مرتبط با نوع اسید مورد استفاده و خواص سنگ مخزن کربناته، وابسته است؛ نوع اسید و دبی تزریق اسید و همچنین تعداد و اندازه ترک‌ها از جمله مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در نتیجه عملیات اسیدکاری در مخازن کربناته هستند. سازندهای حاوی شکاف و ترک، اسید را سریع‌تر و در فشار تزریقی پایین‌تری می‌پذیرند و محلول‌های اسیدی که با دیواره کانال‌های جریان واکنش می‌دهند، موجب افزایش عرض و خاصیت هدایت‌دهی ترک می‌شوند؛ بنابراین می‌توانند تأثیر بسیار مطلوبی را روی سازند تولیدی اعمال نمایند (حدادی و مؤمنی میانایی، ۱۳۹۴).

۱-۲ اسیدکاری

وجود منابع عظیم نفت و گاز در کشور و نیاز به برداشت هرچه بیشتر مواد هیدروکربنی از این منابع بدون وارد شدن آسیب جدی به سازند و نیز کمک به کاهش و بهینه‌سازی هزینه‌های تولید، عواملی هستند که سبب توجه بیشتر به انگیزش چاه‌ها و بهره‌وری بهینه از آن‌ها شده‌اند. آسیب سازند در تولید از مخازن هیدروکربنی پدیده‌های نامطلوب به حساب می‌آید که منجر به کاهش بهره‌وری چاه تولیدی می‌شود. به عبارت دیگر آسیب سازند به هر فرآیندی گفته می‌شود که سبب کاهش توان تولید نفت و گاز یا تولید آب از سازند یا کاهش توان تزریق آب و گاز یا چاه بازیافتی شود. به ناحیه‌ای از دهانه چاه که تراوایی آن کاهش یافته، ضریب پوسته گفته می‌شود.

اسید به منظور تحریک لایه‌های تولید کننده نفت و گاز به درون چاه تزریق می‌گردد. تزریق اسید در سازندهای کربناته، بخشی از سازند را در خود حل نموده و مسیرهای جدیدی جهت تولید نفت یا گاز ایجاد می‌نماید و در سازندهای ماسه سنگی، معابری که دچار آسیب شده و مسدود گشته‌اند را باز می‌نماید. هدف از انجام عملیات اسیدکاری چاه‌های نفت و گاز را می‌توان مشتمل بر احیاء کردن چاه، باز کردن خلل و فرج، افزایش تولید، افزایش میزان نفوذپذیری، تمیزکاری چاه و شستشو، تمیزسازی لوله‌ها، آزادسازی لوله‌های حفاری و بطور کلی کاهش ضریب پوسته دانست.

متداول‌ترین روش‌های اسیدکاری که امروزه در ایران با توجه به اهداف مد نظر انجام می‌گیرد عبارتند از: الف) اسیدکاری گسترده که از طریق شیرهای کناری واقع بر روی تاج چاه انجام می‌شود و در آن اسید به کمک

پمپ به درون چاه رانده شده و تمامی ستون چاه را در بر می‌گیرد. ب) اسیدکاری موضعی که در آن اسید به کمک لوله مغزی سیار به درون چاه رانده می‌شود و تنها حد فاصله‌ای معین مد نظر را اسیدکاری می‌کند (هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

نخستین عملیات اسیدکاری ماتریسی، در تحریک چاه تولیدی نفتی بسیار موفق بود. موفقیت عملیات اسیدکاری به آسیب، محل قرار گیری و شدت آن بستگی دارد. هرچه آسیب به محل مشبک نزدیک‌تر باشد، دسترسی اسید به آن راحت‌تر است. حذف رسوبات حاصل از عملیات‌های قبلی که بیش از ۱ فوت در سازندهای ماسه‌سنگی یا بیش از ۵ فوت در سازندهای کربناته، از دهانه‌چاه فاصله دارند، تقریباً غیرممکن است یا بسیار پرهزینه خواهد بود. سه مؤلفه اصلی در موفقیت‌آمیز بودن عملیات اسیدکاری وجود دارند: (۱) آماده‌سازی چاه؛ (۲) انتخاب حلال برای از بین بردن آسیب و (۳) پاسخ سازند به آسیب (مک‌لئود^۱، ۱۹۸۴؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

انتخاب یک ماده شیمیایی برای هر کاربرد خاص بستگی به نوع آلاینده‌های که تراوایی سازند را مسدود کرده است دارد. به عنوان مثال اسید کلریک؛ پارافین یا آسفالتین را حل نمی‌کند و برای آن‌ها باید از حلال‌های آلی (معمولاً حلال آروماتیک مانند تولوئن، زایلن یا اورتونیترو تولوئن) استفاده کرد. اسید استیک به طور مؤثری رسوبات کربنات کلسیم را حل می‌کند اما توانایی حل رسوب اکسید آهن را ندارد. هیدروکلریک اسید؛ کربنات کلسیم را به آسانی حل می‌کند اما روی رسوبات سولفات کلسیم اثر کمی دارد. می‌توان با هیدروکسید پتاسیم یا کربنات سدیم، سولفات کلسیم را به کربنات کلسیم یا هیدروکسید کلسیم تبدیل کرد. و سپس هیدروکلریک اسید را برای حل رسوبات تبدیل شده استفاده کرد. سولفات کلسیم همچنین می‌تواند برای حل نمک سدیم اسید اتیلن دی‌آمین تتراستیک استفاده شود. هیدروکلریک اسید کانی‌های رس سازند یا گل حفاری را حل نمی‌کند. برای حل این آلومینوسیلیکات‌ها باید از اسید هیدروفلوریک استفاده نمود. بنابراین یک حلال منحصر به فرد برای همه آسیب سازند وجود ندارد و باید بر اساس نوع آسیب حلال مورد نظر را انتخاب نمود (مک‌لئود، ۱۹۸۴؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

۱-۲-۱ مفهوم آسیب سازند

آسیب وارد به سازند ظرفیت تولید و تزریق چاه را کاهش می‌دهد و رفع این آسیب یکی از اهداف اصلی مهندسی نفت می‌باشد. البته بعضی از عوامل کاهش تولید نیز به اشتباه به عنوان آسیب در نظر گرفته می‌شوند، در صورتی که در واقع نتیجه طراحی ضعیف چاه هستند و می‌توان با اعمال تغییرات عملیاتی، آن‌ها را به حداقل

^۱. McLeod

رساند. داشتن دانش کامل از شرایط عملیاتی میدان و شناسایی صحیح آسیب برای از بین بردن موفق آسیب‌ها بسیار ضروری است (زارعیان و زورمند، ۱۳۹۰).

مقدار و گستره آسیب‌دیدگی‌ها از تجزیه و تحلیل داده‌های چاه‌آزمایی به دست می‌آیند. اولین کاربرد اسیدکاری رفع آسیب سازند از منطقه نزدیک چاه است. در یک چاه با رژیم جریان شعاعی، قسمت اعظم فشار مخزن در ناحیه کم عمق یعنی در اطراف دهانه چاه افت می‌نماید و ۵۰٪ کل افت فشار مخزن در فاصله شعاعی ۲۰ فوتی از چاه اتفاق می‌افتد که اگر آسیب سازند نداشته باشیم، ۲۵٪ افت فشار مربوط به فاصله حدود ۱ تا ۳ فوتی از دیواره چاه می‌باشد. بنابراین در صورت وجود آسیب سازند، افت فشار زیادی در چاه به وجود خواهد آمد. در اسیدکاری به خصوص در مخازن ماسه‌سنگی ارزیابی و شناسایی آسیب سازند شاید تنها عامل فوق‌العاده مهم در طراحی اسیدکاری باشد. بنابراین شروع فرایند طراحی اسیدکاری با تعیین و ارزیابی سازند همراه می‌باشد. برای ارزیابی آسیب سازند ابتدا لازم است ضریب پوسته را از قانون داری مورد بررسی قرار داد (حسینی و کیوانی، ۱۳۹۷).

بنابراین ضروری است در ابتدا توصیفی کلی از انواع آسیب، مکانیسم‌ها و منشاء آن‌ها آورده شود.

الف- انواع آسیب سازند

آسیب وارد به سازند معمولاً بر اساس مکانیسم طبیعی یا القایی ایجاد آن طبقه‌بندی می‌گردد. آسیب‌های طبیعی، عمدتاً حاصل تولید سیال از مخزن و آسیب‌های القایی، نتیجه عملیات خارجی انجام شده روی چاه (مانند حفاری، تکمیل، تحریک، تعمیر چاه یا تزریق) می‌باشند (زارعیان و همکاران، ۱۳۹۰).

آسیب‌های طبیعی^۱ عبارتند از:

▪ مهاجرت ذرات^۲: سازندهای ناپایدار^۳ و مخازن با تراوایی بالا، به مهاجرت ذرات حساس‌اند. مهمترین عوامل موثر در مهاجرت یون، سرعت بالای سیال سازند، تغییر ترشوندگی، تغییر میزان شوری آب و شکست سنگ است. با توجه به افت فشار بالایی که در نزدیکی دیواره چاه رخ می‌دهد، معمولاً مشکل مهاجرت ذرات در همین ناحیه به وجود می‌آید. مهاجرت ذرات ممکن است باعث کاهش سریع تولید و نیز تخریب تجهیزات سطحی و درون چاهی شود (کریستانی^۴، ۲۰۱۱؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

1. Natural Damages

2. Fines Migration

3. Unconsolidated Formations

4. Christanti

- رس‌های متورم شونده^۱: تورم رس به عنوان یکی از دلایل اصلی آسیب سازند در مخازن هیدروکربنی شناخته شده است. در تولید متداول نفت، بیشتر مشکلات مربوط به رس در نزدیکی ناحیه چاه رخ می‌دهد و از عملیات انجام شده روی چاه (حفاری، تکمیل، تعمیر) ناشی می‌شود (ژو، کامرون و کاداتز^۲، ۱۹۹۷؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).
- رسوب‌های تشکیل شده در آب^۳: از آنجا که تزریق آب، کاربرد گسترده‌ای در جابجایی نفت و نیز نگهداشت فشار مخازن نفتی دارد، رسوب زنگ‌های تشکیل شده در آب، یکی از مشکل‌سازترین آسیب‌های وارده به سازند می‌باشند. رایج‌ترین زنگ‌های موجود، سولفات و کربنات کلسیم و استارانتیوم می‌باشند. مکانیزم‌هایی که در اثر آن‌ها تراوایی سازند کاهش پیدا می‌کند عبارتند از: رسوب جامدات روی دیواره منافذ بر اثر نیروهای جاذبه بین ذرات و سطوح منافذ، انسداد گلوگاه منافذ^۴ توسط یک ذره و انسداد آن توسط به هم پیوست مجموعه‌ای ذرات. نوع رسوب، بر میزان آسیب سازند اثرگذار خواهد بود. شرایطی مانند درجه اشباع، وجود ناخالصی‌ها، تغییر دما و نرخ ترکیب، مقدار و ریخت‌شناسی کریستال‌های ته نشین شده را کنترل می‌کنند (مقدسی، جمی‌الأحمدی و مولر-استینهاگن^۵، ۲۰۰۴؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).
- رسوبات آلی^۶: آسیب ناشی از پوسته مواد آلی در چاه‌های نفت، یک عامل مهم در کاهش بهره‌دهی چاه است. رسوب پارافین‌ها و آسفالتین‌ها در داخل سازند و نیز در اطراف دهانه چاه مانعی ایجاد می‌کند که از انتقال نفت به چاه جلوگیری می‌کند. بسیاری از چاه‌های تولیدی در طی برداشت دچار افت فشار می‌شوند. آسیب ناشی از رسوبات آلی ممکن است به صورت طبیعی و یا در اثر مداخلات صورت گرفته در میدان نفتی ایجاد شود. بنابراین آگاهی از پتانسیل ایجاد رسوبات آلی و روش‌های شناسایی و رفع آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد (نیوبری و بارکر^۷، ۲۰۰۰؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).
- رسوبات مخلوط^۸: در صورتی که رسوبات، مخلوطی از مواد آلی و غیرآلی باشد، برای از بین بردن آن‌ها معمولاً باید از ترکیبی از اسید در حلال آلی استفاده کرد. به این ترتیب اسید، رسوبات کربناته را حل

1. Swelling Clays

2. Zhou, Cameron & Kadatz

3. Water-Formed Scales

4. Pore throat

5. Moghadasi, Jamialahmadi & Müller-Steinhagen

6. Organic Deposits

7. Newberry & Barker

8. Mixed Deposits

می‌کند و حلال آلی، رسوبات آلی را از بین می‌برد (توماس، ساکسون و میلنه^۱، ۱۹۹۸؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

■ امولسیون‌ها: یک امولسیون ترکیبی از دو یا چند سیال غیرامتزاجی است که یکی از آن‌ها به صورت قطرات ریز در دیگری پراکنده شده است و مولکول‌هایشان با یکدیگر ترکیب نمی‌شوند. سیال احاطه کننده، فاز پیوسته و سیال پراکنده شده در آن، فاز ناپیوسته نامیده می‌شوند. گاهی اوقات سیالات تکمیل چاه و نفت خام موجود در سازند تشکیل امولسیون می‌دهند که باعث ایجاد آسیب سازند می‌گردند. برای جلوگیری از این مشکل می‌توان از سورفکتانت‌هایی استفاده کرد که مانع تشکیل امولسیون بین سیال تکمیل چاه و نفت خام می‌شوند (فاکسنبرگ، علی و که^۲، ۱۹۹۸؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

آسیب‌های القایی^۳ عبارتند از:

● انسداد با ذرات القایی: سیالات تزریقی به چاه در ازدیاد برداشت ثانویه و ثالثیه ممکن است حاوی برخی مواد معلق، باریم، استرانتیوم، آهن و کلسیم به صورت محلول به همراه سولفات، کربنات، سولفاید و اکسید باشد که می‌تواند به سرعت و به شدت موجب کاهش تراوایی ناحیه اطراف چاه شوند (زارعیان و همکاران، ۱۳۹۰).

● تغییر ترشوندگی: سیالات حفاری پایه روغنی حاوی امولسیفایر و سورفکتانت به منظور حفظ پایداری هستند. وجود سورفکتانت در این نوع گل می‌تواند تراوایی نسبی سنگ سازند را تغییر دهد. بنابراین باید توجه داشت که هر چند تعداد مشکلات ناشی از گل حفاری پایه روغنی کمتر از گل پایه آبی است، اما شدت مشکل ناشی از استفاده از این نوع گل (تغییر ترشوندگی) بسیار مهم و شدید است. البته تأثیر اجزاء مختلف گل حفاری پایه روغنی روی تغییر ترشوندگی بسیار متفاوت است. عامل دیگر تغییر ترشوندگی، سیالات تزریقی به منظور انجام ازدیاد برداشت است. هنگام تزریق آب با شوری کم به سازندهای کربناته به منظور انجام سیلابزنی، واکنش‌هایی بین یون‌های سدیم، کلر، کلسیم، منیزیم، سولفات و کربوکسیل‌های نفت خام با سطح سنگ صورت می‌گیرد که موجب تغییر ترشوندگی می‌شوند. همچنین تزریق بخار آب و آب داغ در عملیات ازدیاد برداشت حرارتی منجر به تغییر ترشوندگی کوارتز و کلسیت می‌شود. انجام آزمایش‌های ازدیاد برداشت حرارتی روی سازندهای ماسه‌سنگی آلبرتای جنوبی نیز با تغییر ترشوندگی همراه بوده است. تغییر ترشوندگی می‌تواند سایر مشخه‌های ظرفیتی و جریانی سنگ (شامل درجه اشباع،

¹. Thomas, Saxon, & Milne

². Foxenberg, Ali & Ke

³. Induced Damages

تراوایی نسبی نفت، اشباع نفت باقیمانده و اشباع آب تحویل ناپذیر) را به شدت تحت تأثیر قرار دهد (عزیزی، ۲۰۱۱؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

- اسیدکاری: مشکلات بسیاری ممکن است حین عملیات اسیدکاری به وجود آید که شامل این موارد است: ○ ممکن است محصولات واکنش اسید هیدروفلوریک رسوب کنند؛ ○ ممکن است ذرات جامد بسیار ریز که نسبت به بقیه سست‌تر هستند جدا شده و باعث انسداد مجاری شوند؛ ○ ممکن است اسید نتواند به پوشش‌ها یا رسوبات آلی روی سنگ (مثلاً آسفالتین) نفوذ کند؛ ○ لوله مغزی آلوده می‌تواند منبعی از کانی‌های آسیب‌زننده باشد. در این صورت لجن زیادی قبل از اسید وارد سازند می‌شود و باعث ایجاد آسیب جدی به سازند می‌شود؛ ○ در برخی موارد ممکن است کانی‌ها یا فلزات سازند (مانند آهن)، در اسید حل شوند و موجب تولید محصولاتی شوند که رسوب کنند؛ ○ ممکن است در نفت‌های حاوی آسفالتین، بر اثر کاهش pH ناشی از اسیدکاری، مواد کلئیدی رسوب کنند. این لجن‌ها از آسفالتین، زین، واکس پارافین و سایر هیدروکربن‌های با وزن مولکولی بالا تشکیل شده‌اند (کروگر^۱، ۱۹۸۶؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

- باکتری‌ها: رشد کنترل نشده و فعالیت باکتری‌های کاهنده سولفات در میدین نفتی می‌تواند مشکلات ایمنی، زیست محیطی و عملیاتی از قبیل خوردگی میکروبیولوژیکی، تولید مواد جامد و سولفید هیدروژن ایجاد کند. به عبارت دیگر باکتری‌های کاهنده سولفات موجب خوردن آهن در غیاب اکسیژن، تولید و رسوب سولفید آهن نامنظم^۲ و نیز شور شدن نفت بر اثر تولید سولفید هیدروژن می‌گردد (ریوس^۳، ۱۹۸۹؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

- محصور شدن با آب^۴: نفوذ سیالات حفاری، تکمیل یا شکاف هیدرولیکی آبی، طی عملیات تکمیل یا تحریک چاه می‌تواند تراوایی نسبی هیدروکربن را کاهش دهد و در نتیجه محصورشدگی با آب ایجاد می‌شود. تراوایی نسبی فاز هیدروکربن به اشباع آب بستگی دارد و در نتیجه محصور شدن با آب روی جریان فاز هیدروکربن تأثیر می‌گذارد. این مشکل به ویژه در مخازن گازی با تراوایی کم بیشتر به چشم می‌خورد (ماهادوان و شارما^۵، ۲۰۰۵؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

1. Krueger

2. Amorphous Ferrous Sulfide

3. Reeves

4. Water Blocks

5. Mahadevan & Sharma

- ناسازگاری با سیالات حفاری: ناسازگاری بین تراویده سیال حفاری و سیالات سازند موجب تغییر ترشوندگی سازند می‌گردد و به تولید آسیب می‌زند. این امر در تمام سازندهای ماسه‌سنگ، دولومیت و کربناته رخ می‌دهد. میزان تغییرات ترشوندگی در تمام انواع سازند تقریباً یکسان است اما وقتی گل حاوی سورفکتانت نیست بیشترین تغییر ترشوندگی در دولومیت رخ می‌دهد (حسینی و کیوانی، ۱۳۹۷).

ب- منشاء آسیب‌های وارد به سازند

منشاء آسیب‌های وارده به سازند^۱ عبارتند از:

۱. **آسیب ناشی از عملیات حفاری:** سه مکانیزم مجزا برای توصیف کاهش پتانسیل تولید یا آسیب سازند در اثر حفاری ارائه شده است:

- واکنش تراویده سیال حفاری با سازند. تورم یا پراکندگی کانی رس یا مهاجرت ذرات سازند به ورودی فضای خالی این پدیده را به خوبی توضیح می‌دهد.
- واکنش بین تراویده سیال حفاری یا سیال تکمیل چاه با سیالات مخزن. به این ترتیب ترشوندگی منافذ خالی تغییر پیدا می‌کند و تراوایی نسبی نفت کاهش می‌یابد. به این اثر گاهی اوقات محصور شدگی با آب نیز گفته می‌شود.
- انسداد فیزیکی ورودی منافذ دهانه چاه توسط مواد جامد موجود در سیال حفاری. شدت این آسیب به شکل، اندازه و توزیع منافذ و شکل، اندازه، قابلیت تغییر شکل و ترشوندگی ذرات موجود در سیال بستگی دارد. اختلاف فشار اعمال شده حین حفاری نیز پارامتر مهمی است (بارنا و پاتون^۲، ۱۹۷۲؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

۲. **آسیب ناشی از عملیات سیمان کاری:** عملیات سیمانکاری ضعیف می‌تواند عامل مهمی در نفوذ سیالات خارجی به لایه‌های تولیدی باشد هرچند که در سیمانکاری احتمال وقوع آسیب سازند کمتر از سایر عملیات‌ها می‌باشد. لکن این به معنی نادیده گرفتن این اثر نیست (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). آزمایشات نشان می‌دهد که در صورت وجود کیک گل مناسب، هرزروی سیال جدا کننده و دوغاب سیمان کاهش می‌یابند. همچنین اضافه کردن کلرید پتاسیم به سیال جدا کننده یا دوغاب سیمان، به کاهش آسیب سازند ایجاد شده کمک می‌کند. البته باید توجه داشت که اگرچه آسیب حاصل از تراویده سیمان گسترده و دائمی نیست، وجود کیک گل مناسب که

^۱. Origins of Formation Damages

^۲. Barna & Patton

هرزروی آب آن پایین باشد، مانع نفوذ تراویده به نواحی بکر سازند می‌شوند (جونز^۱، ۱۹۹۱؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

۳. آسیب ناشی از عملیات مشبک کاری: مشبک کاری با پودر و فشرده کردن سنگ سازند در اطراف مشبک‌ها اثر سوء کاهش تراوایی را به همراه دارد و لذا آسیب‌های ناشی از مشبک کاری، از نوع مکانیکی است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). تراوایی ناحیه آسیب‌دیده در اطراف ناحیه مشبک شده تقریباً ۲۰ درصد از تراوایی اولیه سازند کمتر است. مؤثرترین روش به منظور کاهش این آسیب، انجام مشبک کاری در شرایط فروتعادلی است. تحقیقات فراوانی درباره درجه فروتعادلی و که همه آن‌ها مقدار بهینه را بر حسب تراوایی سازند و پارامترهای سیال و تونل مشبک محاسبه می‌کنند (والتون^۲، ۲۰۰۰؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

۴. آسیب ناشی از عملیات تعمیر چاه: منظور از عملیات تعمیر چاه عبارت است از: کشتن چاه، عملیات‌هایی که در آن‌ها سیال چاه به داخل سازند به صورت کامل به هرزروی می‌افتد و حفاری ناحیه تولیدی وقتی بالاتر از آن لوله‌جداری نصب شده باشد. حین انجام عملیات‌های مذکور، ممکن است به یک یا چند شکل زیر آسیب‌هایی به سازند وارد شوند (ایتون و اسمیتی^۳، ۱۹۷؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶):

- تورم کانی‌های رس؛
- انسداد توسط ذرات رس؛
- محصور شدگی توسط آب و امولسیون؛
- تغییر تراوایی نسبی؛
- ته‌نشینی رسوبات؛

۵. آسیب ناشی از عملیات انگیزش چاه: مکانیسم‌های آسیب که قابلیت آسیب رساندن به سازند را دارند عبارتند از (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷):

- کم شدن مقاومت فشاری سازند نزدیک چاه؛
- تشکیل امولسیون‌ها و لخته‌ها؛
- تغییر ترشوندگی؛

¹. Jones

². Walton

³. Eaton & Smithey

- گیر کردن ژل‌های شکسته نشده؛
- نفوذ ذرات جامد؛
- رسوب مجدد تولیدات واکنش هیدروکلریک اسید با سازند؛

۶. آسیب ناشی از تولید از چاه: علت اصلی آسیب سازند حین تولید، مهاجرت و رسوب ذرات ریز موجود در سازند است. چنانچه سرعت حرکت سیال در محدوده نزدیک چاه از یک حد بحرانی بیشتر شود، موجب به حرکت درآمدن ذرات ریز چسبیده به دانه می‌شوند. این ذرات وقتی به حرکت در می‌آیند که فازی که نسبت به آن ترشونده هستند شروع به حرکت کند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). شناسایی و کنترل مکانیزم‌های آسیب سازند ناشی از تولید (مانند مهاجرت شن، رسوبات آلی و غیرآلی مانند پارافین و آسفالتین، تغییر ترشوندگی و تشکیل امولسیون)، کار مشکلی است. شناسایی صحیح مکانیزم آسیب ناشی از تولید، نیازمند توصیف و درک دقیق از رابطه بین سنگ - سیال - ذرات است. این درک دقیق توسط فرایندهای مرتبط با انتقال ذرات و سیالات در سازند است مشروط بر این که اطلاعات محیط رسوبی در دسترس باشند. این امر نیازمند این است که شرایط غالب مخزن در نظر گرفته شود (سیوان^۱، ۲۰۰۷؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

در نتیجه برای حداکثر کردن عملکرد چاه در مسیرهای بین سازند تا خطوط لوله، باید کمترین موانع کاهش فشار وجود داشته باشد. برای رسیدن به این شرایط، تکمیل مناسب چاه و حذف اثر آسیب وارد به سازند نیاز است. اگرچه حذف آسیب وارد به سازند آسان به نظر می‌رسد، اما تکمیل چاه بدون وارد آمدن آسیب به آن هنوز غیرممکن است. تجربه نشان می‌دهد که ابزار مناسب باید بعد از شناسایی مشکل انتخاب شود. تلاش و صرف هزینه برای شناختن طبیعت و شناسایی مشکل می‌تواند بهترین راه سرمایه‌گذاری باشد (زارعیان و همکاران، ۱۳۹۰).

۱-۲-۲ اسیدکاری سازندهای ماسه‌سنگی

ماسه‌سنگ‌ها به دسته‌ای از سنگ‌ها اطلاق می‌شوند که دارای مقادیر زیادی کوارتز باشند. در کنار کوارتز این سنگ‌ها شامل کانی‌های دیگری نظیر آلومینیوم سیلیکات‌ها، اکسیدهای فلزی، سولفات‌ها، کلریدها، کربنات‌ها و مواد سیلیسی بی‌شکل (غیر کریستالی) هستند. کانی‌هایی که در رسوبات اولیه وجود دارند را اجزاء تخریبی^۲ می‌نامند و معمولاً آب همراه زیادی دارند. در اسیدکاری ماسه‌سنگ‌ها؛ هدف، حذف و انحلال آسیب وارد به سازند و رسیدن به تراوایی اولیه سنگ یا همان اثر پوست‌های صفر است (بر خلاف اسیدکاری سازندهای کربناته، که هدف از آن انحلال ماتریس سنگ و بر طرف کردن آسیب به وسیله ایجاد سوراخ‌های کرمی می‌باشد که در

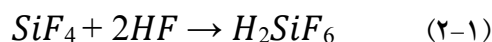
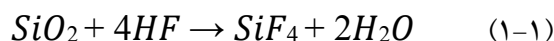
^۱. Civan

^۲. Detrital Species

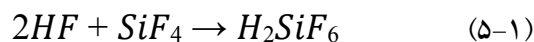
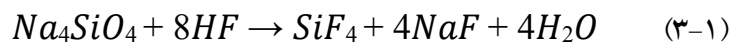
نتیجه معمولاً اثر پوست‌های منفی می‌شود). به بیان ساده‌تر تفاوت اسیدکاری ماسه‌سنگ‌ها با سنگ‌های کربناته در این است که در اسیدکاری ماسه‌سنگ، هدف، حذف آسیب‌های وارده به سازند است که باعث مسدود شدن یا بلوکه کردن فضاهای خالی و گلوگاه‌ها در سازند شده‌اند. بنابراین حالت ایده‌آل، رسیدن به تراوایی اولیه مخزن است. در اسیدکاری کربناته‌ها؛ کانی‌های سازندی که در اطراف محل آسیب هستند حل شده و تراوایی جدیدی ایجاد می‌شود. اسید مورد نیاز برای حذف آسیب وارد به سازند معمولاً با کانی‌های سازند بسیار سریع واکنش داده و نتیجه آن کمپلکس‌های شیمیایی است که می‌توانند در محیط ایجاد شده نامحلول بوده و در نتیجه به صورت ژل‌ها یا ذرات جامد؛ رسوب کنند. از آنجا که هم آسیب وارد به سازند و هم خود سازند می‌توانند ساختارهای کریستالی پیچیده‌ای داشته باشند که منجر به تولید فرآورده‌های متفاوت گردد، اسیدکاری در ماسه‌سنگ‌ها نسبت به کربناته‌ها نیاز به فهم بیشتر شیمی واکنش دارند. ۷۵٪ از مواردی که به‌سازی مخازن ماسه‌سنگی به صورت مهندسی انجام شده است، عملیات به‌سازی موفقیت‌آمیز و منجر به افزایش تولید شده است (زارعیان و همکاران، ۱۳۹۰).

معمولاً برای اسیدکاری سازندهای ماسه‌سنگی از مخلوطی از هیدروکلریک اسید و هیدروفلوریک اسید استفاده می‌شود. این امر به این دلیل است که هیدروفلوریک اسید با کانی‌های رس واکنش می‌دهد. این کانی‌های رسی توسط گل حفاری وارد چاه می‌شوند. گاهی اوقات نیز هیدروکلریک اسید به تنهایی برای اسیدکاری سازندهای ماسه‌سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در صورتی موفق است که ماسه‌سنگ دارای کلسیت (کربنات کلسیم) بالایی باشد. واکنش‌های شیمیایی بین هیدروفلوریک اسید و سیلیکا و کلسیت به صورت زیر است: (ویلیامز، گیدلی و اسکچتر^۱، ۱۹۷۹؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

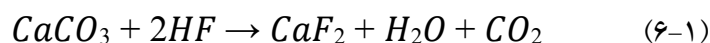
واکنش با سیلیکا:



واکنش با سیلیکات‌ها (فلدسپار یا رس):



واکنش با کربنات کلسیم:



¹. Williams, Gidley, & Schechter

۱-۲-۳ روش‌های اسیدکاری و انواع افزایش‌های اسید

بر اساس رایج‌ترین تقسیم بندی، سه نوع روش اسیدکاری وجود دارد:

الف- روش شستشو با اسید

چاه‌ها در طول عمر تولیدی خود، ممکن است طی چندین مرحله، توسط اسید شستشو و تمیزکاری شوند. پس از مدتی، در اثر جریان هیدروکربن‌ها درون چاه، لجن‌ها^۱ و رسوب‌ها^۲ موجب انسداد دهانه چاه می‌شوند؛ بنابراین یکی از اهداف اسیدکاری به روش شستشو، تمیزکاری این مواد است. همچنین می‌توان از این روش برای زدودن کیک گل پس از اتمام عملیات حفاری و تمیز کردن مجرا و ورودی‌های موجود بر روی دیواره چاه استفاده کرد. در عملیات شستشو با اسید، هدف نفوذ عمیق اسید درون سازند و افزایش تراوایی سنگ مخزن نیست، بلکه هدف اصلی تمیز کردن داخل شبکه‌های موجود و به عبارت ساده‌تر تمیز کردن مجرای ورودی سیال از سنگ مخزن به داخل چاه می‌باشد (قناعت‌پیشه، ۱۳۹۲).

ب- اسیدکاری ماتریسی

این روش اصولاً در چاه‌ها با تراوایی و نفوذپذیری کم انجام می‌شود و در نتیجه هدف از انجام آن، افزایش نفوذپذیری است. رسیدن به این هدف، به دو روش تحقق می‌یابد؛ بزرگتر شدن خلل و فرج موجود در سنگ توسط اسید که بیشتر در مخازن ماسه سنگی صورت می‌گیرد، اما خیلی مرسوم نیست، چرا که در مخازن ماسه سنگی معمولاً از روش‌های شکاف هیدرولیکی استفاده می‌شود. در دیگر حالت، سعی در ایجاد شکاف‌های ریز و خلل و فرج جدید در سنگ می‌شود که معمولاً در سازندهای کربناته از این روش استفاده می‌شود. در مکانیسم این روش، اسید با فشاری کمتر از فشار شکاف سازند، درون آن تزریق می‌گردد. مهم‌ترین نکته در این روش، کنترل فشاری است که اسید تحت آن فشار درون سازند پمپ می‌گردد. پارامتر مؤثر دیگر، حجم اسید تزریقی است که ملزم دقت زیادی در محاسبه آن نیست؛ علت این امر، عدم وجود امکان رویت تأثیر اسید بر سنگ مخزن می‌باشد که خود باعث می‌گردد برخی پارامترها مجهول باقی بمانند. ولی می‌توان گفت حجم اسید با توجه به خلل و فرج موجود و قسمت آسیب دیده مشخص می‌گردد. به عنوان مثال، معمولاً تزریق حجمی معادل ۱۰۰ تا ۲۰۰ گالن اسید به ازای هر فوت سازند، پیشنهاد می‌گردد.

از دیگر عوامل مؤثر در نتیجه این روش، دبی است که تحت آن اسید پمپ می‌گردد؛ این نرخ با توجه به مشخصات سنگ مخزن و در نظر گرفتن حد فشار شکست سازند، قابل محاسبه است. عامل بعدی غلظت اسید

^۱. Sludge

^۲. Scale

تزریقی است؛ معمولاً از اسیدهایی با غلظت بیشینه ۲۸ درصد و دمای ۲۰۰ درجه فارنهایت استفاده می‌شود (مؤمنی میانایی و همکاران، ۱۳۹۴).

ج- اسیدکاری همراه با ایجاد شکاف

در این حالت، اسید تحت فشاری بالاتر از فشار شکنندگی سنگ مخزن، به درون چاه پمپ می‌گردد و بدین ترتیب در سازند ایجاد شکاف و ترک می‌نماید. این عملیات معمولاً منحصر به طبقات کربناته و بخصوص آهکی است؛ در مواردی مشاهده شده است که از آن برای انگیزش طبقات بدون آسیب و کربناته نیز استفاده شده است. در اسیدکاری شکافی، علاوه بر شکاف‌زایی در سازند و ایجاد ارتباط گسترده بین مخزن و چاه، از واکنش اسید با دیواره شکاف نیز استفاده می‌گردد تا سطح دیواره به طرز نامنظمی حل شده و پس از برداشته شدن فشار، رسانایی شکاف حفظ شود و شکاف‌ها به حالت اول باز نگردند (حسین‌زاده هلاله، ۱۳۹۲).

افزایه‌های اسید نیز شامل گستره وسیعی از افزودنی‌ها به اسید تزریقی می‌باشند که موجب اصلاح برخی نواقص احتمالی حین عملکرد اسید می‌شوند؛ برخی افزایه‌ها عبارتند از:

الف- عامل منحرف‌کننده^۱: بطور موقت موجب انسداد قسمت‌هایی که نفوذ پذیری نسبتاً بالایی دارند، می‌شود و بدین ترتیب جریان به سمت قسمت‌های دیگر منحرف می‌شود و در نهایت موجب افزایش تراوای قسمت‌هایی با نفوذپذیری کمتر می‌شود. استفاده از این مواد در ضخامت‌های بیش از ۱۰ فوت، متداول است.

ب- عامل توقیف^۲: یون‌های آهن، در حضور اسید کلریدریک، تشکیل ترکیبات یونی داده و پس از خنثی شدن اسید در محیط مخزن، رسوب می‌نمایند. بمنظور جلوگیری از رسوباتی نظیر آهن هیدروکسید، از افزایه‌هایی این گروه که متداول‌ترین آن‌ها ادتا^۳ (اتیلن دی امین تتراستیک اسید) که ماده‌ای بسیار گران قیمت است، استفاده می‌شود.

ج- مواد فعال سطحی: بطور کلی موجب جلوگیری از ایجاد امولسیون و رکود اسید در مخزن، و همچنین افزایش میزان فعالیت‌های سطحی و قابلیت جذب اسید در سنگ مخزن می‌شوند (قناعت‌پیشه، ۱۳۹۲).

در برخی موارد برای افزایش عمق نفوذ هیدروفلوئوریک اسید، از افزایه‌هایی نظیر فلوئوبوریک اسید استفاده می‌گردد. این مواد عملکرد اسید را در ابتدا کند می‌کنند و سرعت واکنش را پایین می‌آورند؛ اما پس از رسیدن اسید به عمق مورد نظر وارد واکنش شده و عمل می‌کنند. همچنین مواد دیگری از این گروه مانند آمونیوم

^۱. Diverting Agent

^۲. Sequestering Agent

^۳. EDTA

فلوئورید، همراه با هیروکلریک اسید تزریق می‌شوند؛ این مواد پس از رسیدن به عمق مطلوب تشکیل اسید قوی هیدروفلوئوریک اسید می‌دهند و موجب ایجاد خوردگی در سازند می‌شوند (مؤمنی میانایی و همکاران، ۱۳۹۴).

۱-۲-۴ انواع اسیدهای مورد استفاده در عملیات اسیدکاری

گستره وسیعی از انواع اسیدها متناسب با محل کاربرد آنها در صنعت نفت مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما انواع اسیدهایی که در ادامه معرفی خواهند شد، از جمله اسیدهای متداول به لحاظ صرفه اقتصادی و کارایی می‌باشند. بطور کلی از چهار نوع اسید در عملیات اسیدکاری چاه‌های نفت و گاز می‌توان استفاده کرد:

الف- اسیدهای آلی

واکنش هیدروکلریک اسید و کربناته (به خصوص در دمای بالای مخزن)، بسیار سریع است. بنابراین مصرف سریع اسید باعث می‌شود که اسید به اعماق سازند نفوذ نکند. در نتیجه فقط یک ناحیه کم عمق در اطراف چاه تحت تأثیر اسید قرار می‌گیرد و تنها پوسته آن ناحیه کاهش می‌یابد. مشکل دیگر هیدروکلریک اسید، خوردگی بالای لوله‌ها است که هم لوله‌ها را از بین می‌برد و هم در نفت‌های غنی از آسفالتین تشکیل لجن می‌دهد. یک راه جایگزین برای رهایی از مشکلات مذکور، استفاده از اسیدهای آلی است. اسیدهای آلی، اسیدهای ضعیفی هستند که کامل در آب تفکیک نمی‌شوند. اسیدهای آلی مانند استیک اسید استیک (خوردندگی کم، قابلیت کاربرد در دماهای بالا، عمق نفوذ بالا) یا فرمیک اسید؛ جایگزین مناسبی برای هیدروکلریک اسید به ویژه در چاه‌هایی با دمای بالا هستند. این اسیدها در مقایسه با هیدروکلریک اسید آهسته‌تر مصرف می‌شوند و در نتیجه عمق نفوذ آنها به داخل سازند بیشتر است و تحریک بهتری صورت می‌گیرد. مدلها و طراحی‌های مختلفی برای این نوع اسیدکاری توسط محققین انجام شده است (بویجسه، بوئر و بروکل^۱، ۲۰۰۴؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

ب- اسیدهای هیبریدی

که مخلوطی از اسیدهای آلی و معدنی می‌باشند و هدف از استفاده از آنها، افزایش عمق نفوذ در مخزن می‌باشد.

ج- اسیدهای کریستالی

که بصورت پودر هستند و در محل، بصورت محلول با آب تهیه می‌شوند. عملکرد ضعیف‌تری نسبت به اسیدهای آلی و معدنی دارند؛ اما به دلیل قابلیت تهیه و حمل و نقل آسان، در برخی چاه‌ها مورد استفاده قرار

^۱. Buijse, Boer & Breukel

می‌گیرند؛ اما به دلیل امکان تجزیه شدن در دماهای بالای ۱۶۰ درجه فارنهایت، بصورت گسترده مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

د- اسیدهای معدنی

که شامل اسید کلریدریک و هیدروفلوئوریک اسید می‌باشند (موحد، ۱۳۹۱).

۱- **اسید کلریدریک (HCL):** متداول‌ترین و پرکاربردترین اسید که معمولاً در اسیدکاری مخازن آهنی و دولومیتی (کربناته) مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرند. این اسید دارای خاصیت خوردگی فلزات است؛ بنابراین معمولاً همراه با آن از افزودنی‌هایی نظیر کندکننده خوردگی^۱ (که به منظور جلوگیری از خوردگی دیواره لوله جداری و تجهیزات اسیدکاری تزریق می‌گردد) استفاده می‌شود؛ اگرچه این امر موجب تغییر خواص ترشوندگی ماسه سنگ‌ها از آب دوست به نفت دوست می‌گردد (موحد، ۱۳۹۱).

۲- **مخلوط اسید کلریدریک و هیدروفلوئوریک اسید (HF):** در سازندهای سیلیسی و مخازن ماسه سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ چرا که مخلوط اسید کلریدریک و هیدروفلوئوریک اسید؛ قدرت خوردگی سیلیس را داراست. در مکانیسم این اسیدکاری ابتدا؛ مخلوط اسید کلریدریک و هیدروفلوئوریک اسید وارد واکنش می‌شود، و به دنبال آن اسید کلریدریک تأثیر می‌کند. به مخلوط این دو اسید؛ اسید گل^۲ یا اسید اصلی^۳ اطلاق می‌شود (معمولاً اسید کلریدریک با غلظت ۱۲ درصد و مخلوط اسید کلریدریک و هیدروفلوئوریک اسید با غلظت ۳ درصد). این مخلوط مصرف چندان زیادی ندارد.

همچنین تجربه نشان داده است که در سازندهای با دمای بالا، استفاده از اسیدهای آلی به جای اسیدهای معدنی، تأثیرات بیشتری روی نتایج اسیدکاری خواهد داشت (مؤمنی میانایی و همکاران، ۱۳۹۴).

ه- استفاده از اسیدهای هوشمند

سیالات تزریقی از جمله کلریدریک اسید همواره تمایل دارند تا از مسیرهایی با کمترین مقاومت عبور نمایند. از این رو نواحی با تراوایی پایین در حالی که بیش از نواحی دیگر به اسید نیاز دارند، به طور ذاتی اسید کمتری دریافت می‌کنند. برای غلبه بر این مشکل، مهندسين مخزن از روش‌های انحراف سیال استفاده می‌کنند. روش‌های انحراف سیال در دو گروه اصلی یعنی روش‌های شیمیایی و روش‌های مکانیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های انحراف سیال که برای به کارگیری در مخازن کربناته توسعه یافته است، استفاده

^۱. Corrosion Inhibitor

^۲. Mud Acid

^۳. Main Acid

از اسید هوشمند موسوم به اسید منحرف کننده جریان^۱ است. این اسید، فاقد پلیمر و دارای خاصیت خود انحرافی است که بدون وارد آوردن آسیب به مخزن، به خوبی ناحیه مورد نظر برای اسیدکاری را تحت پوشش قرار می دهد. همچنین به کمک اسید منحرف کننده جریان می توان نواحی با اشباع بالای آب را به طور انتخابی مسدود کرد. با تزریق اسید منحرف کننده جریان در مخزن، یک سد با ویسکوزیته بالا ایجاد می شود، اما با آغاز تولید مجدد نفت از چاه، این سد به راحتی شکسته می شود. بنابراین هیچ گونه آسیبی به مخزن وارد نمی شود. از مزایای دیگر آن است که می توان آن را در فشارهای پایین تزریق نمود. تمیز کردن چاه پس از تزریق و بازیافت اسید تزریق شده نیز به راحتی امکان پذیر است. اسیدکاری به کمک اسید منحرف کننده جریان در آسیا و به ویژه در منطقه خاورمیانه برای تحریک ماتریس و اسیدکاری انحرافی در چاه های عمودی و افقی، چاه های تولیدی نفتی و گازی و چاه های تزریق آب و همچنین برای ایجاد شکاف با اسید در چاه های تولیدی نفتی و گازی و چاه های تزریق آب به دفعات مورد استفاده قرار گرفته است. در یک پژوهش به اثبات رسیده است که نرخ تولید از پنج حلقه چاه پس از اسیدکاری به کمک اسید منحرف کننده جریان به مراتب از متوسط نرخ تولید از یازده حلقه چاه که در آن ها اسیدکاری بدون استفاده از اسید منحرف کننده جریان صورت گرفته است، بیشتر می باشد (مؤمنی میانایی و همکاران، ۱۳۹۴).

و- ژل های اسیدی

از آنجا که واکنش هیدروکلریک اسید با سازند بسیار سریع است، محدوده کمی از اطراف دهانه چاه تحت تأثیر اسید قرار می گیرد. روش های مختلفی برای افزایش عمق نفوذ اسید به سازند وجود دارد که عبارتند از: اضافه کردن عامل ژل مناسب، اضافه کردن کندساز شیمیایی، تبدیل اسید به شکل فوم و امولسیون کردن اسید. ژلهای اسیدی همچنین برای ایجاد شکاف نیز استفاده می شوند. در آزمایش های مختلف استفاده از این موارد برای اسید با غلظت های مختلف (۱ تا ۲۸ درصد وزنی) انجام شده که نتایج موفقی در پی داشته است (دیسارکار، داوسون و سدیلو^۲، ۱۹۸۴؛ به نقل از هاشمی زاده، ۱۳۹۶).

ز- امولسیون ها

آزمایش ها نشان می دهد که استفاده از امولسیون اسید به شدت در تحریک سازندهای سنگ آهکی و دولومیتی با دمای بالا کارآمد است. میزان کاهش نرخ واکنش این روش، بسیار بیشتر از روش های مشابه (مانند استفاده از ژل) برای کاهش نرخ واکنش است. امولسیون با استفاده از مواد فعال سطحی ساخته می شود. این مواد

^۱. Viscoelastic Diverting Acid (VDA)

^۲. Deysarkar, Dawson & Sedillo

فعال سطحی هم اسید را امولسیفاید می‌کنند و هم یک مانع شیمیایی روی سطح سنگ ایجاد می‌کنند (کروه و میلر^۱، ۱۹۷۴؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

ح- میکروامولسیون‌ها

یکی از روش‌های کاهش نرخ واکنش اسید استفاده از میکروامولسیون اسید است. میکروامولسیون‌ها ذرات بسیار ریز اسید و نفت پراکنده در هم هستند که با استفاده از مواد فعال سطحی پایدار شده‌اند. یک مثال، امولسیون اسید در گازوئیل (گازوئیل فاز پیوسته و اسید فاز پراکنده) است. نقش گازوئیل این است که نقش مانع واکنش اسید به سنگ را ایفا می‌کند. به این ترتیب اسید به عمق بیشتری از سازند نفوذ می‌کند و تراوایی محدوده بیشتری از آن را بهبود می‌بخشد. آزمایشات رفتار این سیال را از نوع غیرنیوتنی و پایداری آن را بیش از ۷۲ ساعت در دمای ۲۴ درجه سانتیگراد گزارش کرده‌اند. با افزایش دما، پایداری میکروامولسیون کاهش می‌یابد. با افزایش دما، نرخ واکنش میکروامولسیون نیز افزایش پیدا می‌کند. میکروامولسیون اسید در مقایسه با اسید معمولی خوردگی کمتری روی لوله‌ها ایجاد می‌کند و تراوایی را بیشتر افزایش می‌دهد (الانازی، ناصر الدین و محمد^۲، ۱۹۹۸؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

ط- اسیدهای خود پراکنده‌کننده^۳

اسیدهای خود پراکنده‌کننده در اصل برای ایجاد شکاف به وجود آمده‌اند، اما می‌توان از آن‌ها برای بهبود تزریق اسید در سازندهای کربناته استفاده کرد. این اسیدها از ترکیب هیدروکلریک با یک عامل ژل ساز و یک عامل پیوندی^۴ حساس به pH به وجود آمده‌اند. در مقادیر میانی pH (۱ تا ۳/۵)، عامل پیوندی عمل می‌کند. گر انرژی کمتر اسید مصرف نشده به آن اجازه می‌دهد که به درون شکاف‌ها و انشعابات نفوذ کند و تا زمانی که واکنش (مصرف) اسید باعث افزایش pH و عمل عوامل پیوندی شود، ادامه یافته و بنابراین باعث پراکنده شدن اسید این بخش به سایر بخش‌های مخزن می‌شود. به خاطر این که ژل در pH بالای ۳/۵ می‌شکند، در زمان توقف تزریق اسید تازه، برگشت به عقب اسید به راحتی صورت گرفته و به آن اجازه می‌دهد که کامل مصرف شود. معمولاً اسیدهای خود پراکنده‌کننده (مانند اکثر پراکنده‌کننده‌ها یا فوم‌ها) متناوباً همراه با اسید معمولی در چند مرحله تزریق می‌شوند (زارعیان و همکاران، ۱۳۹۰).

¹. Crowe & Miller

². Al-Anazi, Nasr-El-Din, & Mohamed

³. Self-Diverting Acid

⁴. Cross Linker

استفاده از این نوع اسید در میادین نفتی مکزیک، کویت و برزیل در مقایسه با اسید معمولی، تولید بیشتری به همراه داشته است. استفاده موفق دیگر این نوع اسید در میدان نفتی مومبای هند است. از آنجا که چاه‌های این میدان دارای چند لایه تولیدی هستند، حین اسیدکاری بخش قابل توجهی از اسید وارد نواحی با تراوایی بالا می‌گردد که با استفاده از اسید خود پراکنده، سایر لایه‌های کم تراوا نیز تحت عملیات اسیدکاری قرار می‌گیرند (سارما، مندل و هارگاوا^۱، ۲۰۱۲؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

ی- افزایش‌ها در سیالات اسیدکاری

برای جلوگیری از خوردگی بیش از حد، جلوگیری از تشکیل رسوب لجنی و امولسیون، جلوگیری از رسوب آهن، بهبود تمیزکاری، بهبود پوشش ناحیه اسیدکاری شده و پیشگیری از رسوب محصولات واکنش‌ها از افزایش‌ها استفاده می‌شود. علاوه بر آن از افزایش‌ها، در پیش شستشو و پس شستشو برای استحکام رس‌های دیواره چاه و پراکنده کردن پارافین‌ها و آسفالتین‌ها استفاده می‌شود. انتخاب نامناسب افزایش ممکن است باعث عدم موفقیت بهسازی شود. تمام افزایش‌ها باید در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گیرند. سازگاری افزایش‌ها با سیالات سازند باید با استفاده از بسته‌شن^۲ آزمایش شود. این فرآیند بیانگر شرایط ته‌چاهی است. احتمال ناسازگاری بین افزایش‌ها و سیالات سازند باید شناسایی و قبل از اسیدکاری رفع شود. در ادامه عملکرد برخی از افزایش‌ها به طور مختصر بررسی می‌شوند (زارعیان و همکاران، ۱۳۹۰):

- بازدارنده‌های خوردگی: مهمترین افزایش اسید، بازدارنده‌های خوردگی است. بازدارنده‌های خوردگی مواد شیمیایی هستند که سرعت خوردگی لوله‌های حفاری و مغزه (و هر فلز دیگر که با اسید در تماس است) با اسید را کند می‌کند؛
- عوامل فعال سطحی^۳: عوامل فعال سطحی مورد استفاده در اسیدکاری برای شکستن امولسیون‌های نامناسب، کاهش کشش سطحی، تغییر ترشوندگی، تمیزکاری سریع، پراکنده کردن افزایش‌ها و جلوگیری از تشکیل رسوبات لجنی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ عوامل فعال سطحی از یک گروه محلول در آب (هیدروفیلیک) و یک گروه محلول در نفت (لیپوفیلیک) تشکیل شده است که این دو از یکدیگر مجزا می‌باشند ولی با استفاده از یک پیوند شیمیایی کوالانسی به یکدیگر مرتبط شده‌اند؛
- پایدارکننده‌های رس: مواد شیمیایی استفاده شده برای پایدار کردن رس‌ها و ذرات، معمولاً بوسیله جذب الکترواستاتیکی یا تبادل یونی بر روی کانی‌ها جذب می‌شوند؛

^۱. Sarma, Mandal, & Bhargava

^۲. Sandpack

^۳. Surfactant

- افزایش‌های کنترل آهن: هنگامی که مقادیر قابل ملاحظه‌ای Fe^{3+} (یون‌های فریک) بیشتر از یون معمول آهن یعنی Fe^{2+} (یون‌های فروس) در اسید حل شوند، احتمال رسوب آهن و کاهش تراوایی بعد از اسیدکاری وجود دارد. آهن فریک در pH حدود ۷ رسوب می‌کند. چون pH محلول‌های اسید مصرف شده به ندرت به ۶ می‌رسد، رسوب آهن فروس به ندرت مشکل‌ساز می‌شود. منابع آهن عبارتند از: محصولات خوردگی روی دیواره لوله‌ها، زنگ آهن، کانی‌های دارای آهن؛
- الکل‌ها: الکل‌ها برای از بین بردن محصور شدگی توسط آب، افزایش بازیافت سیال، تأخیر در واکنش اسید و کاهش محتوای آب در سیالات اسیدکاری استفاده می‌شود. رایج‌ترین الکل‌های مورد استفاده ایزوپروپانول و متانول می‌باشند؛
- استیک اسید: یک مشکل رایج در اسیدکاری با اسید هیدروفلوئوریک، ایجاد رسوب در اثر واکنش محصولات است. بسیاری از واکنش‌های ایجاد رسوب، تقریباً فوراً با مصرف محلول اسیدی رخ می‌دهد. بسیاری از مشکلات رسوب‌گذاری را می‌توان با استفاده از پیش‌شستشوی کافی با اسید و پس‌شستشو با آمونیم کلرید بر طرف کرد. استفاده از اسید استیک ۳٪ در اسیدکاری توسط اسید هیدروفلوئوریک، ایجاد زنگ را کاهش می‌دهد، ته‌نشینی آلومینیوم سیلیکات را به وسیله دو مکانیزم اثر بافری و اثر جداسازی به تأخیر می‌اندازد؛
- پراکنده‌سازهای آلی: یک روش تقریباً جدید برای حذف رسوب آلی، استفاده از عوامل فعال سطحی پراکنده‌ساز با زایلین است. این عوامل فعال سطحی می‌توانند به داخل رسوب‌های آلی نفوذ و آن‌ها را سست کنند. بنابراین زایلین می‌تواند به طور مؤثر آن‌ها را حل کند. بسته به نوع رسوب، سختی، چسبندگی، دمای ته‌چاهی از غلظت‌های حجمی ۱ تا ۱۵٪ استفاده می‌شود؛
- حلال‌های آلی: حلال‌های آلی به تنهایی یا به صورت ترکیب با اسید و دیگر مواد استفاده می‌شوند و برای جلوگیری از محصور شدن با آب مفید هستند. حلال‌های آلی شامل الکل‌ها و حلال‌های قدیمی مثل زایلین، تولوئن و دیزل هستند. حلال‌های آلی برای حذف رسوبات آلی مفید هستند. یک حلال‌های آلی می‌تواند هنگامی که زنگ‌های غیرآلی با آسفالتین و پارافین مخلوط و یا پوشیده شده‌اند، با اسید ترکیب شود؛

۱-۲-۵ روش‌های بهینه‌سازی و افزایش بازده اسیدکاری در مخازن هیدروکربنی الف- انتخاب مناسب نوع اسید و غلظت آن

امروزه در اسیدکاری، هم از اسیدهای معدنی و هم اسیدهای آلی استفاده می‌شود. همان‌طور که قبلاً بدان اشاره گردیده؛ اسیدهای معدنی مانند هیدروکلریک اسید و هیدروفلوئوریک اسید 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 به هیدروکلریک اسید به دست می‌آید. هیدروفلوئوریک اسید می‌تواند، سیلیکا (ماسه) یا سیلیکات رسی، گِل، 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 تأثیر 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 (تیلور، فیتن و مک‌نیل^۱، ۲۰۱۹).

توماس و همکارانش^۲ در سال ۲۰۰۲ میلادی؛ تأثیر 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 میلادی، 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. در سال‌های اخیر، استفاده از آمینو پلی‌کربوکسیلیک اسید؛ 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. رییس و همکارانش در شرکت‌های هالیرتون و شیورون در سال ۲۰۱۵ میلادی، انجام موفقیت‌آمیز اسیدکاری به وسیله آمینو پلی‌کربوکسیلیک اسید را در چاهی از یک میدان کربناته و فراساحلی در

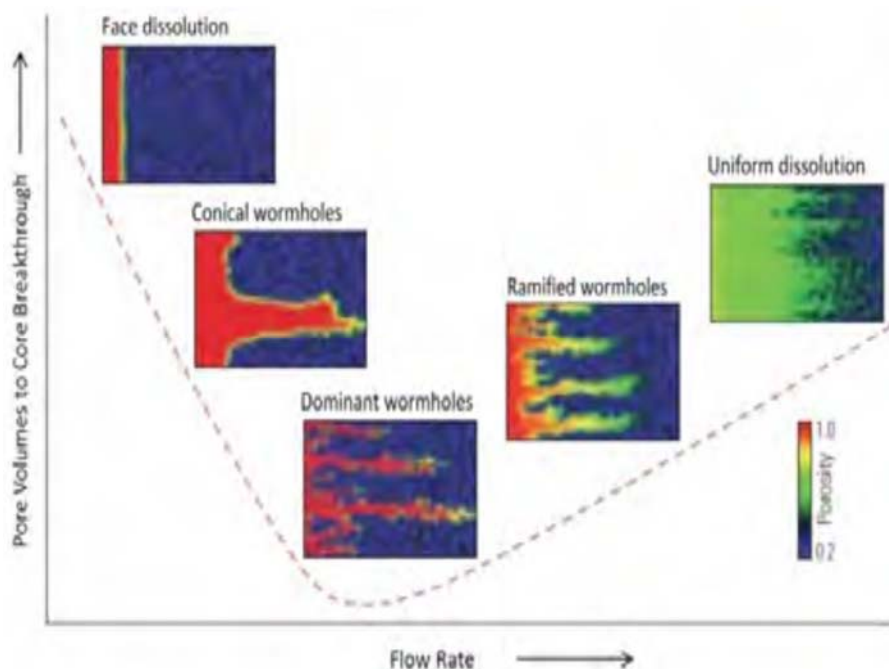
^۱. Taylor, Fyten & McNeil

^۲. Thomas et al.

غرب آفریقا، گزارش کردند. آن‌ها مزایای 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 اعلام کردند (به نقل از بصیر و شهبازی، ۱۳۹۶).

ب- بهینه‌سازی دبی تزریق

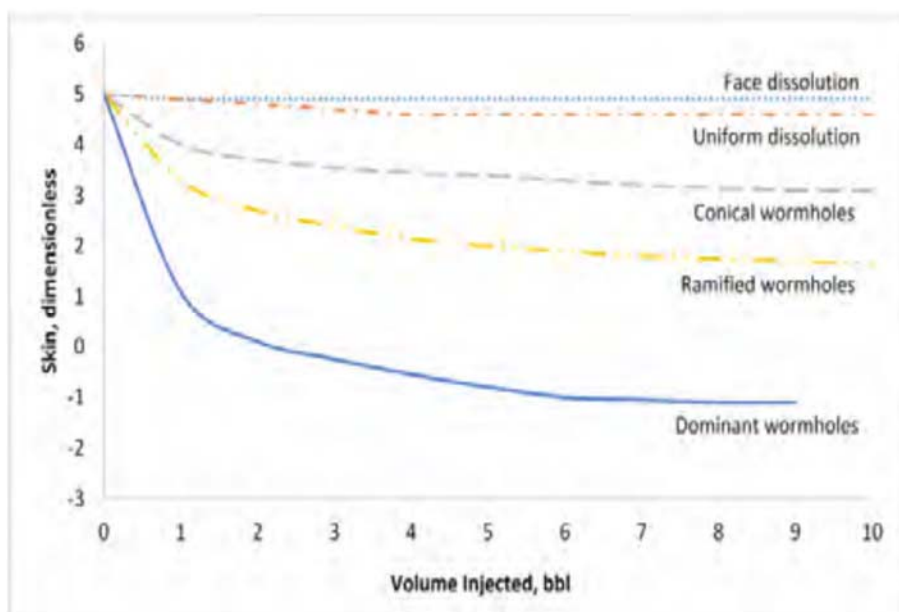
وقتی اسید به سازند تزریق می‌شود، مقداری از سنگ اطراف چاه را در خود حل کرده و به درون سازند نفوذ می‌کند. به کانال جریانی که به وسیله اسید در سنگ تشکیل می‌شود، حفره جریانی گفته می‌شود. هرچه طول حفره جریانی بیشتر باشد، مقدار ضریب پوسته کمتر شده و در واقع اسیدکاری موثرتر است. دبی تزریق پایین باعث مصرف اسید 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. در شکل (۱-۱) رابطه دبی تزریق اسید و الگوی انحلال کانی‌های سنگ توسط اسید نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: انواع الگوهای انحلال سنگ توسط اسید (آکانی و نصرالدین^۱، ۲۰۱۵)

^۱. Akanni & Nasr-El-Din

بر این اساس دبی تزریق کم باعث می‌شود، ورودی مغزه به صورت سطحی خورده شود و باید حجم زیادی از اسید تزریق شود تا به خروجی مغزه برسد. در دبی‌های کمی بالاتر، حفره جریانی مخروطی شکل 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^۱ به وجود می‌آورد. در دبی بیشتر از بهینه، اسید به درون منافذ ریز سنگ هل داده می‌شود و حفره جریانی به صورت شاخه‌دار^۲ می‌شود. در دبی بسیار بالا، اسید وارد محیط متخلخل می‌شود، اما به علت زمان کم با سنگ واکنش نداده و الگوی انحلال یکنواخت را به وجود می‌آورد. البته الگوی انحلال سنگ بر میزان کاهش ضریب پوسته تأثیر مستقیم دارد. زیرا میزان نفوذ اسید در سنگ را نشان می‌دهد. شکل (۱-۲) تأثیر 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 (آکانی و نصرالدین، ۲۰۱۵).



شکل ۱-۲: تأثیر ساختار حفره جریانی بر میزان کاهش ضریب پوسته (آکانی و نصرالدین، ۲۰۱۵)

^۱. Dominant Wormhole

^۲. Ramified Wormhole

اِتن و همکارانش^۱ در سال ۲۰۱۵ میلادی؛ 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 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، تأثیر مستقیم روی میزان طول حفره جریانی دارد (به نقل از بصیر و همکاران، ۱۳۹۶).

جمعه و همکارانش^۲ در سال ۲۰۱۵ میلادی؛ تزریق اسید با دبی ثابت^۳ ۱۵ و فشار ثابت^۴ ۱۶؛ 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 از مغزه‌ها نشان می‌دهد، در روش فشار ثابت در دبی تزریق کم، الگوی انحلال بصورت کینواخت است (به نقل از بصیر و همکاران، ۱۳۹۶).

چنگ و همکارانش^۵ در سال ۲۰۱۶ میلادی، تأثیر 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؛ تأثیر ناچیزی بر حفره جریانی خواهد داشت (به نقل از بصیر و همکاران، ۱۳۹۶).

ج- 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 بیش‌تر، تأثیری بر تراوایی سازند اطراف چاه

1. Etten et al.

2. Gomaa et al.

3. Constant volumetric Rate (CVR)

4. Constant Injection Pressure (CIP)

5. Cheng et al.

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 (آگور، المهرب و ابوخمسین^۱، ۲۰۰۰). آگور و همکارانش در سال ۲۰۰۰ میلادی؛ 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 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 انحلال پذیری بیشتر دی‌اکسید کربن در نفت و توانایی بیشتر آن در جا به جا کردن نفت، استفاده از این گاز نسبت به نیتروژن مؤثرتر است. در سال ۲۰۰۳ میلادی نیز؛ شاکلا و همکارانش^۲ 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 (به نقل از بصیر و همکاران، ۱۳۹۶).

در سال ۲۰۰۰ میلادی، العنازی و همکارانش^۳ در شرکت سعودی آرامکو، پیش تزریق آمونیوم کلرید؛ ۵۰ درصد جرمی را با موفقیت در میدانی ماسه‌سنگی 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 (به نقل از بصیر و همکاران، ۱۳۹۶).

د- اسیدهای تأخیری

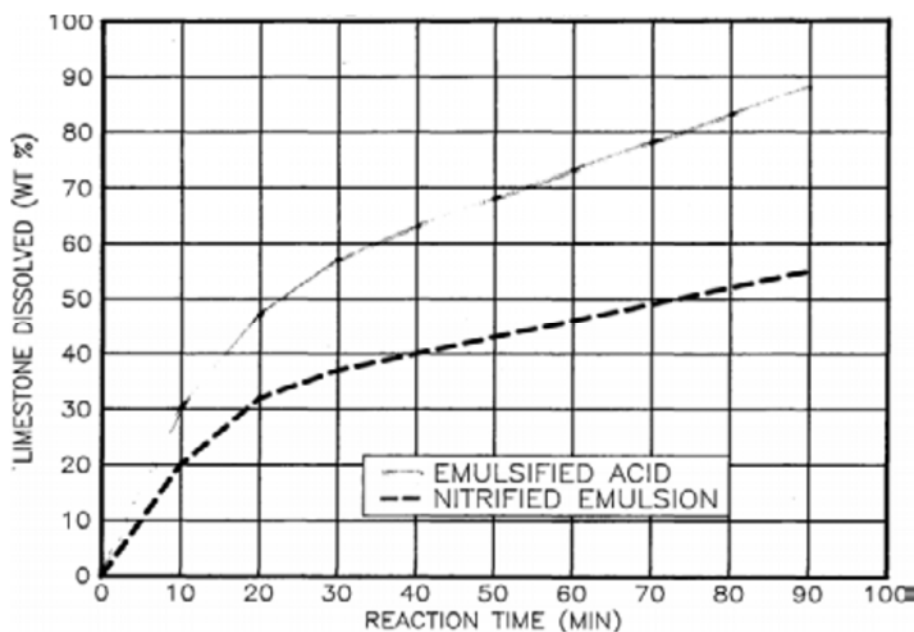
هدف از اسیدکاری، ایجاد کانال‌های جریانی در اطراف چاه است؛ از طرفی قدرت اسیدی بالا، باعث انحلال سطحی بیشتر در سنگ و عدم نفوذ اسید به اعماق بیشتر و ایجاد کانال‌های جریانی می‌شود. بنابراین محققین زیادی به دنبال ماده افزودنی برای کاهش قدرت اسید، بدون کاهش بازده اسیدکاری بوده‌اند. اولین بار،

^۱. Aggour, Al-Muhareb & Abu-Khamsin

^۲. Shukla et al.

^۳. Al-Anazi et al.

ناکس و همکارانش^۱ در سال ۱۹۶۴، عاملی تأخیری 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 تأثیری ندارند. همچنین؛ گوئیدری و همکارانش^۲ در سال ۱۹۸۹ روشی جدید برای اسیدکاری سازند آهکی شعیا - 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 (۱-۳) نشان می‌دهد نیتروژن‌دار کردن سیستم اسیدی، به طور قابل توجهی می‌تواند نرخ واکنش اسید با سنگ آهک را کاهش دهد (به نقل از بصیر و همکاران، ۱۳۹۶).

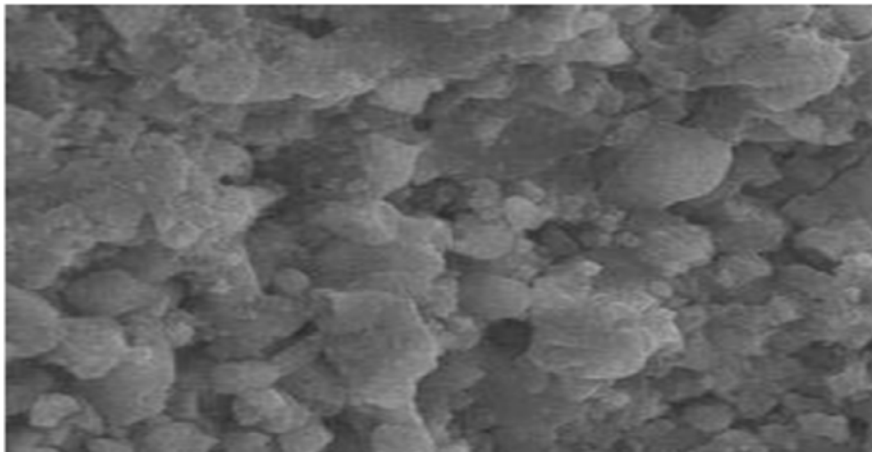


شکل ۱-۳: تأثیر افزودن نیتروژن به سیستم اسیدی (گوئیدری و همکاران، ۱۹۸۹)

¹. Knox et al.
². Guidry et al.

امرو^۱ در سال ۲۰۰۶ میلادی، تأثیر افزودن پلیمر به اسید به عنوان عامل تأخیری جهت کنترل و کند کردن واکنش اسید با نمونه سنگ‌های کربناته مخازن عربستان سعودی را بررسی کرد. دو پلیمر پلی اکریلامید 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، شوری، دما و غلظت اسید برای تشخیص سازگاری اسید با پلیمر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که حضور پلی اکریلامید در اسید، تأثیر 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 تأخیری 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^۲ 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 تأخیری در اسیدکاری استفاده کرد (به نقل از بصیر و همکاران، ۱۳۹۶).

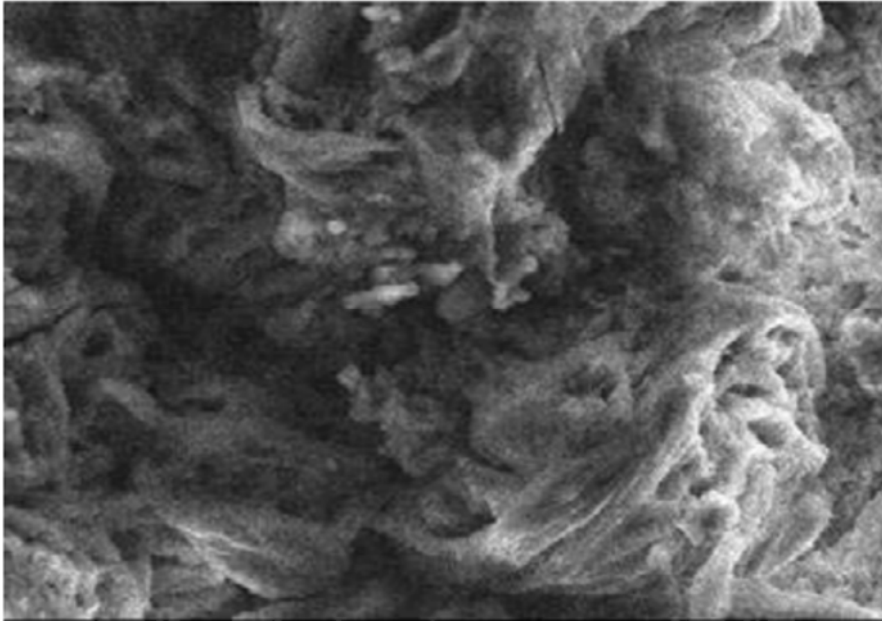
علاوه بر آن، با استفاده از میکروسکوپ اسکن الکترونیکی نمونه سنگ قبل و بعد از اسیدکاری بررسی شد که توصیف دقیق‌تری از تغییرات حاصل از واکنش اسید - پلیمر با سنگ را نشان داد. شکل‌های (۱-۴) و (۱-۵) منافذی از نمونه سنگ قبل و بعد از انجام اسیدکاری توسط زانتان - استیک‌اسید را نشان می‌دهد (امرو، ۲۰۰۶).



شکل ۱-۴: منافذ سنگ قبل از اسیدکاری (امرو، ۲۰۰۶)

^۱. Amro

^۲. Rotating Disk Reactor (RDR)



شکل ۱-۵: منافذ سنگ بعد از اسیدکاری (امرو، ۲۰۰۶)

در شکل (۱-۵)، 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 تأخیر 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 (امرو، ۲۰۰۶).

ربیع و همکارانش در سال ۲۰۱۱ میلادی، 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 (به نقل از بصیر و همکاران، ۱۳۹۶).

ه- استفاده از روش‌های انحراف جریان

هدف از اسیدکاری، ایجاد ارتباط بیشتر بین سازند و دهانه چاه در 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. روش‌های انحراف جریان به دو دسته مکانیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. اگرچه روش‌های مکانیکی بسیار مؤثرند، اما نسبت به روش‌های شیمیایی گران و زمان‌بر بوده و در بعضی موارد مانند چاه‌هایی که به صورت حفره باز تکمیل شده‌اند، کاربردی و مؤثر نیستند. مهمتر این که در روش‌های مکانیکی، جریان اسید از دهانه چاه کنترل می‌شود و درون سازند، کنترلی بر جریان اسید نمی‌توان داشت (چانگ، کیو و نصرالدین^۱، ۲۰۰۷).

النبرگر و آسلتین^۲ در شرکت نفت استاندارد کالیفرنیا در سال ۱۹۷۷ میلادی؛ استفاده از اسیدکاری گزینشی را در لایه‌های کم تراوا گزارش کردند. بیل^۳ در شرکت سعودی آرامکو نیز در سال ۱۹۸۴ میلادی، استفاده از توپک‌های شناور نشت بند را جهت انحراف جریان اسید به نواحی هدف اسیدکاری گزارش کرد (به نقل از بصیر و همکاران، ۱۳۹۶).

روش‌های شیمیایی انحراف جریان شامل استفاده از سیال با ویسکوزیته بالا، مواد افزودنی که بر دیواره حفرات جریانی کیک ایجاد کنند و کف یا ژل جهت کاهش نفوذ اسید در حفرات جریانی است. این کیک باعث ایجاد ضریب پوسته موقت شده و مسیر جریان اسید تزریقی را تغییر می‌دهد (چانگ و همکاران، ۲۰۰۷). کوهن و همکارانش^۴ در سال ۲۰۱۰ میلادی؛ از الیاف جهت ایجاد این خاصیت در اسید استفاده کردند. از اسیدهای ژله‌ای و یا حاوی کف نیز جهت انحراف جریان اسید به نواحی کم تراوا استفاده می‌شود (به نقل از بصیر و همکاران، ۱۳۹۶).

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 تأخیر 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

¹. Chang, Qiu & Nasr-El-Din

². Ellenberger & Aseltine

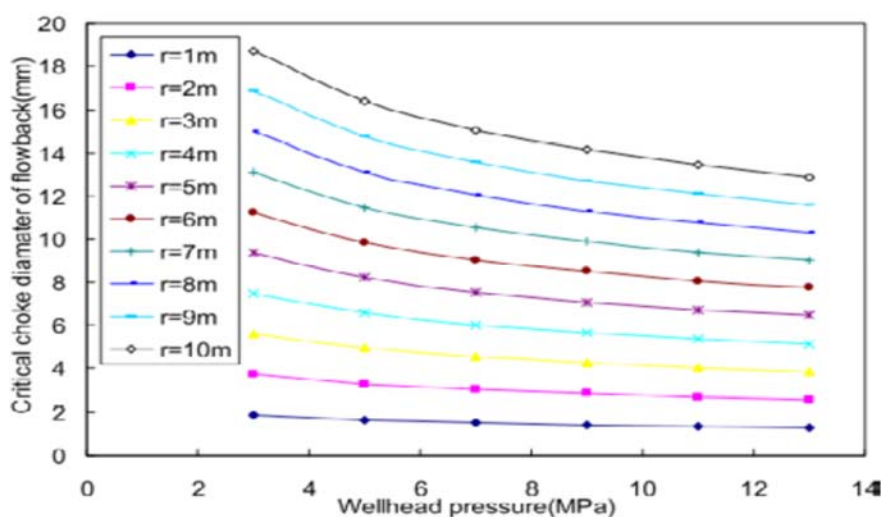
³. Bale

⁴. Cohen et al.

غلظت پلیمر در فاز درونی امولسیون از صفر به ۱/۵ درصد حجمی می‌تواند باعث کاهش اندازه قطرات امولسیون، افزایش ویسکوزیته اسید امولسیونی و افزایش پایداری امولسیون شود. همچنین ویسکوزیته این سیستم اسیدی، با افزایش دما کاهش می‌یابد (به نقل از بصیر و همکاران، ۱۳۹۶).

و- مدل چوک بحرانی

هو و همکارانش^۱ با استفاده از قوانین موازنه مواد و مکانیک سیالات، در سال ۲۰۱۵ میلادی؛ یک مدل چوک بحرانی^۲ برای جریان بازگشتی اسید ارائه کردند. اندازه چوک بحرانی در فشارهای سرچاهی مختلف به کمک آزمایش‌های سرعت بحرانی جریان بازگشتی قابل محاسبه است. این اطلاعات می‌تواند به مهندسین میدانی جهت بهینه‌سازی جریان بازگشتی اسید کمک کند. شکل (۱-۶) نشان می‌دهد در شعاع کاوش^۳ (I) ثابت، با افزایش فشار سرچاهی قطر چوک کاهش می‌یابد. هر چه 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 مهندسین میدانی استفاده شود. در این محاسباتها 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 موردنیاز انتخاب شود.



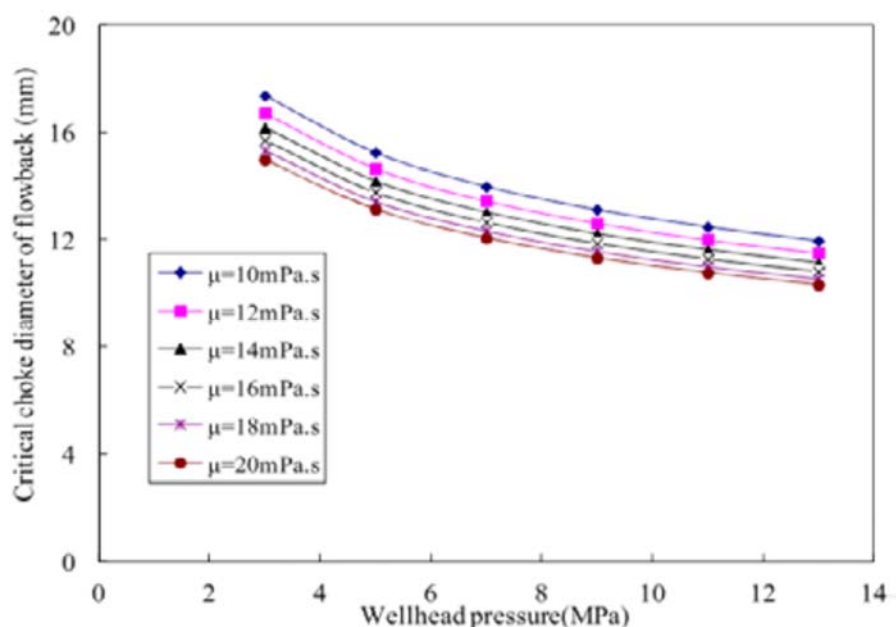
شکل ۱-۶: ارتباط فشار سرچاهی و قطر چوک بحرانی در شعاع‌های کاوش مختلف (هو و همکاران، ۲۰۱۵)

¹. Hu et al.

². Critical Choke Model

³. Radius of Investigation

شکل (۱-۷)؛ چگونگی تأثیر 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 و خطر آسیب سازند، چوک 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 (هو و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۱-۷: ارتباط فشار سرچاهی و قطر چوک بحرانی در ویسکوزیته‌های مختلف اسید (هو و همکاران، ۲۰۱۵)

۱-۳ مخازن شکافدار

مخازن اصلی دنیا از دو قشر سنگ آهک و یا ماسه سنگ تشکیل شده‌اند و از جمله مواردی که در حال حاضر در کشور ما که اغلب مخازن به صورت آهکی هستند؛ وجود مخازن با شکاف‌های مناسب در داخل سرزمین‌های نفتی ایران و وقوع پدیده‌های خاص و گوناگون به علت وجود شکاف‌های افقی و عمودی، همه و همه باعث شده تا در سال‌های اخیر نگاه ویژه‌ای به مخازن شکافدار شود. به طور کلی؛ مخازن شکافدار از جمله مخازن مهمی هستند که مکانیزم‌های فراوانی در آن‌ها رایج است، در حالی که مخزن در حالت استاتیکی قرار دارد و نیز در حالتی که در حالت دینامیکی خود قرار دارد؛ رفتارهای خاصی از مخازن شکافدار سر می‌زند. در هنگام تولید از مخازن شکافدار؛ بسته به شرایط شکاف‌ها و ماتریس‌ها، مناطق متعددی در طول بهره‌برداری در مخازن شکافدار بوجود می‌آید؛ نواحی

همچون کلاهک گازی - ناحیه نفتی - ناحیه آبی، که هر یک از نواحی مذکور خود به نواحی خاصی تقسیم می‌شوند. تفاوت مخازن شکافدار و مخازن معمولی آنچنان زیاد هستند که رفتار یک مخزن شکافدار به ندرت با رفتار یک مخزن معمولی تطابق دارد. این تفاوت‌ها از دو منظر ساختار مخزن و مکانیزم نهایی تولید هیدروکربن در مخزن قابل بررسی است. مهندسين مخزن؛ اغلب درصدد هستند که رفتار آینده مخزن شکافدار را با استفاده از تاریخچه تولید آن مخزن و ارزیابی رفتار آینده آن از طریق روش‌ها و راهکارهای موجود برای مخازن معمولی پیش‌بینی نمایند اما متأسفانه در اکثر مواردی که از طریق محاسبات یک مخزن معمولی بدست می‌آید قابل انطباق بر رفتار گذشته یک مخزن شکافدار نمی‌باشد. تلاش به منظور تولید نفت بیشتر به محققین مختلف اجازه داد تا مخازن پیچیده‌ای نظیر مخازن شکافدار طبیعی را مورد بررسی قرار دهند. پیچیدگی جریان سیال در این نوع مخازن، ناشی از این واقعیت است که دو محیط برای جریان سیال وجود دارد؛ اولی در میان محیط متخلخل است که اصطلاحاً ماتریکس گویند و دیگری جریان در شبکه شکاف است. قلب این پدیده در مسئله فعل و انفعالات موجود بین این دو محیط قرار دارد. در مخازن شکافدار طبیعی؛ ماتریکس به عنوان منبعی عمل می‌کند که هیدروکربن‌ها در آنها وجود دارد در حالی که شکاف‌ها بازیابی این هیدروکربن‌ها را آسان‌تر می‌کند، در فصل آینده در این باره بیشتر توضیح داده شده است (مودت‌نیا، مدنی‌فر و حبیب‌نیا، ۱۳۹۱).

مخزن شکافدار، مخزنی است که در ساختار آن شکستگی یا ترک وجود داشته باشد؛ ضمن این که شکستگی‌ها، شبکه‌ای را ایجاد می‌کنند. این شبکه می‌تواند قسمتی یا کل مخزن باشد. در ساختار این شبکه‌ها، هر یک از سیال‌های درون شبکه، شکاف‌ها از هر نقطه به نقطه دیگر جریان یابد. مثال بارز مخازن شکافدار در ایران به مفهوم کامل آن مخازن نفتی هفتگل، گچساران و آغا‌جاری است. مخازن شکافدار غیر کامل مخازن بی‌بی حکیمه، بینک، مارون و اهواز است. مخازن شکافدار، مرکب از سنگ‌های شکسته با فضای کوچک خالی بین آنهاست و این شکستگی‌ها به صورت منظم و غیرمنظم تشکیل شده‌اند. در این گونه مخازن؛ حفره‌ها و حتی غارها نیز می‌تواند وجود داشته باشد (کرم‌نژاد و کاکائی، ۱۳۹۶).

برخی از مکانیزم‌های تولید در مخازن ترک‌دار با مخازن معمولی متفاوت است که این مکانیزم‌ها عبارتند از: تولید از طریق پدیده همرفت، تولید از طریق پدیده نفوذ، تولید از طریق ریزش تثلی و جذب (آشام) و تولید از طریق فرآیند بلوک به بلوک.

الف- تولید از طریق پدیده همرفت

مطالعه مخازن شکافدار بیانگر وجود مکانیزم همرفت در زمان قبل و بعد از بهره‌برداری از مخزن است. قبل از بهره‌برداری مخزن؛ گرادیان دما و بعد از تولید و بهره‌برداری از مخزن، علاوه بر گرادیان دما، آزاد شدن گاز محلول

در نفت در سطح مشترک نفت و گاز؛ باعث ایجاد گرادیان معکوس چگالی می‌شود که این فرایند باعث فشار اشباع نفت در ناحیه زیر اشباع می‌گردد، در ناحیه گاز زده؛ گاز محلول در نفت درون شکاف‌ها و بلوک‌ها آزاد شده و به علت سبکی به کلاهک گازی انتقال می‌یابد، در نتیجه نفت موجود در شکاف‌های این ناحیه علت از دست دادن گاز محلول سنگین‌تر از نفت موجود در اعماق زیرین در ناحیه زیر اشباع می‌گردد؛ این گرادیان معکوس چگالی که در آن نفت سنگین در بالای نفت سبک قرار دارد؛ یک عامل مهم در جهت بر هم زدن تعادل است که باعث تشکیل سلول‌های همرفتی می‌شود. نتیجه چنین اختلاط همرفتی؛ انتقال نفت سنگین از طریق شکاف‌ها به سمت پایین و قرار گرفتن آن در تماس با بلوک‌های حاوی نفت سبک‌تر است که دارای گاز حل شده بیشتری می‌باشند؛ در نتیجه این تماس، با نفوذ مولکولی گاز داخل بلوک به شکاف (در فاز نفت) صورت می‌گیرد. در طول فرایند؛ نفت داخل شکاف سبک شده و به سمت بالا می‌رود که با کاهش فشار گاز درون آن آزاد می‌شود و به کلاهک گازی می‌پیوندد.

ب- تولید از طریق پدیده نفوذ

معمولاً در مطالعات مربوط به جریان غیرامتزاجی گاز و نفت در یک محیط متخلخل، فرآیند نفوذ در نظر گرفته نمی‌شود. این بدان دلیل است که در یک سیستم بزرگ مانند مخزن، فرآیند نفوذ غیرتعادلی گاز یا گاز محلول در نفت که حاوی حجم متفاوتی از گاز محلول می‌باشد، بسیار طولانی و زمان‌بر است؛ بنابراین می‌توان مشاهده کرد تغییرات ترکیب سیال اغلب بسیار بیشتر از حالتی است که بر اثر پدیده نفوذ در طول یک دوره مشخص از زمان به وقوع می‌پیوندد. از سوی دیگر در مخازن نیمه‌شکافدار تا کاملاً شکافدار که نفت درون شکاف‌های عمودی بر اثر گرادیان دمایی دچار همرفت می‌گردد، فرآیند نفوذ نقش مهمی را بازی می‌کند. در اثر این فرآیند با کاهش فشار مخازن، حجم زیادی از گاز از بلوک ماتریکس و از درون منطقه نفتی به سمت کلاهک گازی جا به جا می‌شود و به عکس؛ با افزایش فشار مخزن، این فرآیند باعث خروج گاز از کلاهک گازی و انتقال آن به بلوک ماتریکس می‌گردد. در مورد اول؛ فشار نقطه حباب نفتی که در بلوک‌های منطقه نفتی قرار دارد بر اثر کاهش فشار مخزن افت می‌یابد. این فرآیند رکود فشار، نقطه حباب نام دارد. در مورد دوم؛ فشار نقطه حباب نفتی که در بلوک‌های ماتریکس منطقه نفتی قرار دارد با افزایش فشار مخزن افزایش می‌یابد که این پدیده، افزایش فشار نقطه حباب نام دارد.

ج- تولید از طریق ریزش ثقلی و جذب (آشام)

در مخازن تولید کننده نفت، ریزش یکی دیگر از مکانیزم‌های مهم تولید می‌باشد. این مکانیزم در مخازن شکافدار نقش مهمی را در بازیابی هیدروکربن از بلوک‌های ماتریکس با نفوذپذیری پایین که دارای ارتفاع مناسبی هستند باز می‌کند. در فرآیند ریزش؛ ثقلی اجباری نرخ تزریق سیال جا به جا کننده پیشایش تعیین شده و به عواملی همچون اختلاف، دانسیته دو سیال، نفوذپذیری سنگ، اختلاف بین سطوح تماس سیال در ماتریکس و شکاف بستگی دارد. اختلاف فشار بر اثر اختلاف دانسیته موجود بین سیال ماتریکس و شکاف به وجود می‌آید. این در حالی است که در ریزش ثقلی آزاد، جا به جایی بستگی به وزن سیال جا به جا شونده دارد که به طور طبیعی به سمت پایین حرکت می‌کند. از تعریف شاده بالا؛ چنین استنباط می‌گردد که برای داشتن تولید از مخزنی با نفوذپذیری یک میلی داری و تحت ریزش آزادانه به زمانی معادل ۱۰۰۰ برابر بیشتر از حالی که می‌خواهیم از همان مخزن ولی با نفوذپذیری یک داری استفاده کنیم نیاز خواهیم داشت (در صورت برابر بودن نفوذپذیری نسبی آن دو مخزن).

د- تولید از طریق فرآیند بلوک به بلوک

به طور تئوری نشان داده شده است که کاهش اشباع فاز مایع جا به جا شونده، طی فرآیند ریزش، به صورت زیر رخ می‌دهد:

جبهه گاز تا زمان رسیدن به عمق گیرکردگی به سرعت به سمت پایین حرکت می‌نماید. بنابراین این فاز جا به جا شونده در قسمت‌های پایینی بلوک سریع‌تر به بخش‌های بالایی منحنی موئینه می‌رسد. در حالتی که اشباع نفت در قسمت بالایی بلوک، پس از کاهش اشباع اولیه به خاطر کاهش نفوذپذیری نسبی نفت به آهستگی شروع به تغییر می‌کند.

بازدهی فرآیند ریزش در اوایل تولید به وسیله شکل منحنی فشار موئینه کنترل می‌گردد، در حالی که تولید طولانی مدت به وسیله منحنی نفوذپذیری نسبی کنترل می‌گردد.

هنگامی که فشار موئینه در یک بلوک در حال تخلیه به طور ناگهانی کاهش یابد، جبهه گازی به خاطر اشباع بالای نفت بین دو ناحیه گیرکردگی به سرعت به پروفایل جدید اشباع نفت نزدیک می‌گردد. به هر جهت بخش عظیمی از نفت اضافی قابل بازیافت، که از قسمت بالایی بلوک می‌آید به دلیل نفوذپذیری نسبی کم‌تر نسبت به وقتی که فشار موئینه کاهش نیافته بود با دبی خیلی کمتری تولید می‌گردد (سعیدی، ۲۰۱۹؛ ترجمه مقصودی اکبری و کیماز، ۱۳۹۸).

۱-۳-۱ مقایسه مخازن معمولی و مخازن شکافدار

پس از بررسی ویژگی‌های مخازن شکافدار از لحاظ ساختار و مکانیزم‌های تولید؛ در این بخش به مقایسه این دو مخزن می‌پردازیم. چون در این قسمت پژوهش، نگاه ویژه‌ای به مخازن شکافدار داریم، بنابراین از این منظر مقایسه را انجام می‌دهیم. وجود شکستگی در مخازن شکافدار نسبت به مخازن معمولی (فاقد شکست) دارای ویژگی‌های زیر است:

- فرآیند ریزش ثقلی در مخازن شکافدار در مقایسه با مخازن معمولی سرعت نسبی بالاتری دارد که دلیل این امر آن است که نفوذپذیری بسیار پایین‌تر سنگ مخزن در مقایسه با نفوذپذیری شکاف‌ها موجب می‌شود که سطح گاز و نفت در شکاف‌ها، پایین‌تر از سطح آب گاز در بلوک‌های ماتریسی نفتی قرار گیرد. به ترتیبی مشابه می‌توان گفت که سطح آب و نفت در شکاف‌ها از سطح آب و نفت در بلوک‌های ماتریکی بالاتر است.
- در سیستم مخازن شکافدار، نفت تولید شده از سنگ مخزن در فاصله دورتری از چاه‌های تولیدی به دست می‌آیند؛ لذا به دلیل بهره‌برداری بالا در مخازن شکافدار، فاصله چاه‌های تولیدی از یکدیگر به مراتب بیش از فاصله چاه‌های مخازن معمولی است.

- وجود شکاف‌ها به تفکیک گاز یا آب از نفت کمک می‌کند، این امر باعث می‌شود که میزان گاز اضافی یا آب اضافی قبل تولید در ستون نفت کمتر شده و بدین ترتیب انرژی مخزن با بازدهی بیشتری حفظ شود.

- در فرآیند همرفت در مخازن شکافدار موجب ایجاد نفت اشباع شده در ستون نفتی می‌شود، حتی هنگامی که فشار مخزن به پایین‌تر از نقطه اشباع برسد، این فرآیند را اصطلاحاً کاهش فشار نقطه اشباع می‌نامند؛ در نتیجه تا وقتی که عملاً گازی در مخزن تزریق نمی‌شود، آثار ریزش ثقلی افزایش می‌یابد؛ در غیر این صورت گاز ایجاد شده درون سنگ، نفوذپذیری سنگ را کاهش می‌دهد.

- وجود شکاف‌ها باعث یکنواخت‌تر شدن فشار آب، گاز یا نفت در مخازن شکافدار می‌شود، لذا سطوح آب، گاز و نفت یکنواخت‌تر خواهند شد.

- فرآیند فشار^۱ گاز در گاز یا نفت در نفت، موجب به تعادل رسیدن ترمودینامیکی هر چه سریع‌تر سیالات موجود در مخزن می‌شود؛ به همین دلیل است که جریان شبیه‌سازی این مخازن، فرآیندهای همرفت - انتشار را نمی‌توان نادیده گرفت (کرم‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۶).

پس در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که؛ مکانیزم گوناگون تولید که در مخازن شکافدار طبیعی وجود دارند باعث ایجاد انواع گوناگونی از تولید در این نوع از مخازن می‌گردد. تجربه‌های عملی نشان‌دهنده این مطلب هستند که در بیش از ۹۰ درصد از چاهایی که در یک مخزن شکافدار طبیعی حفره شده‌اند، میزان بازیافت نفت بسیار کم‌تر

^۱. Diffusion

از چاه‌هایی است که در مخازن معمولی حفاری گردیده‌اند؛ زیرا شکاف‌ها باعث جریان یافتن گاز با سرعت بالاتری به سمت چاه شده و بنابراین با کاهش مقدار گاز قابل حرکت در مخزن، جریان نفت کاهش می‌یابد؛ از طرف دیگر وجود شکاف‌ها باعث جریان یافتن گاز به سمت بالا و تشکیل یک کلاهک گازی ثانویه می‌گردد (جداسازی ثقلی)، و بنابراین بازیافت در مقایسه با مخازن معمولی افزایش می‌یابد؛ همچنین می‌توان گفت که مکانیزم‌های همرفت و نفوذ در تمام مخازن شکافدار طبیعی وجود دارند، همرفت به مانند یک همزن در مخزن شکافدار عمل می‌نماید و نفوذ باعث تولید همرفت می‌گردد.

۱-۳-۲ معایب مخازن شکافدار

مخازن شکافدار علاوه بر این که برتری‌هایی نسبت به مخازن معمولی دارند، دارای یک سری معایب نیز هستند، در زیر به بعضی از آن‌ها اشاره می‌کنیم:

- وجود شکستگی‌های افقی باز یا بسته، تأثیر ریزش ثقلی بین گاز و نفت یا نفت و آب را در مقایسه با مخازن معمولی کاهش می‌دهد. این امر در مقایسه با مخازن معمولی نشان می‌دهد که بازیافت نفت با یک ضخامت نفتی مساوی از یک بلوک نفتی در مخزن شکافدار بازیافتی کمتر از مخازن معمولی پیوسته دارد. این امر به دلیل وجود ارتفاع ناحیه نگه‌دارنده و خصوصیات موئینگی سنگ مخزن است. در واقع در مخازن شکافدار؛ ضخامت کل سنگ مخزن در جهت عمودی به قطعات یا بلوک‌های جدا از هم تقسیم می‌شود. این بلوک‌ها به طور مشابه یا با خصوصیات متفاوت تکرار می‌شوند؛ در صورتی که در مخزن معمولی در وضعیت فوق، این گونه قطعات جدا از هم وجود ندارد؛ لذا میزان نفت قابل استحصال در مخازن معمولی بیش از مخازن شکافدار بوده، در حالی که سرعت استحصال نفت در مخازن شکافدار نسبت به مخازن معمولی در شرایط مساوی و بالاتر است. بعضی از افراد به دلیل عدم شناخت مکانیزم بازیافت نفت در مخازن شکافدار؛ استنباط نادرستی دارند، تصور می‌شود که در مخازن شکافدار همواره یک فشار موئینه درون بافتی وجود دارد. تولید از مخازن شکافدار در کشورهای مختلف نشان می‌دهد که در بهره‌برداری دراز مدت از آن‌ها، فرآیند موئینگی پیوسته در این گونه مخازن قابل توجیه نیست.

- کاربرد روش امتزاجی جهت بالا بردن ضرایب بازیافت نفت در مخازن شکافدار مستلزم استفاده از حجم زیادی کندانسه است؛ که این امر از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند جا به جایی نفت از طریق گاز یا آب در مخازن شکافدار و معمولی مشابه یکدیگر است؛ با این تفاوت که، بازیافت نفت در مخازن شکافدار به دلیل شکستگی سنگ مخزن و کوتاه شدن بلوک‌های ماتریکسی، کم‌تر از مخازن معمولی است (مودت‌نیا و همکاران، ۱۳۹۱).

فصل دوم:

اسیدکاری مخازن سگافدار

۲-۱ مقدمه

اسیدکاری ماتریکس یکی از قدیمی‌ترین تکنیک‌های تحریک چاه است که برای از بین بردن آسیب در اطراف چاه استفاده می‌شود. در ابتدا در مخازن کربناته اعمال می‌شد و طی سالیان متمادی به کانی‌شناسی‌های پیچیده‌تری گسترش یافته است. تاکنون، اسید کاری ماتریس معمولاً برای بسیاری از سازندها به دلیل داشتن ماهیت ناهمگن مواد معدنی تشکیل‌دهنده و درجه قابل ملاحظه‌ای از غیرقابل پیش بینی بودن پاسخ آن‌ها به فرمولاسیون اسید، بسیار ریسک‌پذیر است. با این حال، این یک روش تحریک نسبتاً ساده است که به یکی از مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها برای بهبود چشمگیر بهره‌وری چاه و از این رو بازیابی هیدروکربن‌ها تبدیل شده است (گومز^۱، ۲۰۱۶).

در حین عملیات اسیدکاری ماتریس، اسید در فشارهای زیر فشار شکست سازند تزریق می‌شود تا از ایجاد شکست در طول تحریک و از نفوذپذیری در اطراف چاه به جای تأثیرگذاری بر مخزن تا حد زیادی جلوگیری شود. اسید چند اینچ اطراف چاه در ماسه سنگ‌ها و چند فوت در کربنات‌ها واکنش نشان می‌دهد. در سازندهای ماسه‌سنگی، اسیدکاری ماتریس ممکن است با از بین بردن آسیب اطراف چاه، در درجه اول با وصل کردن منافذ بسته شده توسط ذرات سیلیسی به عنوان نتیجه‌ی حفاری، تکمیل چاه، تحریک، مشبک کاری و عملیات تولید، عملکرد چاه را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. بنابراین، می‌توان نفوذپذیری طبیعی اطراف چاه را احیا کرد. مهمترین مواد معدنی محلول در هیدروکلریداسید، کلسیت، دولومیت و سیدریت هستند که علاوه بر این باعث ایجاد رسوب نمی‌شوند (داموتا و دوس سانتوس^۲، ۲۰۱۱).

هدف نهایی از توسعه میدان‌های بزرگ، به حداکثر رساندن اقتصادی برای بازیابی هیدروکربن‌ها است. برای انجام این کار، باید مشخصات جریان بهینه تولید را که پوسته کم و یکنواخت در کل بازه تولید می‌کند، هدف قرار دهیم. ضریب پوسته به دست آمده تأثیر مستقیمی بر بهره‌وری چاه دارد. میزان تأثیر ضریب پوسته بر بهره‌وری و تزریق‌پذیری کلی اساساً به هندسه دهانه چاه نسبت به مخزن بستگی دارد. علاوه بر این، به دست آوردن یک ضریب پوسته در محدوده ۱- تا ۲- نمی‌تواند برای اسیدکاری کربناته موفقیت‌آمیز باشد. ضریب پوسته به ترتیب ۳- تا ۴- حفره‌های گرمی به ترتیب با طول ۱۰ تا ۲۰ فوت قابل دستیابی هستند. توجه به این نکته مهم است که رابطه بین ضریب پوسته و شاخص بهره‌وری، خطی نیست (فورویی، برتون و بورخید^۳، ۲۰۱۲).

¹. Gomez

². Da Motta & dos Santos

³. Furui, Burton & Burkhead

سه اصل هنگام انجام عملیات اسیدکاری نیاز است به آن توجه ویژه شود:

۱. همه محلول‌هایی که قرار است تزریق شوند باید آزمایش شده تا اطمینان حاصل شود که مطابق با فرمولاسیون‌های طراحی هستند؛

۲. همه مراحل لازم باید انجام شوند تا آسیب ایجاد شده توسط خود فرآیند اسیدکاری حداقل شود.

۳. فرآیند اسیدکاری باید به وسیله اندازه‌گیری فشار و دبی (سر چاه و یا ته چاه) کنترل شود (ژو، هیل و داموتا، ۱۹۹۸؛ عبدالمهی و شهبازی، ۱۳۹۹).

قبل از این که اسیدکاری انجام شود باید شواهد مشخص وجود داشته باشد که نشان دهد حداقل بخشی از بهره‌دهی کم چاه ناشی از آسیب سازند قابل حل در اسید است. این را می‌توان با یک آزمایش گذار فشار^۲ قبل از عملیات برای تعیین ضریب پوسته، تعیین منابع احتمالی دیگر پوسته و ارزیابی منبع آسیب سازند تعیین کرد. نمودار نگار تولیدی قبل از تحریک نیز در بعضی موارد در برنامه‌ریزی عملیات و به عنوان مبنایی برای آنالیز بعد از عملیات یاری دهنده می‌باشد (پاکالونی، تامبینی و گالوپینی^۳، ۱۹۹۸؛ به نقل از عبدالمهی و همکاران، ۱۳۹۹).

۲-۲ آزمایشات لازم به منظور عملیات اسیدکاری

الف) آزمایش تزریق‌پذیری سازند

همیشه قبل از انجام عملیات اسید کاری، آزمایش تزریق‌پذیری به کمک سیال‌های بی‌ضرری مانند گازوییل و غیره انجام می‌شود تا میزان تزریق‌پذیری سازند و اصول امکان انجام عملیات اسید کاری را بسنجند.

ب) آزمایش مغزه

پیش از عملیات اسید کاری برای مشخص کردن رسوبات واکنش اسید با سنگ سازند باید ابتدا تأثیر مستقیم اسید بر سنگ سازند مشاهده شود تا بتوان غلظت و نوع اسید مناسب هر سنگ را مشخص کرد که این کار به کمک آزمایش مغزه^۴ انجام می‌شود.

ج) آزمایش بطری

آزمایش بطری^۵ به منظور تعیین و مشاهده تأثیر اسید تزریقی بر روی نفت سازند انجام می‌شود که در این آزمایش، اسید را در تماس مستقیم نفت سازندی قرار می‌دهیم و امکان ایجاد رسوبات لجنی، آسفالتینی و یا امولسیون‌های چند فازی بررسی می‌شود (عبدالمهی و همکاران، ۱۳۹۹).

1. Zhu, Hill, & da Motta

2. Pressure Transient Test

3. Pacaloni, Tambini & Galoppini

4. Core Test

5. Bottle Test

۲-۳ عوامل رقابتی مؤثر در طراحی عملیات اسیدکاری

طراحی حجم اسید بهینه به وسیله اثرات فاکتورهای رقابتی پیچیده تعیین می‌شود. حجم اسید مورد نیاز شدیداً به عمق ناحیه آسیب‌دیده بستگی دارد و خود این عمق نیز به ندرت به طور دقیق شناخته می‌شود. با مشخص بودن عمق ناحیه آسیب‌دیده، حجم بهینه برای یک محل خاص در چاه بر اساس منحنی عملکرد اسید آزمایشگاهی با یک مدل اسیدکاری انتخاب می‌شود. چنین آنالیزی می‌تواند کمترین حجم اسید پیشنهادی مانند ۲۵ گالن در هر فوت یا ۵۰ گالن در هر فوت ضخامت سازند را نتیجه دهد. اما به طور کلی اسید به طور مساوی در همه قسمت‌های سازند توزیع نمی‌شود. برای اطمینان از این که اسید به مقدار کافی با سطح سازند تماس می‌یابد ممکن است عمدتاً با توجه به روش‌های به کار رفته برای قرارگیری مناسب اسید، حجم اسید بیشتری لازم باشد (ژو، هیل و داموتا، ۱۹۹۸؛ عبدالهی و شهبازی، ۱۳۹۹).

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تزریق زیر سرعت بهینه می‌تواند بسیار مضر باشد. این می‌تواند چندین برابر به اسید بیشتری نیاز داشته باشد تا کرم چاله با طول خاص ایجاد شود و حتی ممکن است ضریب پوسته‌نهایی که قابل دستیابی است را محدود کند. شرایط اسیدکاری تأثیر زیادی بر عملکرد کلی دارد زیرا بر ساختار کرم چاله تأثیر می‌گذارد. با تزریق اسید به روشی که باعث ایجاد الگوی انحلال نامطلوب می‌شود، دستیابی به نفوذ عمیق کرم چاله و با استفاده از ضریب پوسته پایین، برای کلیه اهداف عملی امکان‌پذیر نیست. میزان تزریق غالباً با استفاده از روش قرارگیری یا مخزن محدود می‌شود؛ که اگر میزان تزریق بیش از حد زیاد باشد، فشار می‌تواند به شکست مخزن منجر شود و جلوگیری از کرم چاله حتی اگر بتوان شرایط ایده‌آل کرم چاله را برآورده کرد، چالش بعدی دستیابی به این شرایط در کل بازه درمانی است. این مشکل به دلیل ناهمگنی، گسل‌زدایی و سازندهای شکاف‌دار موجود در مخزن پیچیده می‌شود. اسید به صورت ترجیحی به مناطقی با نفوذپذیری زیاد وارد می‌شود. این باعث می‌شود اسید کمتری به مناطق نفوذپذیری پایین وارد شود. نرخ جریان پایین‌تر، الگوهای انحلال نامطلوب را ایجاد می‌کند و به همین دلیل ممکن است چنین کرم چاله در جایی که مورد نیاز است تشکیل نشود. این مشکل می‌تواند با فشار بیش از حد مخازن یا مدت زمان طولانی بیش از حد درمان اسیدکاری پیچیده شود. برای حل این مسئله می‌توان از تکنیک‌های انحرافی استفاده کرد (شرلی، ژو، هیل و داموتا، ۲۰۱۸).

^۱. Shirley, Zhu, Hill & Da Motta

۲-۴ اصلاح قدرت اسید

به طور معمول اولین جنبه‌ای که به نظر می‌رسد اصلاح شود، قدرت اسید است. محققانی که تأثیر غلظت اسید یا نوع آن را با استفاده از تست سیلابزنی مغزه بررسی کرده‌اند، به طور کلی نتیجه گرفته‌اند که اسیدهای با غلظت کمتر می‌توانند منجر به نفوذ عمیق‌تر شوند و برای موارد با نرخ تزریق محدود مناسب‌تر هستند در حالی که اسیدهای با غلظت بالاتر به اسید کمتری نیاز دارند، هزینه و زمان تزریق را کاهش می‌دهند (شرلی و همکاران، ۲۰۱۸).

تغییر غلظت یا نوع اسید می‌تواند منجر به بهبود قابل توجهی در نتایج درمانی با هزینه کم نسبت به تغییر کل روش قرارگیری شود. از این رو نتیجه گرفته می‌شود که ابتدا باید ارزان‌ترین روش جابجایی در نظر گرفته شود و در صورت تغییر در یک روش کلی می‌تواند باعث بهبودی در درمان شد. برای تعیین شرایط بهینه اسید، باید آزمایشات سیلاب زنی هسته با قدرت اسیدهای مختلف را انجام داده و شبیه سازی‌های مربوط به درمان‌های اسیدی را انجام داده و ضریب نهایی پوسته مورد انتظار را با یکدیگر مقایسه نمود (همان منبع).

همچنین؛ برنامه پمپ شامل نرخ تزریق اسید، تعداد مراحل و مقادیر عامل انحراف بین مراحل در صورت وجود است. یکی از راه‌های بهبود تحریک با تغییر برنامه پمپ، تغییر نرخ تزریق به منظور حفظ شار تقریباً بهینه در طول درمان است. هر چه طول کرم چاله بیشتر باشد، مقدار ضریب پوسته کمتر شده و در واقع اسیدکاری مؤثرتر است. 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 کرم چاله می‌شود، بنابراین باید یک دبی بهینه انتخاب شود. این دبی بهینه به عواملی مانند جنس کانی‌ها، غلظت اسید و دمای واکنش بستگی دارد. راه دیگر که تغییر برنامه پمپ می‌تواند در به دست آوردن مشخصات بهتر پوسته کمک کند استفاده از منحرف کننده است. منحرف کننده می‌تواند شیمیایی یا مکانیکی باشد (وانگ، هیل و اسکتچر^۱، ۲۰۱۳).

۲-۵ اسیدکاری مخازن کربناته شکافدار

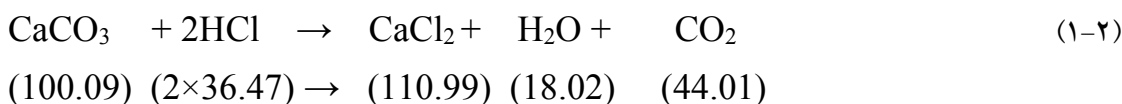
سنگ‌های کربناته به سنگ‌هایی گفته می‌شود که حاوی بیش از ۵۰ درصد کانی‌های کربناته باشند. تخمین‌ها نشان می‌دهد به بیش از ۶۰ درصد نفت جهان و بیش از ۴۰ درصد گاز جهان در مخازن کربناته قرار دارد. این نسبت در غرب آسیا کمی متفاوت است. حدود ۷۰ درصد مخازن نفتی و حدود ۹۰ درصد مخازن گازی این منطقه از نوع کربناته است (اسکلومبرگر^۲، ۲۰۰۷؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

1. Wang, Hill & Schechter

2. Schlumberger

معمولاً برای اسیدکاری سنگ‌های کربناته از هیدروکلریک اسید استفاده می‌شود که با کانی‌های کربناته به خوبی واکنش می‌دهد و از طرفی در مقادیر بسیار زیاد با قیمت کم در دسترس است. در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه فارنهایت (۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) برای جلوگیری از خوردگی می‌توان به جای آن از اسیدهای آلی استفاده کرد (زارعیان و همکاران، ۱۳۹۰).

سازندهای کربناته‌ای که پاسخ خوبی در اسیدکاری از خود نشان داده‌اند عبارتند از: (۱) سنگ آهک، (۲) دولومیت، (۳) سنگ آهک دولومیتی و (۴) دولومیت آهکی. دو نوع آخر دارای سنگ آهک (کربنات کلسیم)؛ منیزیم کربنات و دولومیت به نسبت‌های متفاوت هستند. معادله شیمیایی واکنش بین هیدروکلریک اسید و سنگ آهک به صورت زیر است:



اعداد زیر فرمول‌های شیمیایی وزن مولکولی ترکیبات را بیان می‌کند. بنابراین ۷۳ پوند هیدروکلریک اسید با ۱۰۰ پوند کربنات کلسیم واکنش می‌دهد و ۱۱۰ پوند کلرید کلسیم، ۱۸ پوند آب و ۴۴ پوند دی‌اکسید کربن تشکیل می‌شود. اسید تجاری موجود معمولاً با آب رقیق شده و غظت آن ۳۵ درصد وزنی است. رایج‌ترین غلظت اسید مورد استفاده ۱۵ درصد است اما از ۳ تا ۳۲ درصد برای تحریک چاه‌های مختلف استفاده می‌شود. هیدروکلریک اسید دارای وزن مخصوص ۱/۰۷۵ در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. در ۱۰۰۰ گالن از هیدروکلریک اسید ۱۵ درصد وزنی، ۱۳۴۴/۸ پوند هیدروکلریک اسید وجود دارد:

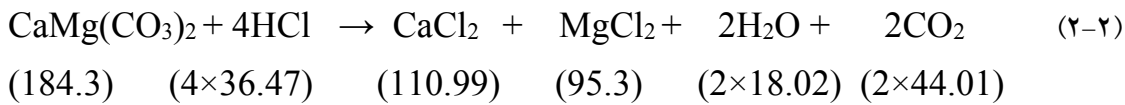
$$(1000 \times 8.34 \times 1.057 \times 0.015 = 1344.8)$$

این حجم از اسید می‌تواند با ۱۸۴۲/۲ پوند سنگ آهک واکنش دهد.

$$\left(\frac{184.3}{146}\right) \times 1344.8 = 1842.2$$

با فرض این که میانگین چگالی سنگ آهک ۱۷۰ پوند بر فوت مکعب است، ۱۰/۸۴ فوت مکعب از سنگ آهک توسط اسید حل خواهد شد.

واکنش بین هیدروکلریک اسید و دولومیت شبیه واکنش با سنگ آهک است با این تفاوت که نمک کلرید منیزیم نیز طبق فرمول زیر تشکیل می‌شود:



محصولات واکنش یا محلول در آب و یا گازی هستند.

هیدروکلریک اسید دارای بیشترین قدرت حل کنندگی سازندهای کربناته است و پس از آن اسید فرمیک و اسید استیک قرار دارند. از آنجا که در مخازن کربناته در شرایط مخزن، اسیدهای آلی به طور کامل به سنگ آهک و دولومیت واکنش نمی‌دهند، یک حجم معین از اسید، مقدار کمتری از آنچه معادلات نشان می‌دهند سنگ را در خود حل می‌کند. برای تعیین حجم دقیق اسید مورد نیاز، می‌توان از جدول زیر استفاده کرد که در آن بخشی از اسید که قبل از رسیدن به تعادل شیمیایی واکنش می‌دهد ارائه شده است. این مقادیر در شرایط واکنش یعنی دما و فشار مخزن و غلظت اسید ارائه شده است. قدرت حل کنندگی اسید به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{M_m S_m}{M_a S_a} \quad (3-2)$$

که در آن:

M_m : وزن مولکولی مواد معدنی (کانی)؛

S_m : وزن مخصوص کانی؛

M_a : وزن مولکولی اسید؛

S_a : وزن مخصوص اسید؛ می‌باشد.

در جدول (۱-۲)، قدرت حل کنندگی اسیدهای مختلف ارائه شده است که در آن β_{100} و χ به صورت

زیر تعریف می‌شوند:

$$\beta_{100} = \frac{\text{سنگ توده‌ای حل شده}}{\text{واکنش اسید خالص جرمی}} \quad (4-2)$$

$$\chi = \frac{\text{حجم سنگ حل شده}}{\text{واکنش محلول اسید حجمی}} \quad (5-2)$$

برای سنگ آهک خالص و هیدروکلریک اسید ۱۰۰ درصد، قدرت حل کنندگی برابر است با:

$$\beta_{100} = 100.09 \times \frac{1}{36.47 \times 2} = 1.37$$

(وزن سنگ حل شده تقسیم بر اسید واکنش داده)؛

جدول ۱-۲: قدرت حل کنندگی اسیدهای مختلف (هاشمی زاده، ۱۳۹۶)

χ						
۳۰ درصد	۱۵ درصد	۱۰ درصد	۵ درصد	β_{100}		
۰/۱۷۵	۰/۰۸۲	۰/۰۵۳	۰/۰۲۶	۱/۳۷	هیدروکلریک	سنگ آهک
۰/۱۲۹	۰/۰۶۲	۰/۰۴۱	۰/۰۲۰	۱/۰۹	فرمیک	
۰/۰۹۶	۰/۰۴۷	۰/۰۳۱	۰/۰۱۶	۰/۸۳	استیک	
۰/۱۵۲	۰/۰۷۱	۰/۰۴۹	۰/۰۲۳	۱/۲۷	هیدروکلریک	دولومیت
۰/۱۱۲	۰/۰۵۴	۰/۰۳۶	۰/۰۱۸	۱/۰۰	فرمیک	
۰/۰۸۳	۰/۰۴۱	۰/۰۲۷	۰/۰۱۴	۰/۷۷	استیک	

برای سنگ آهک خالص و هیدروکلریک اسید ۱۵ درصد وزنی، قدرت حل کنندگی برابر است با:

$$\beta_{15} = \beta_{15} \times 0.15 = 0.206$$

اگر بخواهیم قدرت حل کنندگی اسید را بر حسب حجم سنگ حل شده به ازای حجم اسید واکنش داده بیان کنیم، خواهیم داشت:

$$\chi = \frac{(\beta \times \text{وزن مخصوص اسید})}{\text{وزن مخصوص کربناته}} \quad (۶-۲)$$

به عنوان مثال برای هیدروکلریک اسید ۱۵ درصد وزنی (با چگالی ۱/۰۷) و سنگ آهک خالص (با چگالی ۲/۷۱) داریم:

$$\chi_{15} = 1.07 \times \frac{0.206}{2.71} = 0.082$$

(حجم سنگ آهک حل شده بر حجم اسید واکنش داده)

لازم به ذکر است تخلخل سنگ در این محاسبات منظور نشده است. همچنین از آنجا که اسیدهای آلی به طور کامل واکنش نمی‌دهند، اسید کمتر از آنچه در جدول ارائه شد حل خواهد شد.

واکنش بین اسید و سنگ کربناته تحت تأثیر عواملی چون جریان، پراکندگی در مقیاس داری، انتقال جرم بین فازی و واکنش در مقیاس منفذ می‌باشد. به محض تزریق اسید به سنگ مخزن، اسید جزء انحلال‌پذیر سنگ را حل می‌کند و باعث افزایش تخلخل مخزن می‌شود. با در نظر گرفتن ناهمگنی در تراوایی و تخلخل مخزن، سیال بیشتر به نواحی با تراوایی بالاتر جریان می‌یابد و موجب ناپایداری در جبهه واکنش می‌شود.

در نتیجه با توجه به نرخ تزریق، انواع متفاوتی از ساختارهای انحلال به وجود می‌آید. به عنوان مثال در نرخ‌های تزریق پایین، جبهه واکنش باریک می‌شود و انحلال جبهه‌ای رخ می‌دهد. در حالی که در نرخ‌های تزریق بالا، انحلال یکنواخت به وجود می‌آید. در نرخ‌های تزریق میانی که جابه‌جایی و پراکندگی محوری از لحاظ مقدار در یک اندازه می‌باشند امکان ایجاد مجاری به نام مجرای مارپیچ وجود دارد. مجاری مارپیچ به عنوان مؤثرترین ساختار برای افزایش تراوایی مخزن شناخته شده‌اند (حکیم الهی، ۱۳۹۱؛ به نقل از هاشمی‌زاده، ۱۳۹۶).

اسیدکاری سنگ آهک ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در سنگ با نام سوراخ کرمی می‌کند. موفقیت اسیدکاری سازندهای کربناته کاملاً به ایجاد سوراخ‌های کرمی شکل طولی که بتوانند ناحیه آسیب دیده را تحت پوشش قرار دهند بستگی دارد. در این اواخر کارهای زیادی برای درک بهتر و آنالیز سوراخ‌های کرمی شکل صورت پذیرفته که نتیجه این مطالعات ارائه مدل‌ها و معیارهای مختلف برای طراحی و بهینه‌سازی اسیدکاری سازندهای کربناته است. در بسیاری از مطالعات انجام شده وجود یک نرخ تزریق بهینه تأیید شده است (قله، ۱۳۹۸).

اصول کلی این روش همانند لایه شکافی پروپانتی (در این روش پس از انجام بررسی‌های ضروری بر روی سازند مورد نظر، ابتدا با اعمال فشار مناسب، سیالی با ویسکوزیته کم جهت ایجاد شکاف و گسترش آن به داخل چاه پمپاژ می‌شود. پس از تزریق این سیال، سیال اصلی که ویسکوزیته آن به مراتب از ویسکوزیته سیال پیشین بیشتر است به همراه پروپانت به داخل چاه تزریق می‌شود. سیال اصلی باعث افزایش پهنای شکاف و گسترش آن می‌شود. علاوه بر این، پروپانت موجود در آن از بسته شدن شکاف در اثر فشار لایه‌های فوقانی و جانبی جلوگیری می‌کند. پس از تزریق تمام سیالات، ماده رقیق‌کننده موجود در سیال اصلی باعث کاهش ویسکوزیته و خروج آن می‌شود. بدین ترتیب کانالی با قابلیت هدایت بالا جهت جریان نفت باقی می‌ماند. به طور معمول از این روش در سازندهای با پلاستیسیته بالا، مانند ماسه‌سنگ‌ها استفاده می‌شود. برای موفقیت فرآیند شکافت هیدرولیکی پارامترهایی نظیر وضعیت میدان‌های تنش منطقه، نوع سیال، پروپانت، نوع دانه‌بندی و غلظت آن،

فشار و میزان نرخ تزریق از موارد کلیدی هستند (چینگ^۱، ۱۹۹۷؛ به نقل از میرعباسی، حسینی و خامه‌چی، ۱۳۹۱)) است. تفاوت اصلی این روش‌ها در سیال مورد استفاده و همچنین نوع سازند است. سازندهایی مانند سنگ آهک، دولومیت و سنگ گچ (سنگ آهک نرم و با تخلخل بیشتر) با اسید واکنش می‌دهند و آب، نمک‌های قابل حل در آب و دی‌اکسید کربن تولید می‌کنند. اسید ضمن تیزاب‌کاری دیواره شکاف‌ها، سنگ غیرقابل حل در آب را به نمک بسیار حلال و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌کند. زمانی که پمپ کردن متوقف می‌شود، فشار به مقدار اولیه کاهش می‌یابد. اگر الگوی واکنشی کنواخت باشد، سطوح شکاف به آرامی بسته شده و هیچ‌گونه قابلیت هدایتی باقی نخواهد ماند. تفاوت ترکیب کانی‌های سنگ و الگوهای نامنظم جریان، تیزاب‌کاری غیریکنواخت را به وجود آورده که منجر به بازماندن برخی از بخش‌های حل شده می‌شوند. از این رو در لایه شکافی با اسید، قابلیت هدایت ناشی از حل‌کنندگی اسید و در لایه شکافی پروپانتی ناشی از پروپانت است (مایکل^۲، ۱۹۸۹؛ به نقل از میرعباسی و همکاران، ۱۳۹۱).

در برخی موارد به ویژه در سازندهای کربناته، می‌توان از هر دو عملیات شکافت هیدرولیکی و شکافت اسیدی استفاده کرد که هر کدام برای دستیابی به سطحی از بهبود تولید، دارای مزایا و معایب خاص خود هستند (همان منبع).

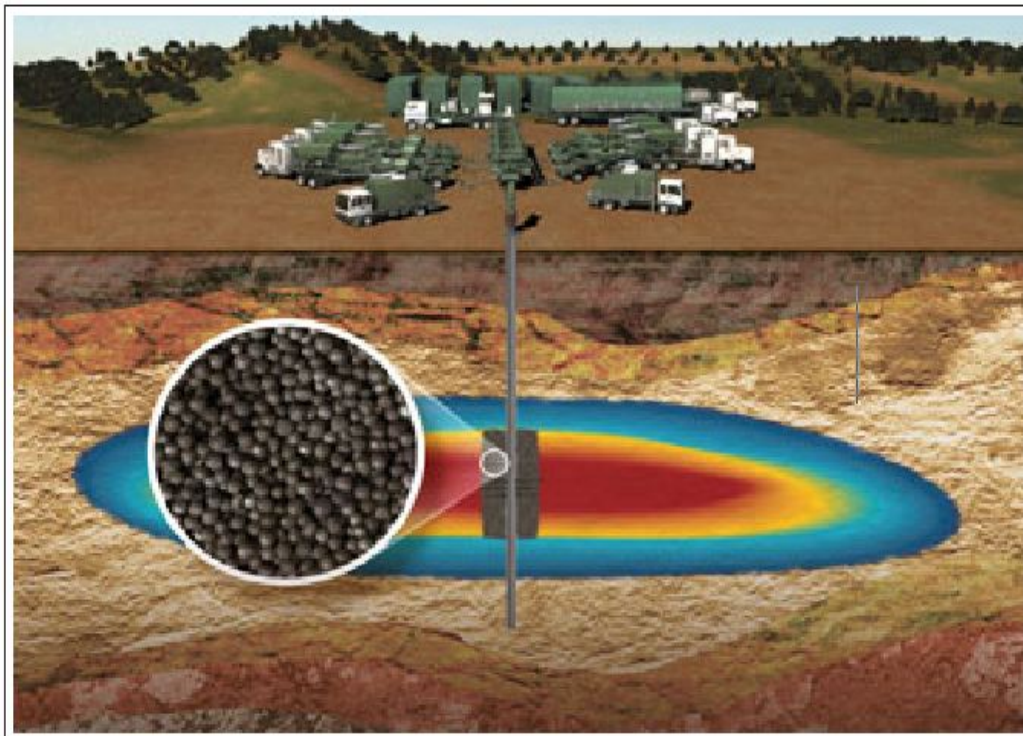
عوامل لازم برای امکان انجام لایه شکافی پروپانتی در سازندهای کربناته عبارتند از:

- حلالیت کم (کمتر از ۶۵ تا ۷۵ درصد) سازند در اسید (هیدروکلریک)؛
- سازند نسبتاً همگن کربناته (مثل سنگ آهک خالص)؛
- واکنش‌پذیری اندک سنگ سازند در اسید؛ مانند دولومیت‌های با دمای کم (کمتر از ۱۵۰ درجه فارنهایت)؛
- نرم شدن سنگ پس از تماس با اسید و شکست تحت تأثیر فشار لایه‌های فوقانی؛
- بالا بودن فشار انسداد سنگ تا حدی که موجب بسته شدن یا کاهش تراوایی شکاف اسیدی شود؛

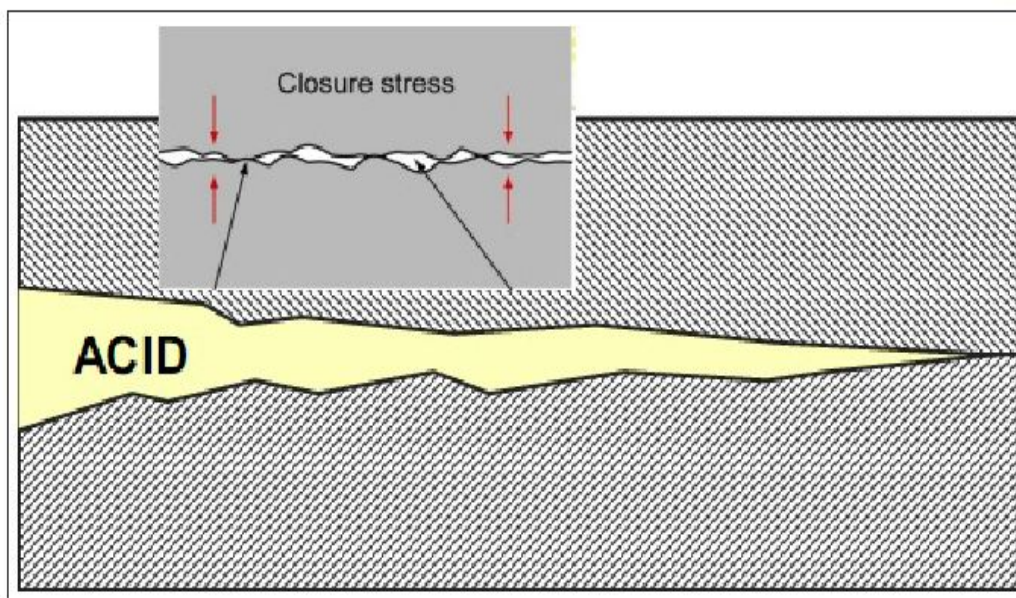
عوامل لازم برای امکان انجام لایه شکافی با اسید در سازندهای کربناته عبارتند از:

- وجود شکاف‌های طبیعی در سازند که موجب عدم موفقیت لایه شکافی پروپانتی می‌شود؛
- سازندهای ناهمگن که دیواره شکاف در آن‌ها به صورت غیریکنواخت تیزاب‌کاری می‌شود.
- چاه از نظر مکانیکی قابلیت پذیرش پروپانت را نداشته باشد (کلفایان^۳، ۲۰۱۷).

¹. Ching
². Michael
³. Kalfayan



شکل ۱-۲: لایه شکافی پروپانتهی (میرعباسی، حسینی و خامه‌چی، ۱۳۹۱)



شکل ۲-۲: مکانیزم لایه شکافی با اسید (میرعباسی، حسینی و خامه‌چی، ۱۳۹۱)

۲-۵-۱ مدل سازی دو بعدی فرآیند اسیدزنی ماتریسی در مخازن نفتی کربناته شکافدار

از آنجا که حرکت سیال در نزدیکی دهانه چاه به میزان زیادی به تراوایی آن قسمت بستگی دارد، لذا مدل سازی حرکت سیال در آن ناحیه بسیار مهم می باشد. بهترین روش شبیه سازی دو بعدی در آن ناحیه استفاده از مختصات استوانه ای است. معادلات این مدل سازی در مختصات $r - \theta$ را می توان به صورت زیر بیان کرد، در تمامی این معادلات؛ t ، θ و r متغیرهای مستقل می باشند.

$$(u, v) = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) \quad (7-2)$$

در معادله (۷-۲)؛ u و v پارامترهای سرعت داری به ترتیب در جهت های r و θ ، k تراوایی محیط، μ ویسکوزیته فاز سیال و p فشار می باشند.

معادله بعد، موازنه جرم برای فاز سیال است:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + c \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0 \quad (8-2)$$

در معادله (۸-۲)، ε تخلخل و c ضریب فشردگی سیال در دمای ثابت می باشد. برای جزء اسید نیز باید یک موازنه جرم نوشت. این موازنه که شامل ترم جابجایی، نفوذ، واکنش و تجمع اسید در حجم کنترل می باشد به صورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\varepsilon C_f)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru C_f) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (v C_f) \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varepsilon D_{er} \frac{\partial C_f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial D_{\theta r}}{\partial r} \frac{\partial \varepsilon C_f}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (9-2)$$

$$-k_c a_v (C_f - C_s)$$

در معادله (۹-۲)، C_s و C_f به ترتیب غلظت جزء واکنش دهنده در سیال و در سطح تماس سیال و جامد می باشد. D_e ضریب پراکندگی محلی، k_c ضریب انتقال جرم و a_v ، سطح تماس بین سیال و جامد واکنش دهنده بر واحد حجم محیط متخلخل می باشد.

موازنه جرم سنگ عبارت است از:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{R(C_s) \alpha a_v}{\rho_s} \quad (10-2)$$

در معادله (۲-۱۰)، α قدرت انحلال اسید می‌باشد که به استوکیومتری واکنش بستگی دارد و به صورت جامد حل شده بر حسب گرم به ازای یک مول اسید واکنش داده تعریف می‌شود. ρ_S دانسیته سنگ و $R(C_S)$ سرعت واکنش است، که با انتقال جرم از فاز سیال به سطح سنگ برابر است:

$$k_c = (C_f - C_s) = R(C_s) \quad (۱۱-۲)$$

شرایط مرزی و نیز شرایط اولیه که برای حل دستگاه معادلات ذکر شده مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای سرعت ثابت تزریق به صورت زیر می‌باشد:

$$u = -\frac{k_r}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} = u_0 \quad C_f = C_0 \quad @ \quad r = r_w \quad (۱۲-۲)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial C_f}{\partial r} = 0 \quad @ \quad r = r_e \quad (۱۳-۲)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} \Big|_{\theta} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \Big|_{\theta + 2\pi}, \quad \frac{\partial C_f}{\partial \theta} \Big|_{\theta} = \frac{\partial C_f}{\partial \theta} \Big|_{\theta + 2\pi} \quad (۱۴-۲)$$

$$C_f = 0, P = P_i \quad @ \quad t=0 \quad (۱۵-۲)$$

که r_w شعاع دهانه چاه و r_e شعاع تخلیه می‌باشد.

برای حل معادلات بالا، در ابتدا مخزن المان‌بندی می‌گردد. سپس معادلات توسط روش حجم محدود و با استفاده از روش حل عددی LSOR حل می‌شود. در نهایت، فشار، سرعت داری در دو بعد، غلظت اسید در فاز سیال و روی سطح سنگ، تخلخل و تراوایی در همه المان‌ها با گذشت زمان محاسبه می‌شود که می‌توان با استفاده از این نتایج فاکتور پوسته را بدست آورد (خدری، بخشی‌زیدانلو و مولا، ۱۳۹۱).

۲-۵-۲ ارزیابی عملکرد عملیات اسیدکاری ماتریسی در یک مخزن کربناته گاز میعانی چندلایه

هدف اصلی ارزیابی عملکرد اسیدکاری ماتریسی در مخازن کربناته گاز میعانی چندلایه با استفاده از نتایج دو مجموعه از داده‌های مخزن / چاه شامل نمودارهای تولید، داده‌های چاه‌آزمایی و داده‌های آزمایش سرچاهی است که قبل و بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی در یک چاه انحرافی / زاویه‌دار برداشت گردیده است. بعد از اجرای هر نوع عملیات اسیدکاری، لازم است کارایی تحریک چاه از نقطه نظر عملکرد جریانی چاه، برطرف شدن ضریب پوسته، بهبود تولید چاه و غیره بررسی گردد. یک اقدام متداول در صنعت نفت جهت ارزیابی عملیات اسیدکاری، بررسی دبی جریانی و فشار سرچاهی بعد از اسیدکاری است. بدین منظور، آزمایشات سرچاهی به عنوان یک روش مرسوم برای ارزیابی عملکرد عملیات اسیدکاری استفاده می‌شوند. مهندسين با این روش بهبود فشار جریانی سرچاهی و شاخص بهره‌دهی کل را با بکارگیری نمودارهای عملکرد جریان چاه^۱ محاسبه می‌کنند. با

^۱. Well flow performance (WPF)

این وجود، ارزیابی کارایی عملیات اسیدکاری در یک مخزن چندلایه بسیار پیچیده است. در نتیجه برای دستیابی به خواص هر کدام از لایه‌های مخزنی از جمله اثر پوسته، ظرفیت جریان و فشار اولیه مخزن بایستی عملیات چاه‌آزمایی تک لایه در چاه اجرا گردد که زمان و هزینه زیادی را در بر خواهد داشت. در مطالعه گراوند و همکاران (۱۴۰۰)، جهت نیل به این هدف، بدون اجرای عملیات چاه‌آزمایی تک‌لایه و صرف هزینه‌های گزاف ناشی از آن، دو مجموعه کامل از اطلاعات برداشت شده قبل و بعد از اسیدکاری در چاه هدف، مورد آنالیز و تفسیر قرار می‌گیرد. با استفاده از نتایج تفسیر نمودارگیری تولید، آنالیز عملکرد جریان انتخابی^۱ و بکارگیری خروجی‌های آنها به عنوان ورودی در آنالیز تست فشار گذرا بهم آمیخته، امکان ایجاد آنالیز چاه‌آزمایی چندلایه و دستیابی به پارامترهای تکنک لایه‌ها از جمله بهبود دبی جریانی، ضریب پوسته و فشار هر کدام از لایه‌های مخزنی / ارزیابی عملکرد اسیدکاری در تک تک لایه‌های مخزن فراهم گردیده است. نتایج این مطالعه می‌تواند باعث شناخت رفتار مخزنی لایه‌های مختلف گردیده و به بهینه‌سازی استراتژی اسیدکاری و پیشینه کردن انحراف اسید در چاه‌های آتی میدان، به منظور بهره‌دهی طولانی مدت چاه کمک کند. بطوری که با بهبود روش‌های انحراف اسید، از بین بردن یکنواخت ضریب پوسته و در نتیجه تخلیه یکنواخت زون‌های مختلف مخزن اتفاق افتد. علاوه بر این، نتایج بدست آمده کمک می‌کند در طی طول عمر تولید چاه‌های مختلف میدان، صیانت از مخزن یا روش اصلاحی مناسب برای بهبود تولید چاه انتخاب گردد (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰).

برای دستیابی به خواص هر کدام از لایه‌های مخزنی از جمله اثر پوسته، ظرفیت جریانی و فشار اولیه مخزن (بدون انجام عملیات چاه‌آزمایی تک لایه در چاه و جلوگیری از صرف زمان و هزینه‌های گزاف)، داده‌های نمودارگیری تولید به همراه تست فشار گذرا بهم آمیخته قبل و بعد از عملیات اسیدکاری در چاه مورد مطالعه توسط گراوند و همکاران (۱۴۰۰) برداشت گردیده است. پس از تفسیر داده‌های نمودار نگار تولید، خروجی‌های تفسیر نمودارگیری تولید و نتایج آنالیز عملکرد جریان انتخابی؛ (سهم مشارکت هر کدام از لایه‌ها در تولید و تزریق و همچنین فشار متوسط هر لایه مخزنی) به عنوان ورودی‌های آنالیز تست فشار گذرا استفاده شدند که امکان انجام آنالیز چندلایه^۲ را فراهم نمود. در نهایت، خواص هر لایه مخزنی شامل ضریب پوسته، ظرفیت جریانی و فشار اولیه هر لایه توسط گراوند و همکاران (۱۴۰۰) محاسبه گردیده است. نتایج تفسیر نمودارهای تولید و آنالیز تست فشار گذرا به همراه سایر داده‌های تکمیلی گراوند و همکاران (۱۴۰۰) را قادر نمود بتواند کارایی عملیات اسیدکاری ماتریسی یا کیفیت اسیدکاری^۳ هر لایه را بطور مجزا بررسی نمایند. به عبارت دیگر، دستیابی به

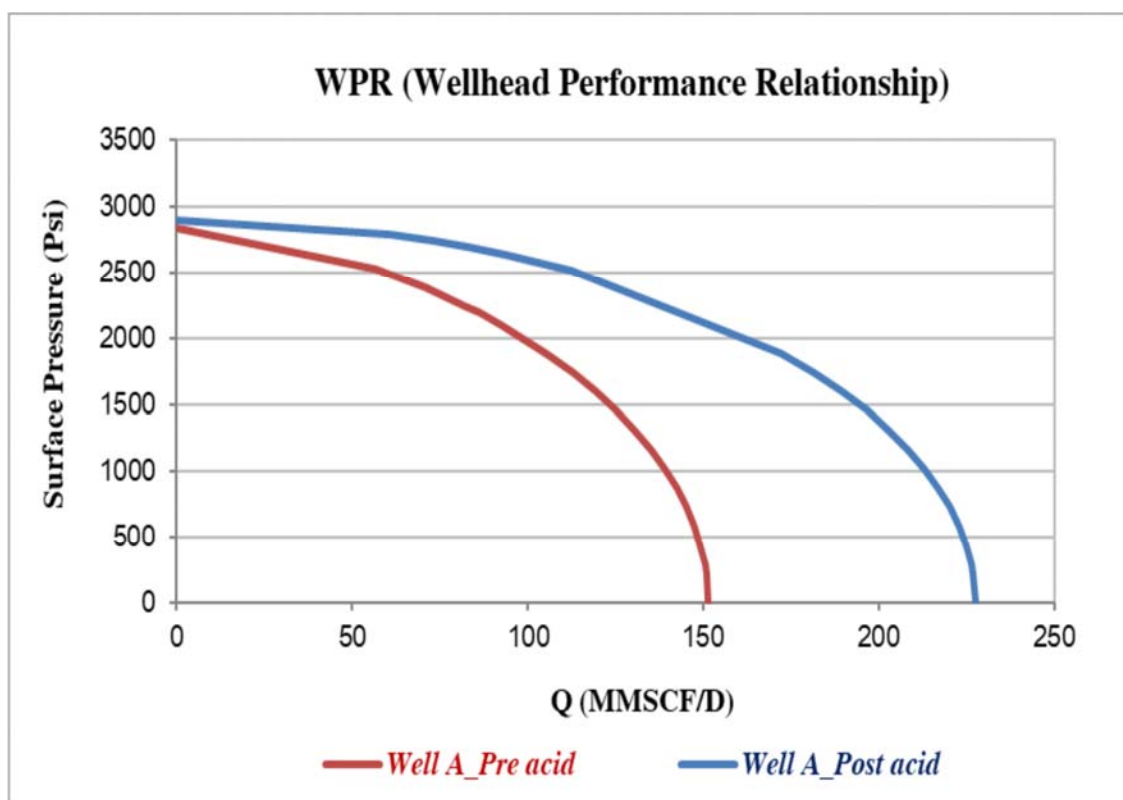
^۱. Selective Inflow Performance (SIP)

^۲. Multi-layer analysis

^۳. Acid placement

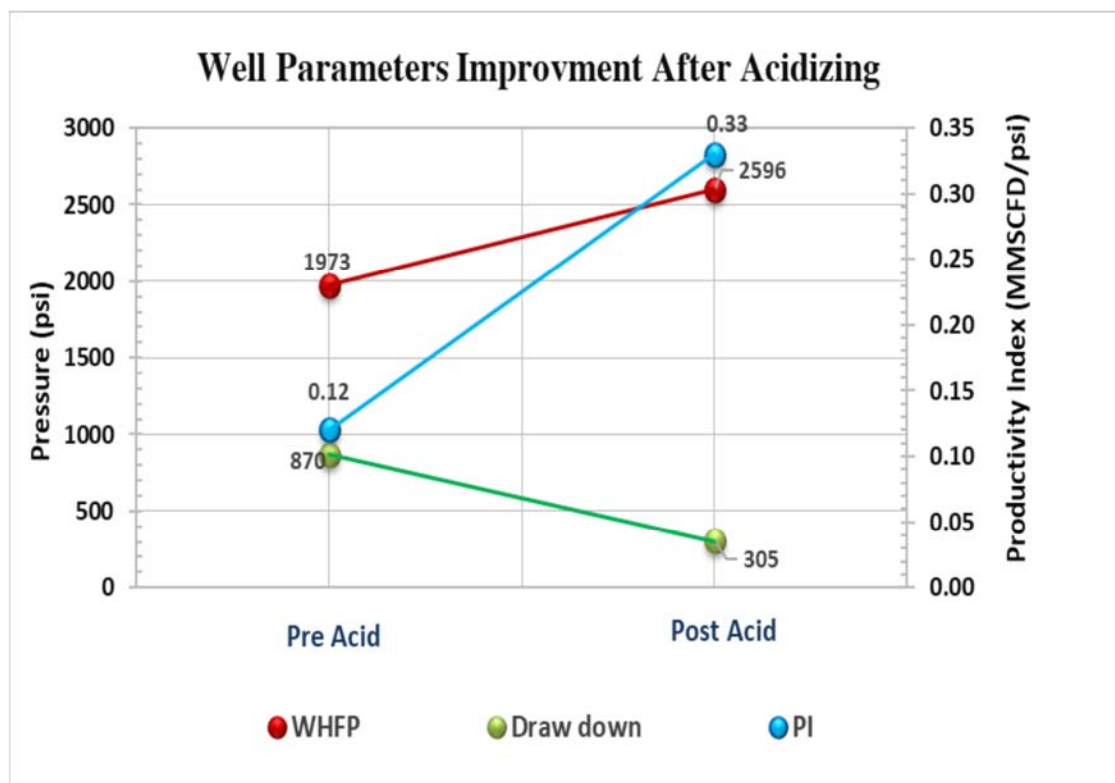
پارامترهای مخزنی / چاه برای هر لایه از طریق تلفیق نتایج آنالیز و تفسیر داده‌های قبل و بعد از عملیات اسیدکاری باعث شده آنان بتوانند کیفیت عملکرد عملیات اسیدکاری ماتریسی در هر لایه مخزنی را بطور مجزا ارزیابی نمایند. علاوه بر روش مشتق فشار، جهت کسب نتایج قابل اعتمادتر، درک بهتر رفتار مخزن و تشخیص اثرات مرزی احتمالی در چاه مورد مطالعه، گراوند و همکاران (۱۴۰۰) تکنیک دی کانولوشن دبی متغییر نیز برای تحلیل چاه‌آزمایی استفاده نمودند.

آنالیز نمودار عملکرد سر چاه حاصل از داده‌های آزمایش‌های سرچاهی در مطالعه گراوند و همکاران (۱۴۰۰) نشان داده که بعد از اجرای عملیات اسیدکاری ماتریسی، فشار جریان سرچاهی حدود ۶۲۳ پام (۴۳ بار) در دبی ثابت ۱۰۰ میلیون فوت مکعب در روز (م.ف.م.ر) افزایش یافت (شکل ۲-۳). شاخص بهره‌دهی کل در چاه نیز حدود سه برابر افزایش پیدا کرده است.



شکل ۲-۳: مقایسه نمودارهای عملکرد سر چاه، قبل و بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

همان طوری که در شکل (۲-۴) ملاحظه می‌شود در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰)؛ میزان انداخت فشار به حدود ۱/۳ کاهش یافت، بنابراین، تغییرات پارامترهای چاه بعد از تحریک چاه، بیانگر عملکرد موفقیت آمیز عملیات اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف می‌باشد.



شکل ۲-۴: پارامترهای چاه شامل فشار جریان سرچاهی، میزان انداخت فشار و شاخص بهره‌دهی در دبی ثابت ۱۰۰ م.ف.م. بر اساس نتایج تفسیر داده‌های آزمایشات سرچاهی قبل و بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

میزان بهبود یا تغییرات پارامترهای مختلف چاه در اثر عملیات اسیدکاری ماتریسی شامل جریان باز مطلق^۱، فشار جریان سرچاهی، انداخت فشار و شاخص بهره‌دهی کل، بطور خلاصه در جدول شماره (۲-۲) ارائه شده است.

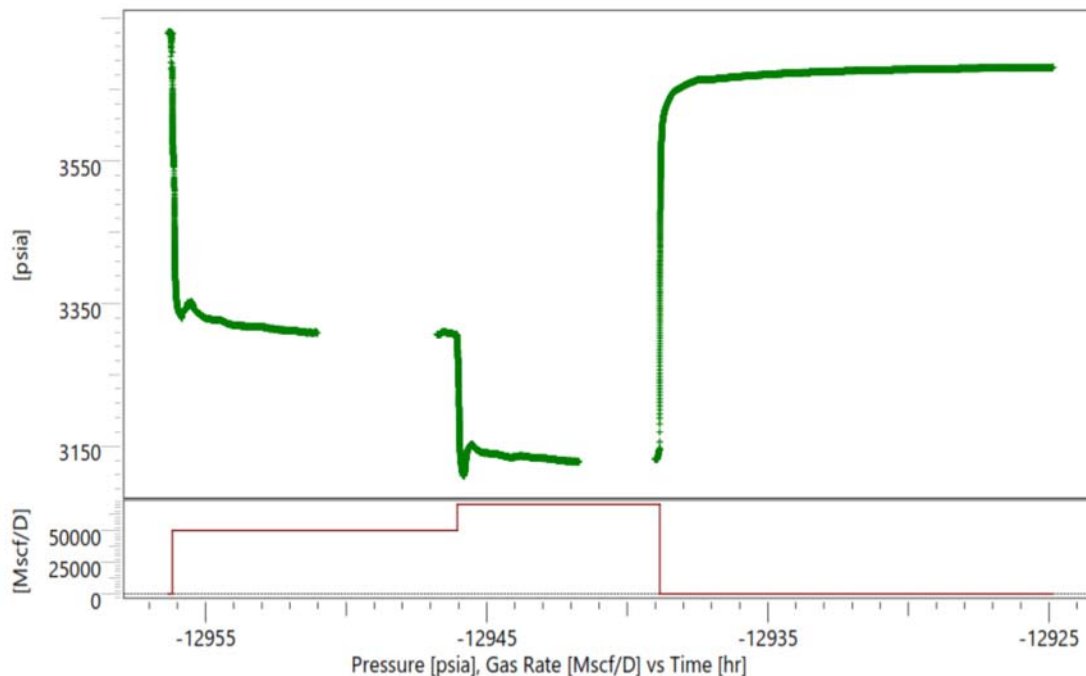
^۱. Absolute open flow (AOF)

جدول ۲-۲: بهبود پارامترهای مختلف چاه بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی، در دبی ثابت ۱۰۰ م.ف.م.ر.
(گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

وضعیت چاه	جریان باز مطلق	فشار جریان سرچاهی (فشار بر اینچ)	انداخت فشار (فشار بر اینچ)	شاخص کل بهره‌دهی
قبل از اسیدکاری	۱۵۱	۱۹۷۳	۸۷۰	۰/۱۲
بعد از اسیدکاری	۲۲۸	۲۵۹۶	۳۰۵	۰/۳۳

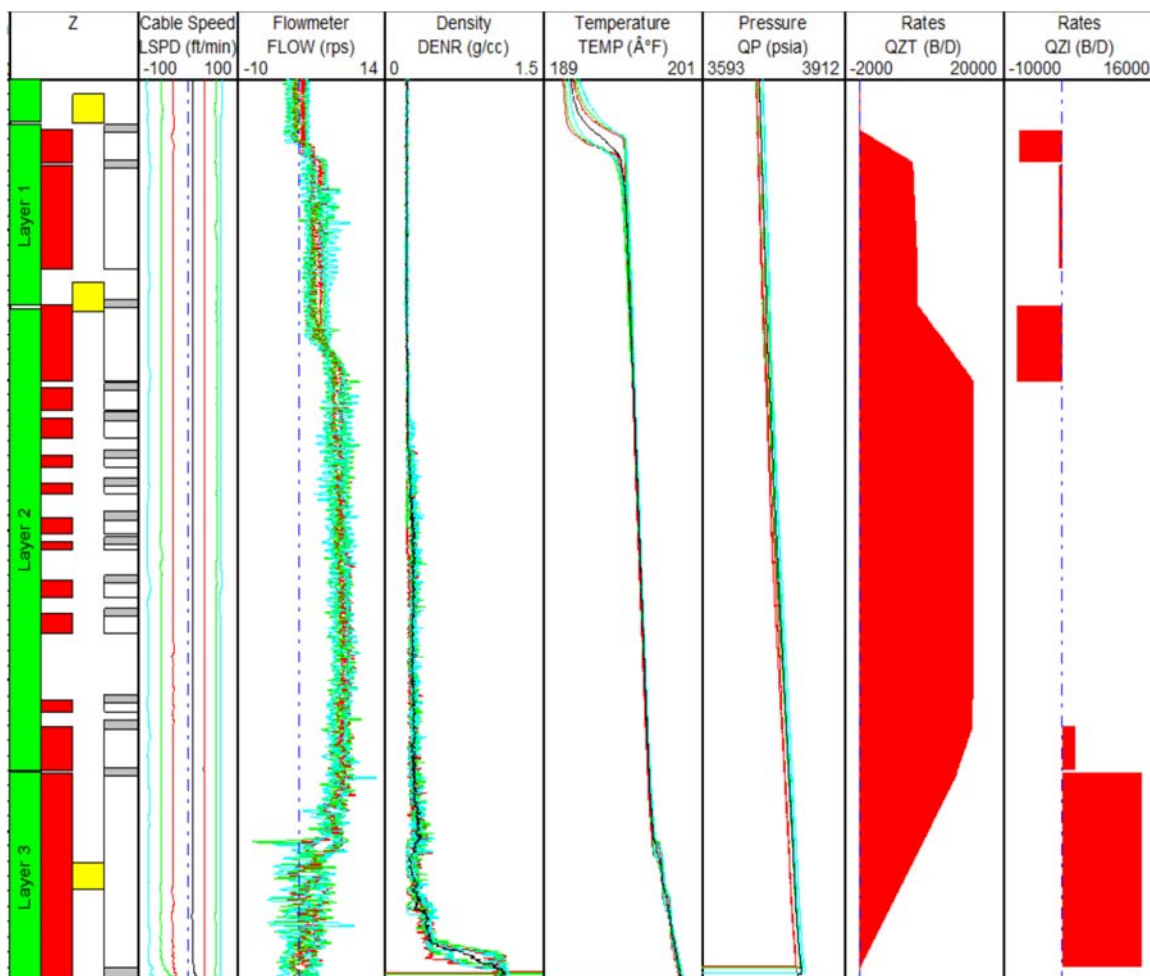
برای محاسبه خواص مخزن / چاه و همچنین بررسی نحوه عملکرد عملیات تحریک چاه در هر لایه مخزنی، بایستی نمودارگیری تولید و تست فشار گذرا در چاه هدف رانده شود. رشته ابزار نمودارگیری تولید شامل سنسورهای مختلفی از جمله جریان‌سنج، جریان‌سنج کمکی، پرتو گاما، دیالکتریک، قطرسنج، متمرکز کننده، چگالی، دمای کوارتز، فشارسنج کوتاه می‌باشد.

آنالیز فشار گذرا قبل از اسیدکاری شامل دو حالت جریانی و یک شرایط استاتیک در سرعت کابل‌های مختلف می‌باشد (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵: نمودار تاریخچه فشار برای تست فشار گذرا قبل از عملیات اسیدکاری
(گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

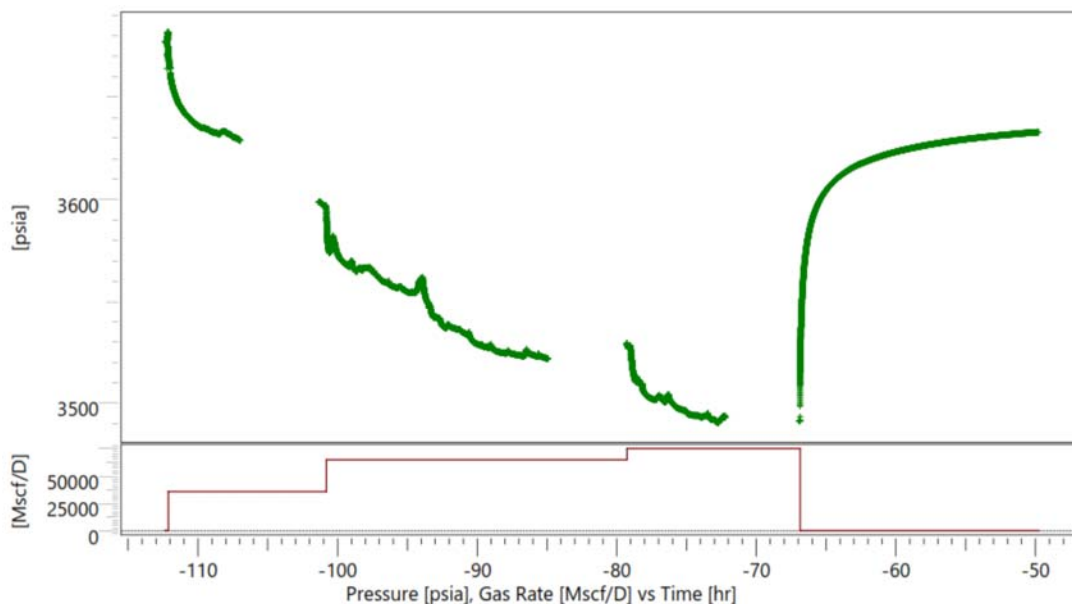
نتایج تفسیر نمودارهای تولید در حالت بسته در شکل (۶-۲) نشان داده شده است. بر اساس قرائت ابزارهای تشخیص سیال (چگالی و دیالکتریک)، ستون آب راکد کوچکی در انتهای چاه مشاهده می‌شود. با این وجود، در سطح/سرچاه هیچ‌گونه تولید آبی دیده نشد. جریان متقاطع یا حرکت عمودی سیال بین لایه‌ها فقط در طی حالت در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰) بسته مشاهده گردید. جهت جریان متقاطع از سمت پایین‌ترین لایه با فشار متوسط بالاتر به سمت بخش بالای لایه ۲ و لایه ۱ با فشار متوسط پایین‌تر می‌باشد (شکل ۶-۲).



شکل ۶-۲: میزان سهم مشارکت هر سه لایه مخزنی در تولید/تزریق و جریان متقاطع رو به بالا در شرایط بسته (نمودارگیری تولید قبل از اسیدکاری ماتریسی در چاه) (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

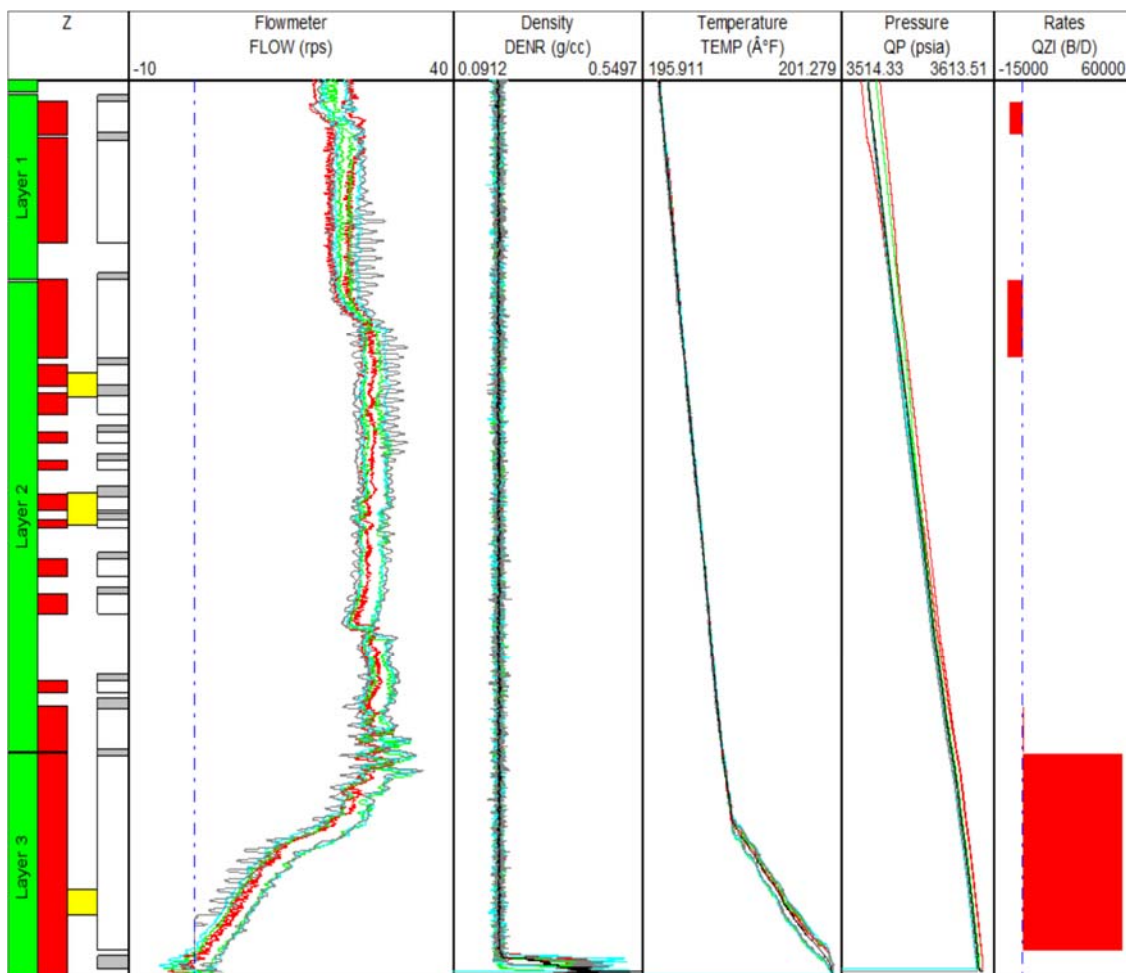
بر اساس ارزیابی نمودارهای پتروفیزیکی چاه (نوترون، چگالی، مقاومت، صوتی، پرتوگاما، اسپکترومتری گاما و قطریاب)، لایه‌های مخزنی مورد مطالعه در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰)؛ تخلخل، تراوایی و اشباع آب متفاوتی نسبت به هم دارند اگرچه همه این لایه‌ها از سنگ‌های کربناته تشکیل شده‌اند. جریان متقاطع رو به بالا می‌تواند بیانگر این نکته باشد که فشار متوسط مخزن زیر عمق ۳۵۶۰ متری (دو بازه مشبک کاری انتهایی چاه)، بالاتر از فشار متوسط مخزن بالای عمق ۳۴۵۰ متری (لایه ۱ و ۲) است. علاوه بر این، بازه‌های مشبک کاری وسط لایه ۲ در عمق حدود ۳۴۵۰-۳۵۶۰ متری در طی حالت‌های جریان و بسته، هیچ گونه مشارکتی در تولید/تزریق ندارند.

نتایج حاصل از تفسیر در دو حالت جریانی کمینه و متوسط توسط گراوند و همکاران (۱۴۰۰)؛ نشان می‌دهد عمده سهم مشارکت تولید/تزریق مربوط به سه زون، بخش بالای هر سه لایه مخزنی فوق‌الذکر می‌باشد. علاوه بر این، پایین‌ترین لایه مخزنی بیشترین سهم مشارکت را بر عهده دارد، سپس لایه شماره ۱ و لایه شماره ۲ به ترتیب بیشتر در تولید/تزریق سهم هستند. در نهایت، بخش انتهایی لایه ۲ حداقل مشارکت را در تولید ایفا می‌کند. نمودارهای تولید بعد از عملیات اسیدکاری در حالت بسته (پاس‌های رو به بالا و رو به پایین نمودارگیری در شرایطی که چاه بسته است ثبت می‌گردند) و سه حالت جریانی (کمینه، متوسط و بیشینه) در شرایط جریانی پایدار و با سرعت‌های مختلف کابل نمودارگیری در چاه رانده شدند. پس از تست‌های انداخت فشار چندگانه، داده‌های فشار گذرا در طی تست ساخت فشار در چاه توسط گراوند و همکاران (۱۴۰۰) ثبت گردیدند (شکل ۲-۷).



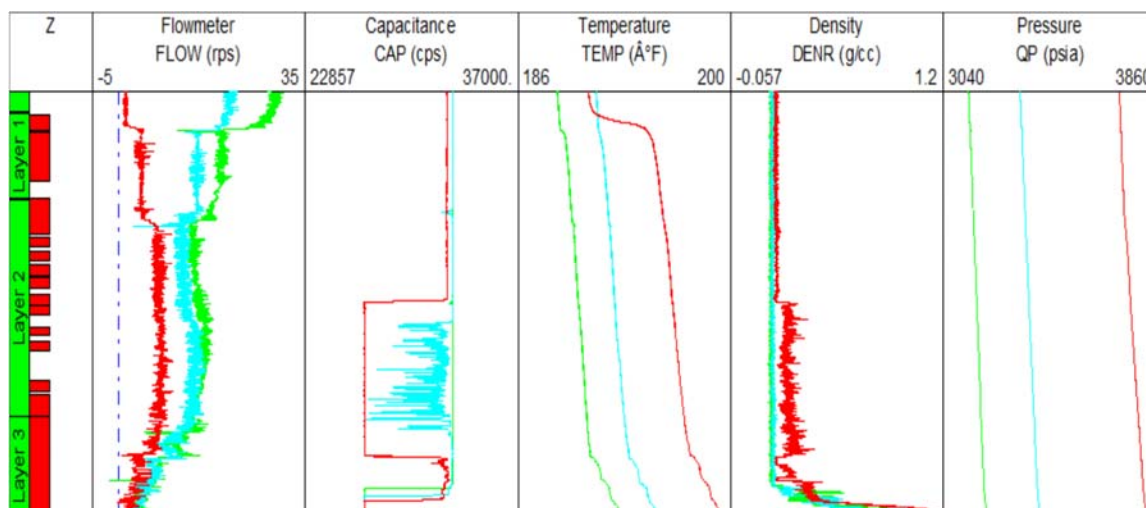
شکل ۲-۷: نمودار تاریخچه فشار برای تست فشار گذرا بعد از عملیات اسیدکاری (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

بر اساس نتایج نمودارگیری تولید بعد از اسیدکاری، جریان متقاطع علاوه بر شرایط استاتیک/بسته در هر سه حالت جریانی نیز در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰) دیده شده است. اگرچه نرخ جریان متقاطع با افزایش اندازه کاهنده‌ها؛ کاهش می‌یافت. مشابه نمودارگیری تولید قبل از اسیدکاری، جهت جریان متقاطع رو به بالا است و فواصل بالای هر سه لایه مخزنی مشارکت تولید/تزریق اصلی در تولید/تزریق بودند. بیشترین سهم مشارکت مربوط به لایه ۳ بوده، در حالی که بخش وسط لایه ۲ (قبل و بعد از اسیدکاری) هیچ گونه مشارکتی در تولید نداشته است (شکل ۸-۲).



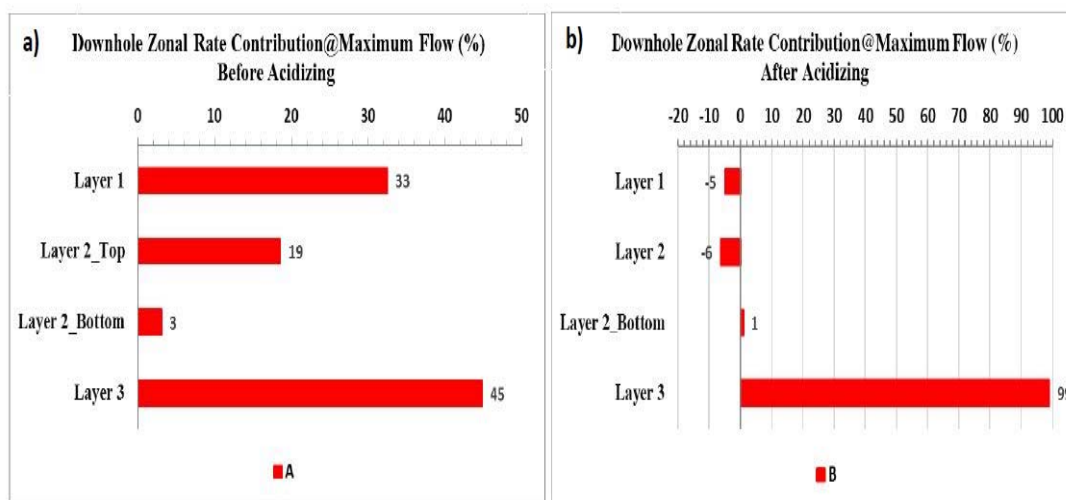
شکل ۸-۲: سهم مشارکت هر کدام از لایه‌های مخزنی در تولید/تزریق و جریان متقاطع رو به بالا از سمت پایین‌ترین لایه به سمت بخش ابتدای دو لایه دیگر در دبی جریانی متوسط (نتایج تفسیر نمودارهای تولید بعد از اسیدکاری در چاه هدف) (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

شکل شماره (۲-۹) مقایسه بین تمام حالت‌های جریان و بسته نمودارگیری تولید، قبل و بعد از اسیدکاری را در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰) نشان می‌دهد که بیانگر کارایی عملیات اسیدکاری است. مشاهده جریان متقاطع حتی در حالت جریانی بیشینه، در نمودارهای تولید بعد از اسیدکاری نشان می‌دهد که پتانسیل لایه‌های با تولید بالا احیا شده است. با این وجود، عملیات اسیدکاری ماتریسی پایین‌ترین لایه را بیشتر تحت تأثیر قرار داده است. بنابراین، ارتباط بهتری بین لایه مخزنی شماره ۳ و چاه برقرار شده است. علاوه بر این، اختلاف فشار بین سکانس‌های جریانی و بسته بعد از عملیات تحریک چاه کاهش یافته است (ستون آخر شکل ۲-۹). همانطوری که ملاحظه می‌شود بخش بزرگی از لایه ۲ در تولید مشارکتی ندارد.



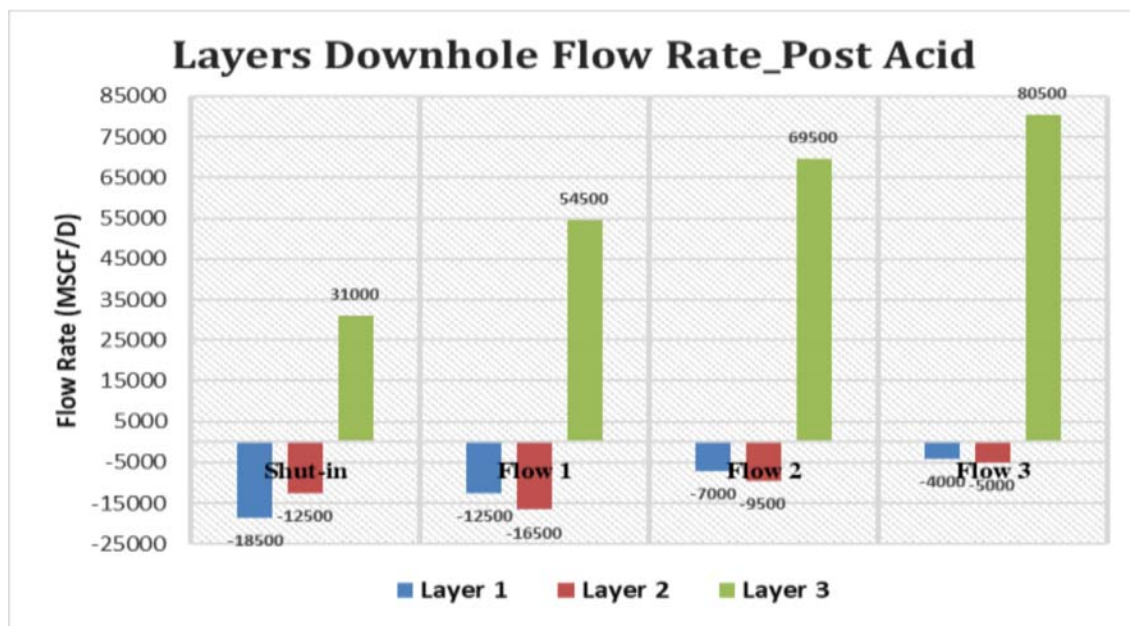
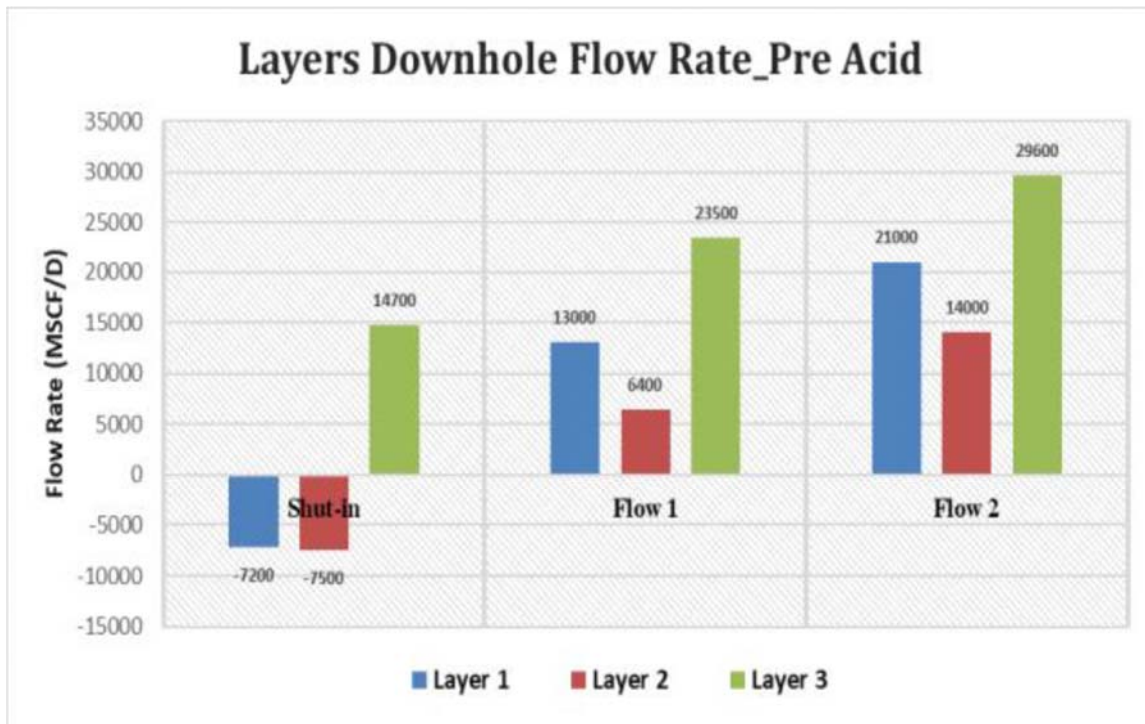
شکل ۲-۹: مقایسه بین تمام حالت‌های جریانی و بسته نمودارگیری تولید، قبل از اسیدکاری (الف) و بعد از اسیدکاری (ب)؛ رنگ قرمز (حالت بسته)، رنگ آبی (جریان کمینه)، رنگ سبز (جریان متوسط) و رنگ صورتی (جریان بیشینه) (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

بر اساس نتایج تفسیر داده‌های نمودارگیری تولید در دبی جریان‌ی بیشینه (قبل و بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی)، میزان سهم مشارکت درون چاهی زون‌های چند لایه در شکل شماره (۲-۱۰؛ الف و ب) نشان داده شده است. بعد از عملیات تحریک چاه، میزان مشارکت لایه ۳ در تولید به حدود ۹۹ درصد افزایش یافته است. بنابراین، اگرچه اسیدکاری ماتریسی باعث بهبود بسیار خوب پتانسیل کل چاه شده است اما انحراف اسید در پژوهش گرانند و همکاران (۱۴۰۰)، اثر پوسته در زون‌های مختلف را بطور یکنواختی برطرف نکرده است.

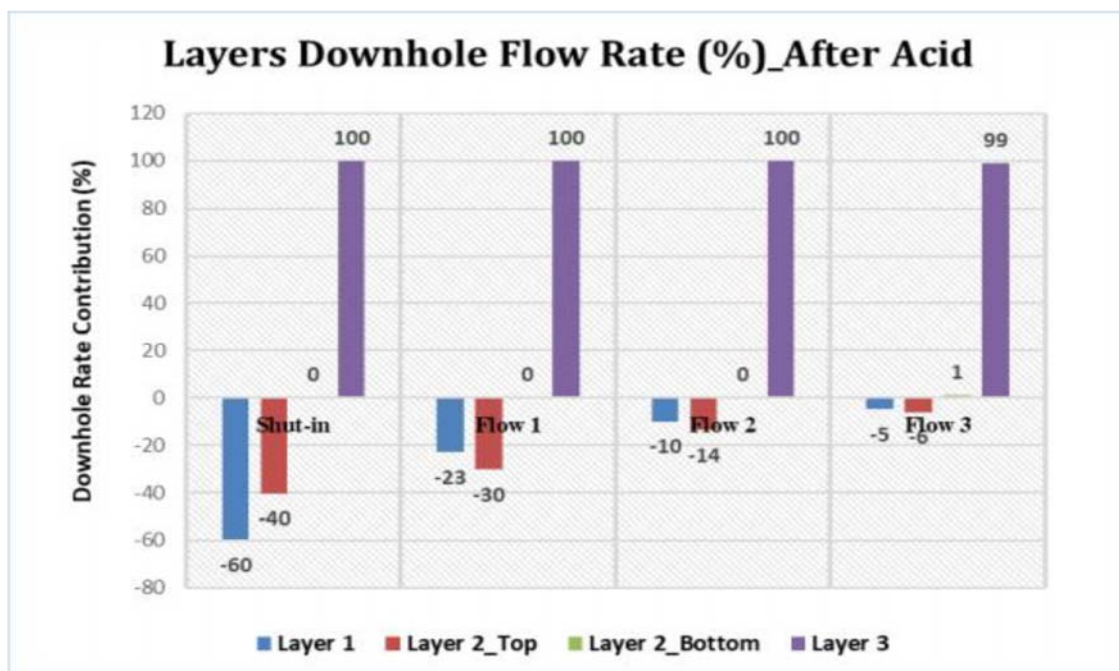
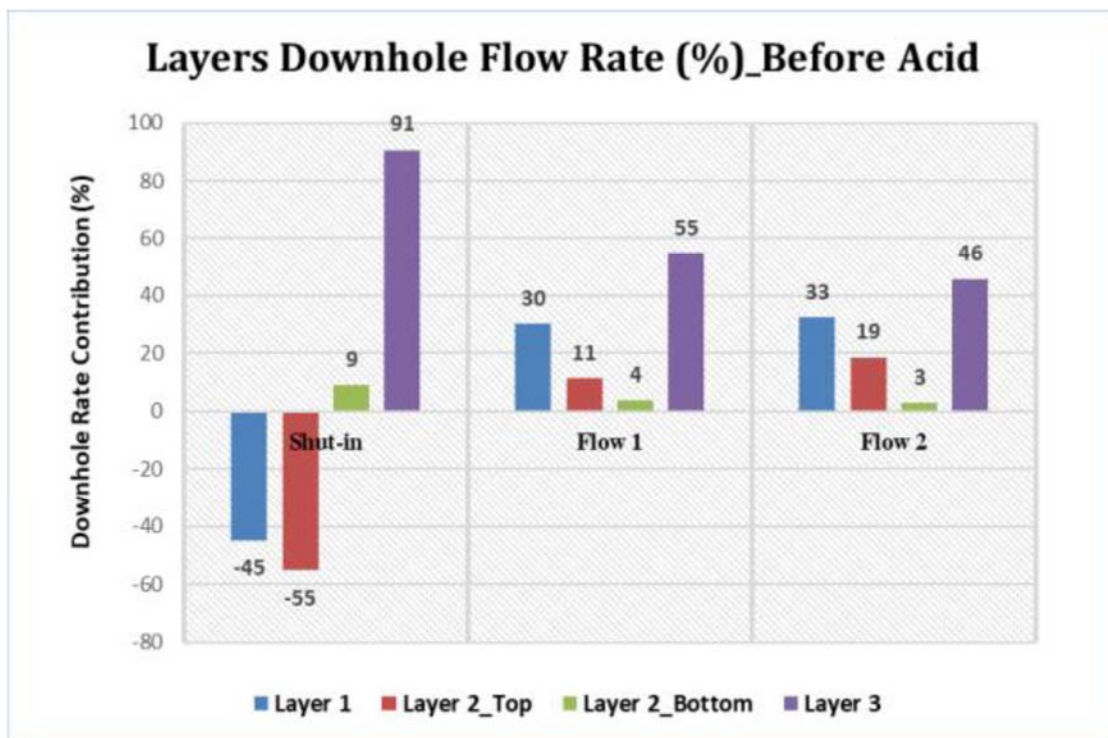


شکل ۲-۱۰: میزان سهم مشارکت درون چاهی زون‌های مخزنی چند لایه بر اساس نتایج تفسیر داده‌های نمودارگیری تولید در دبی جریان‌ی بیشینه، قبل از عملیات اسیدکاری (الف) و بعد از عملیات اسیدکاری (ب) (گرانند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

سهم مشارکت هر کدام از لایه‌های مخزنی در تولید / تزریق (مقدار دبی جریان‌ی و درصد مشارکت) در تمام حالت‌های جریان‌ی و بسته نمودارهای تولید قبل و بعد از اسیدکاری در پژوهش گرانند و همکاران (۱۴۰۰) و در شکل‌های (۲-۱۱) و (۲-۱۲) نشان داده شده است. نمودارهای تولید قبل از عملیات تحریک چاه، میزان مشارکت لایه ۱ و ۲ در تولید، با افزایش دبی جریان‌ی افزایش می‌یابد در حالی که لایه ۳ روند عکس دارد. بعد از اسیدکاری، سهم مشارکت لایه ۳ در تولید به شدت افزایش پیدا می‌کند اما لایه‌های ۱ و ۲ در تمام حالت‌های جریان‌ی و بسته به عنوان زون دزد عمل می‌کنند.



شکل ۲-۱۱: دبی جریان‌های هر کدام از لایه‌های مخزنی در تمام حالت‌های جریان‌ی و بسته نمودارهای تولید، قبل از عملیات اسیدکاری (الف) و بعد از عملیات اسیدکاری (ب)
(گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)



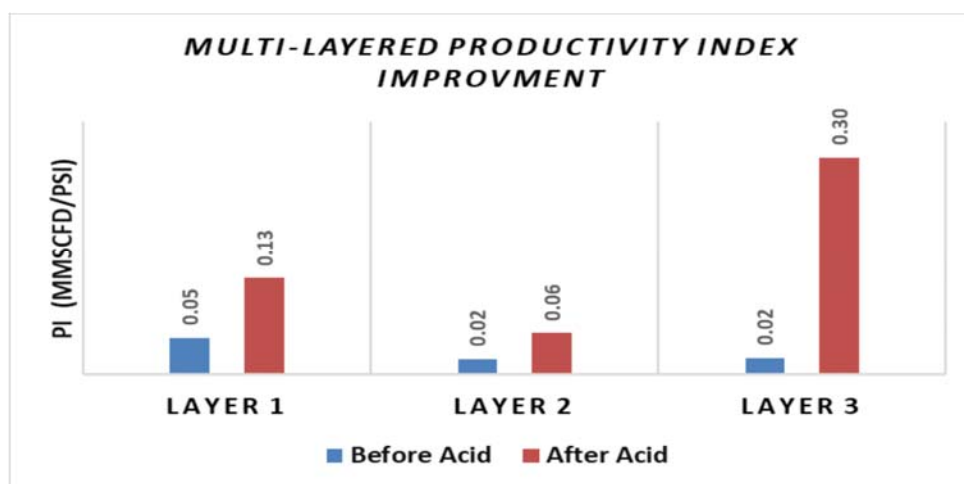
شکل ۲-۱۲: درصد مشارکت هر کدام از لایه‌های مخزنی در تولید/تزریق در تمام حالت‌های جریان و بسته نمودارهای تولید، قبل از عملیات اسیدکاری (الف) و بعد از عملیات اسیدکاری (ب) (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

مقایسه مقادیر دبی‌های جریان‌ی درون‌چاهی برای هر لایه مخزنی در طی تمام حالت‌های جریان‌ی و بسته نمودارهای تولید، قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه در جدول شماره (۲-۳) ارائه شده است. این نتایج تأثیر عملکرد اسیدکاری ماتریسی روی میزان سهم مشارکت هر کدام از لایه‌های مخزنی در تولید/تزریق را در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰) نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳: دبی جریان‌ی درون‌چاهی برای هر لایه مخزنی بطور مجزا در طی تمام حالت‌های جریان‌ی و بسته نمودارهای تولید (قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه) (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

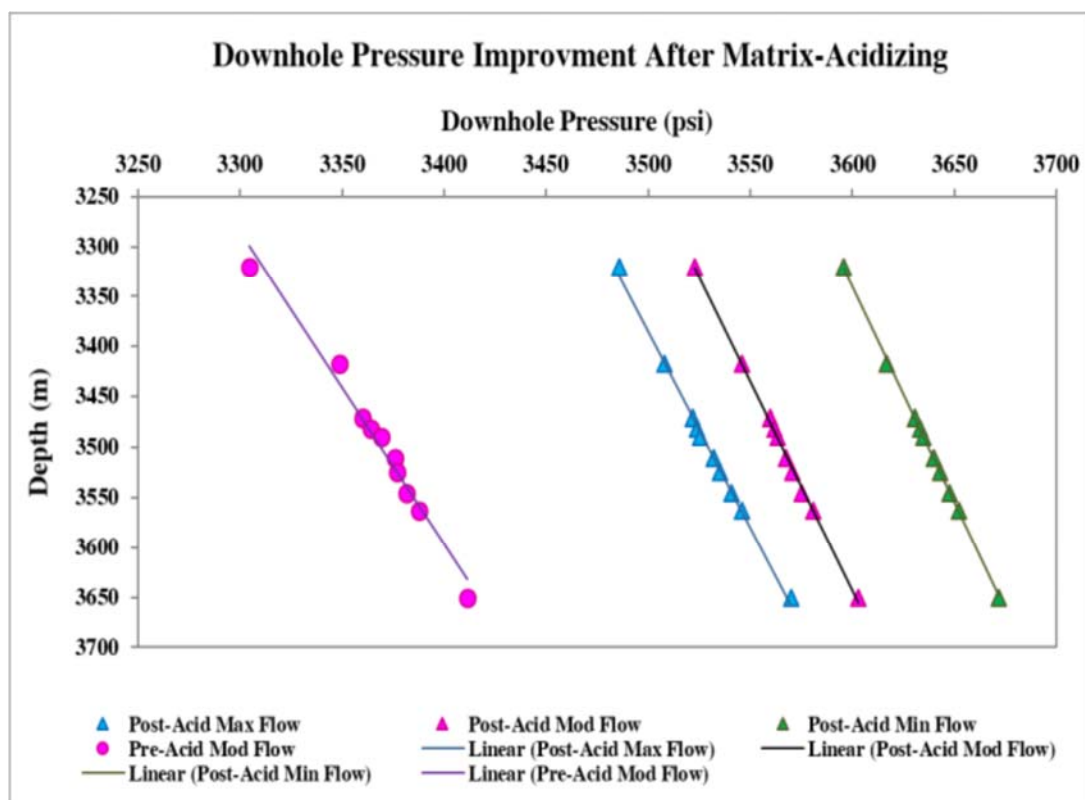
حالت	دبی جریان‌ی درون چاهی برای لایه مخزنی ۱		دبی جریان‌ی درون چاهی برای لایه مخزنی ۲		دبی جریان‌ی درون چاهی برای لایه مخزنی ۳	
	قبل از اسیدکاری	بعد از اسیدکاری	قبل از اسیدکاری	بعد از اسیدکاری	قبل از اسیدکاری	بعد از اسیدکاری
حالت جریان‌ی بسته	-۷۲۰۰	-۱۸۵۰۰	-۷۵۰۰	-۱۲۵۰۰	۱۴۷۰۰	۳۱۰۰۰
حالت جریان‌ی ۱	۱۳۰۰۰	-۱۲۵۰۰	۶۴۰۰	-۱۶۵۰۰	۲۳۵۰۰	۵۴۵۰۰
حالت جریان‌ی ۲	۲۱۰۰۰	-۷۰۰۰	۱۴۰۰۰	-۹۵۰۰	۲۹۶۰۰	۶۹۵۰۰
حالت جریان‌ی ۳	-	-۴۰۰۰	-	-۵۰۰۰	-	۸۰۵۰۰

بعد از عملیات تحریک چاه، شاخص بهره‌دهی لایه ۳ حدود ۱۵ برابر افزایش یافت که مقدار بسیار قابل توجهی می‌باشد. اگرچه، این شاخص در دو لایه دیگر تقریباً دودر پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰)؛ برابر بهبود یافته است (شکل ۲-۱۳).



شکل ۲-۱۳: تغییرات شاخص بهره‌دهی لایه‌های مخزنی حاصل از نتایج آنالیز عملکرد جریان انتخابی (قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه) (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

نمودار نقاط ایستا اندازه‌گیری شده^۱ در طی حالت‌های جریان‌ی نمودارگیری تولید نشان می‌دهد بعد از اسیدکاری ماتریسی، فشار ته چاهی / گرادیان فشاری در امتداد مقطع مخزن در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰)؛ بهبود یافته است (شکل ۲-۱۴).



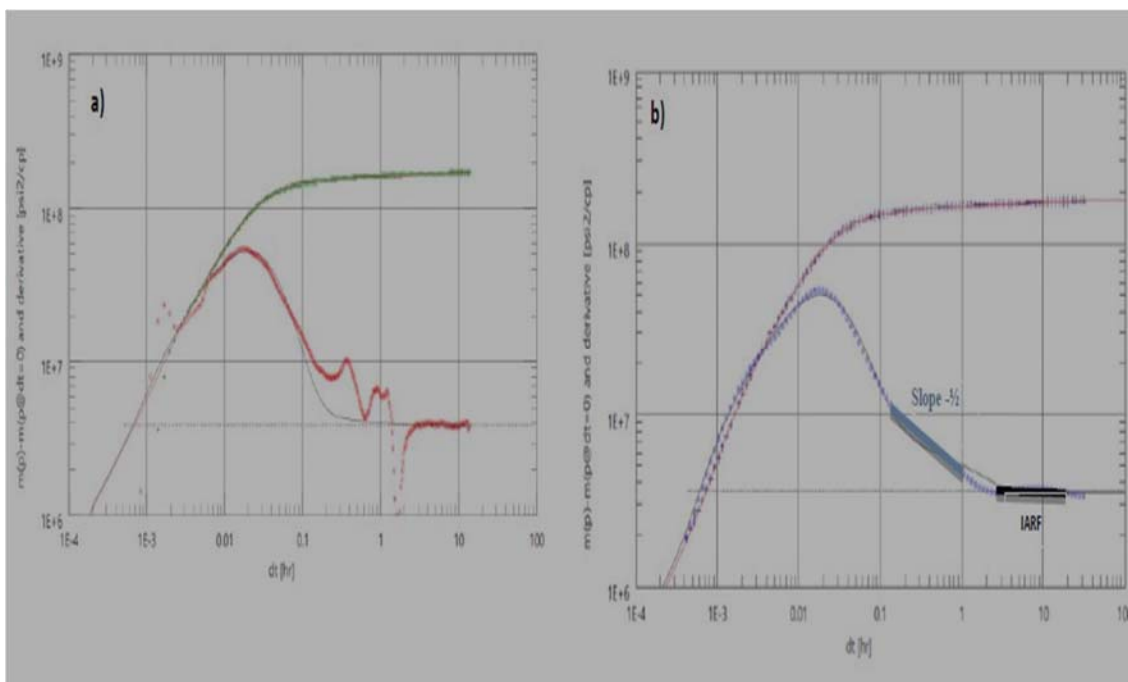
شکل ۲-۱۴: بهبود فشار ته چاهی بر اساس نتایج اندازه‌گیری نقاط ایستا در طی حالت‌های جریان‌ی نمودارگیری تولید (قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه) (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

نمودار مشتق فشار در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰)؛ نشان می‌دهد که داده‌های فشار تحت تأثیر توزیع فازی در چاه قرار گرفته‌اند (شکل ۱۵ - الف)؛ علاوه بر این، آنومالی فشار روی نمودارهای مشتق فشار در حدود ۳۰ دقیقه از تست ساخت فشار دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از جریان متقاطع بین لایه‌ها باشد. همچنین بعد از ۵۰ و ۱۵۰ دقیقه از گذشت تست ساخت فشار، رژیم جریان‌ی شعاعی چندگانه روی نمودار مشتق فشار دیده می‌شود که رفتار سیستم چند لایه را تأیید می‌نماید. جدایش زیاد بین نمودارهای افت فشار و مشتق افت فشار بیانگر ضریب پوسته کل خیلی مثبت برای همه لایه‌ها می‌باشد، اگرچه بیشترین ضریب پوسته مربوط به لایه ۳

^۱. Stationary measurements

می‌شود. تکنیک دی‌کانولوشن نیز برای آنالیز فشار گذراتوسط گراوند و همکاران (۱۴۰۰) انجام شده است که شعاع بررسی را افزایش داده و اطلاعات بیشتری را برای آنالیز فراهم نمود. در واقع، این رویکرد کل داده‌های تاریخچه فشار شامل دوره‌ها جریانی و بسته را به عنوان تولید در دبی ثابت در نظر می‌گیرد. بنابراین، محدوده داده‌ها را افزایش داده است بطوری که طول مدت حدود ۱۴ ساعت تست ساخت فشار قبل از اسیدکاری، به ۳۱ ساعت افزایش یافت. در نتیجه دبی متغیر اصلاح شده و جریان کروی با شیب $\frac{-1}{p}$ در زمان‌های ابتدایی قابل مشاهده شده

است (شکل ۲-۱۵؛ ب). پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰)؛ اثر شیب منفی $\frac{1}{p}$ روی منحنی مشتق فشار، نتایج نمودارهای تولید / ورود جزئی به داخل زون‌های مجزا را تأیید نمود. قابل ذکر است که هر دو روش مشتق فشار و دی‌کانولوشن اثر انبارش چاه را نشان می‌دهند که در طی زمان‌های اولیه با خط راست شیب واحد روی نمودارهای لگاریتمی قابل مشاهده است. علاوه بر این، ضریب پوسته بالا نیز روی هر دو شکل نمودارهای لگاریتمی مشتق فشار و مشتق فشار دیکانوالو شده مشخص است.



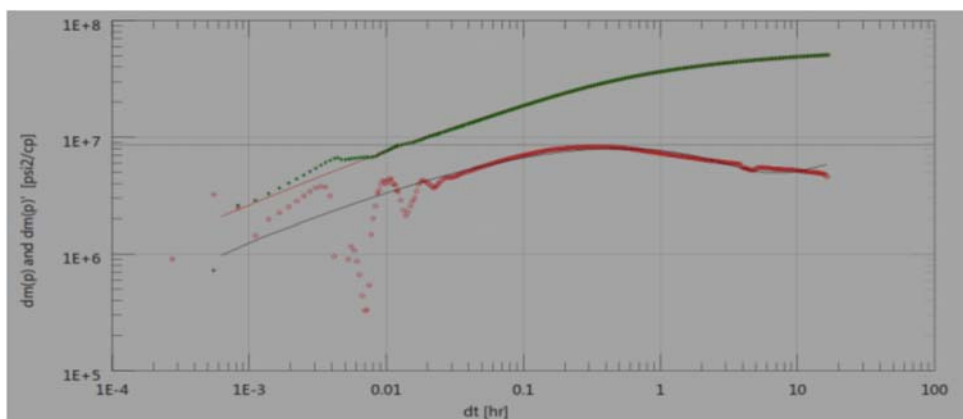
شکل ۲-۱۵: آنالیز فشار گذرا قبل از اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف، (الف) نمودار لگاریتمی فشار و مشتق فشار و (ب) اثر جریان کروی با شیب منفی روی نمودار مشتق فشار دی‌کانوالو شده (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

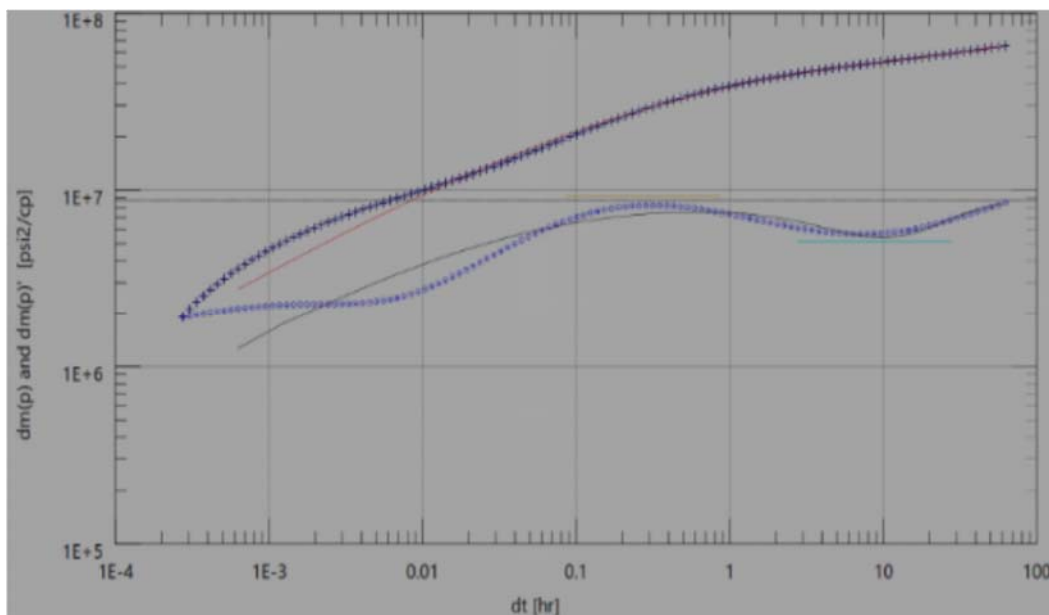
بطور کلی نتایج تحلیل داده‌های قبل از اسیدکاری شامل شاخص بهره‌دهی پایین و ضریب پوسته مثبت نشان داد که جهت بهبود عملکرد چاه، بایستی عملیات اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف اجرا شود. در آنالیز تست فشار گذار بعد از اسیدکاری، جدایش بین نمودار افت فشار و مشتق افت فشار کاهش می‌یابد که بیانگر کاهش ضریب پوسته کل بعد از انجام تحریک چاه است. بر اساس نتایج آنالیز چندلایه در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰)، ضریب پوسته برای پایین‌ترین لایه (لایه ۳) کاملاً منفی شد. به عبارت دیگر، عملیات اسیدکاری این لایه را بسیار بیشتر از سایر لایه‌های مخزن تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۲-۱۶؛ ب).

علاوه بر این، نتایج تحلیل چاه‌آزمایی در تلفیق با نتایج تفسیر نمودارهای تولید و آنالیز عملکرد جریان انتخابی نشان داد که بعد از اسیدکاری ماتریسی، فشار جریان ته‌چاهی لایه مذکور نیز بهبود بسیار خوبی داشته است.

آنالیز دی‌کانولوشن داده‌های چاه‌آزمایی بعد از اسیدکاری باعث شد محدوده داده‌های در دسترس برای تفسیر از ۱۷ ساعت به ۶۲ ساعت افزایش پیدا کند (شکل ۲-۱۶). در نتیجه اثر رژیم جریانی مرزی و دو جریان شعاعی با محصول kh و ضریب پوسته مختلف روی نمودار مشتق فشار دی‌کانوالو شده قابل مشاهده گردید. اگر چه موارد

مذکور روی نمودار لگاریتمی مشتق فشار دیده نشد. شیب منفی $\frac{1}{p}$ که عمدتاً مربوط به نفوذ جزئی می‌شود روی هیچ‌کدام از منحنی‌های مشتق فشار و مشتق فشار دی‌کانوالو شده مربوط به داده‌های چاه‌آزمایی بعد از اسیدکاری مشاهده نگردید. بنابراین، محرز گردید در زمان تکمیل چاه، تمامی زون‌های مخزنی دارای پتانسیل بالا به درستی مشبک‌کاری گردیده‌اند. مشاهده شیب منفی $\frac{1}{p}$ روی نمودارهای مشتق فشار قبل از اسیدکاری ناشی از اثر ضریب پوسته بالا است که می‌تواند عمدتاً بخاطر پدیده‌های ناشی از تولید، همانند مواد رادیواکتیو ایجاد شده بصورت طبیعی باشد. مقایسه بین پرتو گاما نمودارهای حفره باز و حفره بسته (نمودارهای پتروفیزیکی و نمودار تولید به ترتیب) وجود پدیده طبیعی را در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰) تأیید نمود.

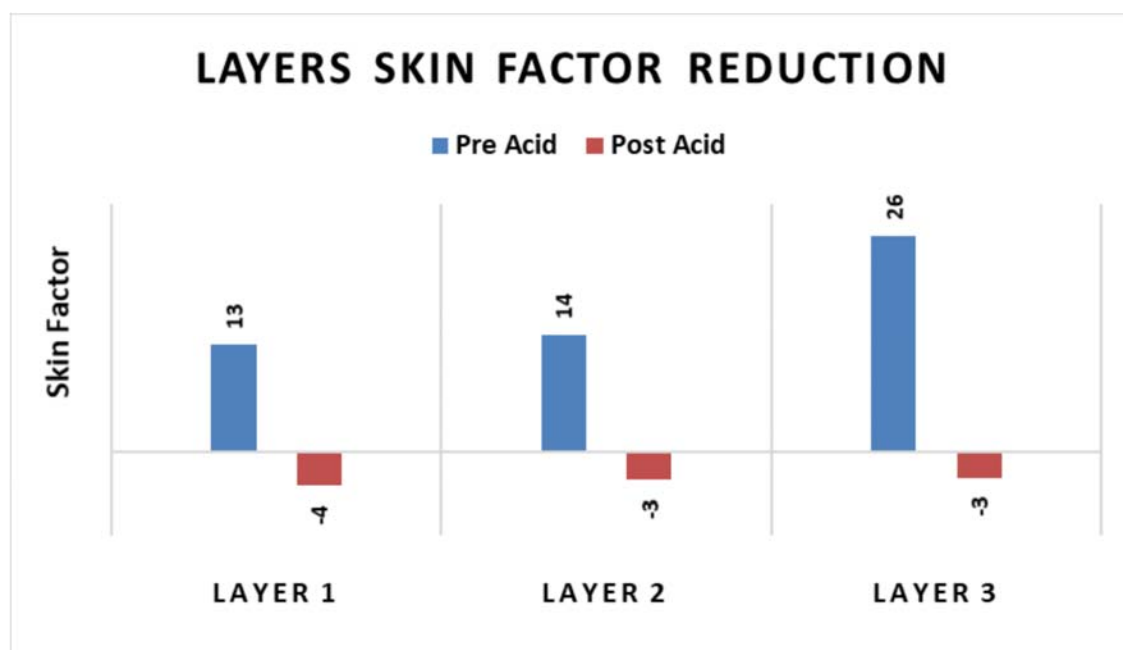
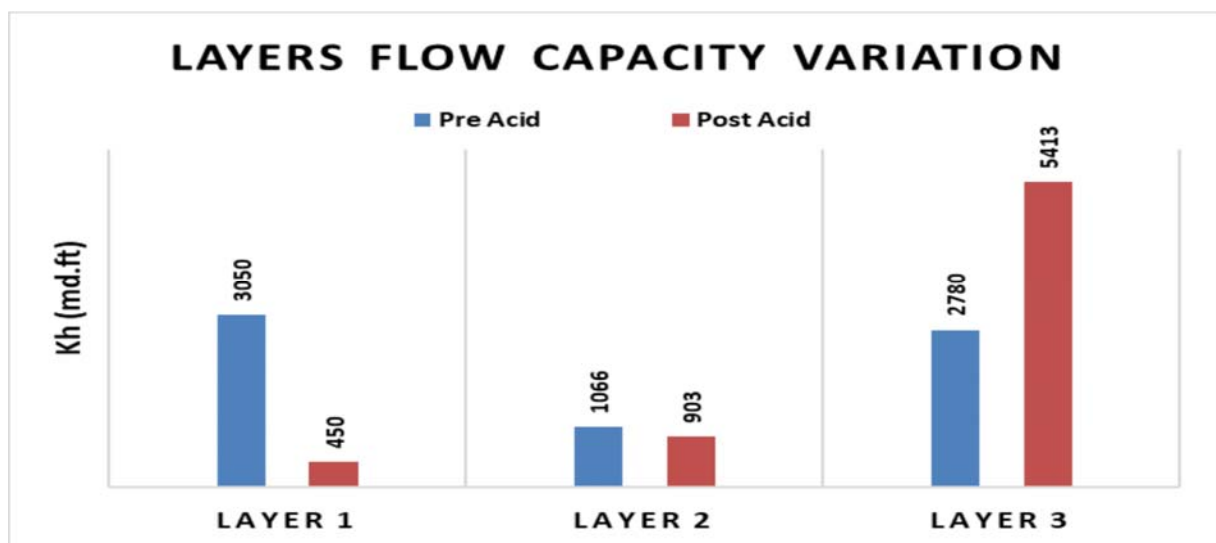




شکل ۲-۱۶: آنالیز فشار گذرا بعد از اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف
 (الف) منحنی‌های افت فشار و مشتق افت فشار، (ب) مشاهده دو جریان شعاعی روی
 نمودار مشتق فشار دی کانوالو شده (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

بر اساس نتایج تحلیل اطلاعات قبل و بعد از اسیدکاری در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰)، شاخص بهره‌دهی و فشار جریانی چاه برای هر لایه مخزن به خوبی بهبود پیدا کرده است. با این وجود، پایین‌ترین لایه با داشتن بالاترین فشار متوسط مخزن به میزان قابل توجهی تحت تأثیر اسیدکاری قرار گرفته است. بعد از تحریک چاه، ضریب پوسته برای لایه مخزنی فشار بالا به شدت کاهش یافته و ظرفیت جریانی (محصول kh) آن بهبود بسیار خوبی یافته است (شکل ۲-۱۷).

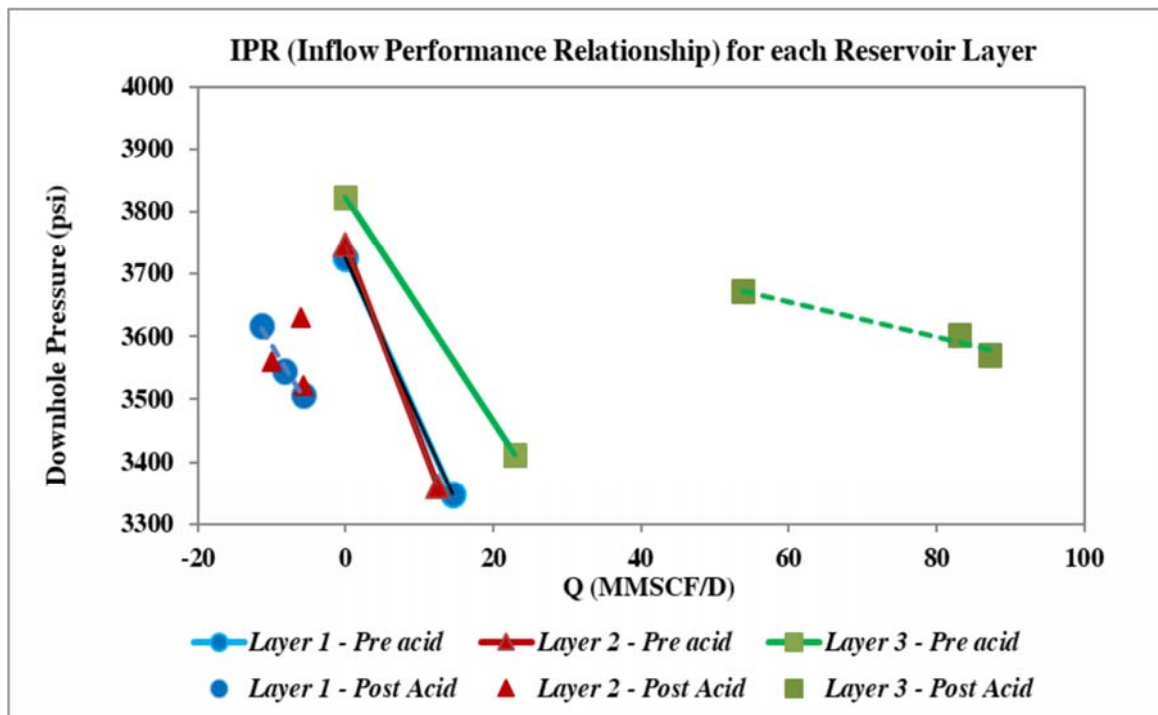
نتایج آزمایشات سرچاهی نشان داد که شاخص بهره‌دهی کل بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰)؛ حدود ۲/۹ برابر افزایش یافته است. علاوه بر این، در دبی ثابت ۱۰۰ م.ف.م.ر فشار جریانی سرچاهی حدود ۶۲۳ پام افزایش پیدا کرد. بطور کلی، استفاده از انواع داده‌ها و روش‌های مختلف تحلیل اطلاعات این امکان را فراهم نمود به نتایج قابل اطمینان‌تری دست یافت. اگرچه نتایج آنالیز فشار گذرا بعد از اسیدکاری به دلیل ناپدید بودن فشار جریانی و نرخ جریان متقاطع زیاد بین لایه‌ها عدم قطعیت‌هایی در بر داشته است.



شکل ۲-۱۷: ظرفیت جریان (الف) و ضریب پوسته (ب) لایه‌های مخزنی مختلف (قبل و بعد از عملیات اسیدکاری) (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

نمودار عملکرد مخزن برای هر لایه، با استفاده از آنالیز عملکرد جریان انتخابی؛ قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی توسط گراوند و همکاران (۱۴۰۰) محاسبه گردیده است (شکل ۲-۱۸). فشار جریانی ته‌چاهی و سهم مشارکت دبی هر کدام از لایه‌های مخزنی از نتایج تفسیر نمودارهای تولید بدست آمد. نتایج عملکرد جریان انتخابی در پژوهش گراوند و همکاران (۱۴۰۰) نشان داده است که پایین‌ترین لایه در مقایسه با دو لایه دیگر، بسیار

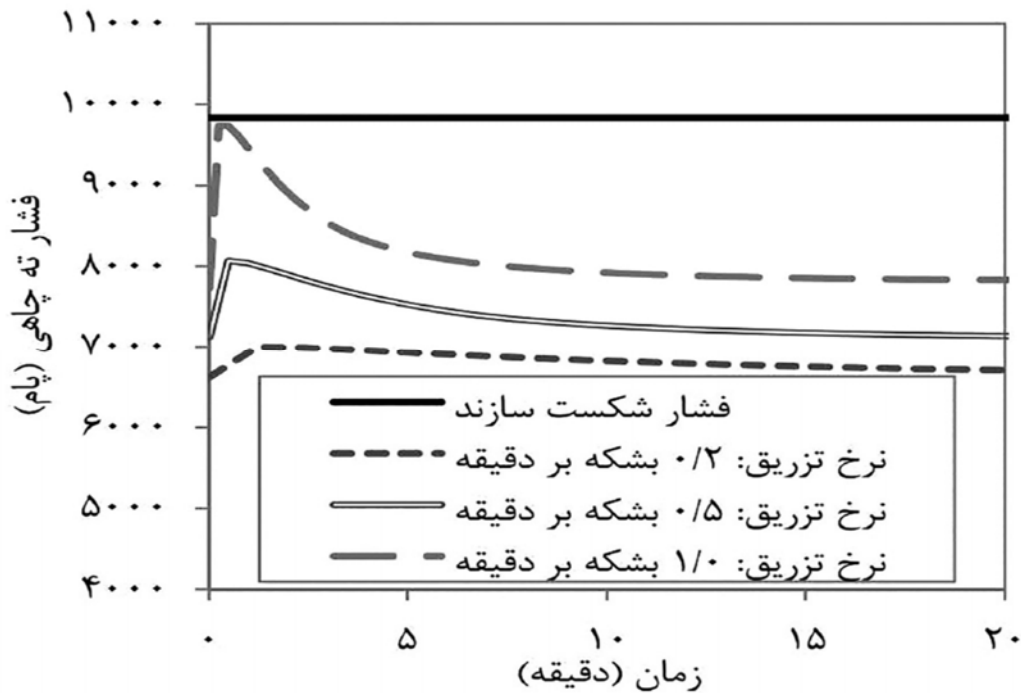
بیشتر تحت تأثیر تحریک چاه قرار گرفته است. علاوه بر این، دبی منفی لایه ۱ و ۲ بیانگر اثر جریان متقاطع در این دو لایه است که فشار مخزنی پایین تری نسبت به لایه ۳ دارند.



شکل ۲-۱۸: نمودار عملکرد مخزن برای لایه‌های مختلف، نتایج آنالیز عملکرد جریان انتخابی قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی (گراوند، نخعی و عباسی، ۱۴۰۰)

۲-۵-۳ شبیه‌سازی تزریق بهینه اسیدهای قوی و ضعیف در مخازن کربناته شکافدار

در مرحله اول، حداکثر تزریق‌پذیری ناحیه تولیدی، بدون ایجاد شکاف، مورد مطالعه نظری صارم و مرادی (۱۴۰۰) قرار گرفته است. شکل (۲-۱۹)؛ نشانگر نحوه تغییر فشار ته‌چاهی در هنگام تزریق اسید هیدروکلریک ۱۵٪ است. مطابق با این شکل، فشار ته‌چاهی در ابتدا روند افزایشی داشته و سپس نزولی می‌شود. با شروع تزریق سیال، افزایش فشار ته‌چاهی طبیعی است. البته به علت تراکم‌پذیری سیال، این افزایش فشار به صورت لحظه‌ای نبوده و در طول مدت زمان کوتاهی صورت گرفته است. در ادامه به علت واکنش اسید با سنگ و افزایش تراوایی محیط، مقاومت در برابر تزریق کاهش یافته و فشار ته‌چاهی نیز به تبع آن کاهش یافته است.



شکل ۲-۱۹: نمودار جریان فرآیندی فرآیند در نرم افزار ASPEN HYSYS (نظری صارم و مرادی، ۱۴۰۰)

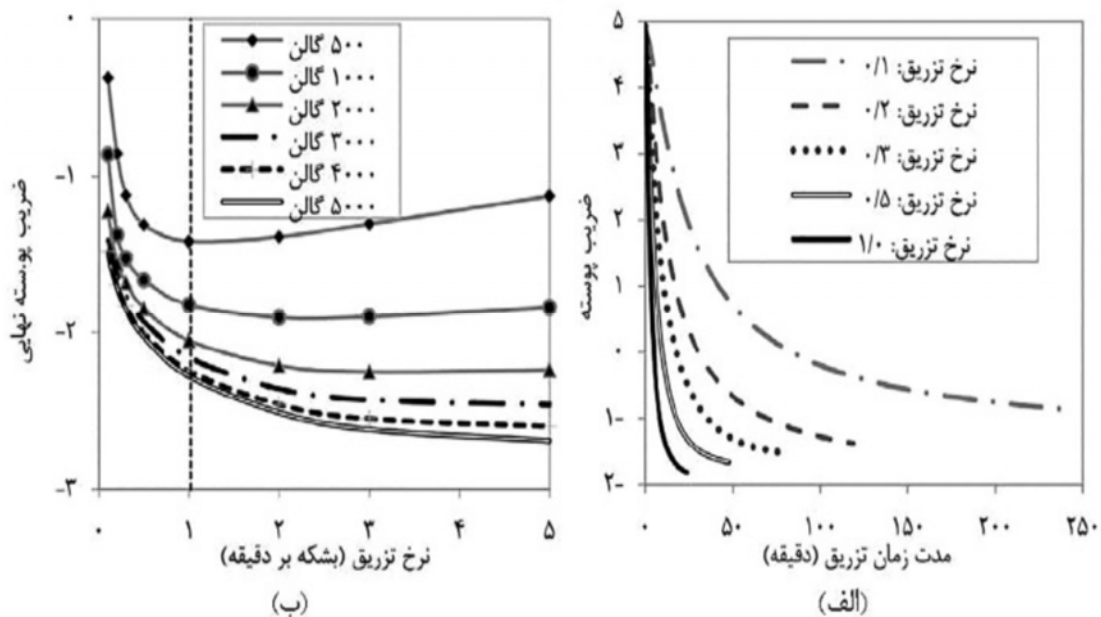
مطابق با این شکل، حداکثر دبی قابل تزریق، به صورت تقریبی برابر با ۱ بشکه بر دقیقه است. شکل (۲-۱۹) در واقع نشانگر وجود یک دبی حداکثری برای تزریق اسید است، به شکلی که در دبی‌هایی بالاتر از این مقدار، سازند مورد بررسی شکاف خواهد خورد که مسئله نامطلوبی برای فرآیند اسیدکاری محسوب می‌شود. لذا ضروری است تا تزریق اسید در دبی‌هایی پایین‌تر از این دبی بحرانی صورت پذیرد. لازم به ذکر است که به منظور ایجاد امکان تزریق اسید با نرخ‌های بالاتر از ۱ بشکه بر دقیقه، در ابتدا می‌توان حجم محدودی از اسید را با نرخ ۱ رل بر دقیقه تزریق کرد و پس از افزایش نسبی تراوایی نواحی اطراف چاه و افت فشار ته‌چاهی، نرخ تزریق اسید را بالاتر برد. در این حالت باید پارامترهایی همچون حجم اسید تزریقی در هر مرحله، تعداد مراحل و میزان افزایش نرخ تزریق در هر مرحله، مورد بررسی قرار گیرند. یافتن دبی بهینه تزریق، نیازمند شبیه‌سازی تزریق اسید در دبی‌های متفاوت و بررسی نحوه تغییرات ضریب پوسته نهایی است. به طور کلی در نرخ‌های تزریق بسیار پایین اسید، شاهد انحلال سنگ به صورت کامل^۱ خواهیم بود. این مسئله باعث ناپایداری نواحی اطراف چاه می‌شود و امکان ریزش این نواحی را در پی خواهد داشت که باعث بسته شدن مسیره‌های عبور سیال می‌گردد.

^۱. Face Dissolution

در نرخ‌های تزریق بالاتر، شاهد ایجاد و پیشروی مسیرهای کرمی شکل خواهیم بود. ایجاد این مسیرهای پرتروا که از ناحیه آسیب دیده عبور کرده و ارتباط بین چاه و مخزن را برقرار می‌کنند، حالت مطلوب فرآیند اسیدکاری است و رسیدن به یک ضریب پوسته منفی‌تر با تزریق کمترین حجم از اسید را میسر می‌کند. ولی در نرخ‌های تزریق بسیار بالا، زمان در تماس بودن اسید و سنگ کاهش می‌یابد. در این حالت، محلول اسیدی تزریق شده فرصت واکنش مؤثر با سنگ در ناحیه آسیب دیده را نخواهد داشت و در نتیجه افزایش تخلخل کمی حاصل خواهد شد.

در این نرخ‌های تزریق بسیار بالا، شاهد الگوی انحلال یکنواخت خواهیم بود و بیشتر حجم اسید تزریقی هدر خواهد رفت. با توجه به الگوهای انحلال شرح داده شده، انتظار می‌رود که به ازای تزریق حجم مشخصی از اسید در نرخ‌های تزریق متفاوت، نمودار ضریب پوسته برحسب دبی تزریقی، یک روند نزولی و سپس صعودی را داشته باشد. نقطه کمینه این نمودار به شکل تقریبی مشخص کننده نرخ بهینه تزریق اسید است که معادل با حالت شکل‌گیری مسیرهای کرمی شکل است.

این مسئله در شکل (۲-۲۰) توسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) نمایش داده شده است. نتایج حاصل از این شکل نشان می‌دهند که با افزایش دبی تزریقی از ۱/۰ بشکه بر دقیقه تا ۱ بشکه بر دقیقه، ضریب پوسته نهایی همچنان کاهش می‌یابد (شکل ۲-۲؛ الف). دلیل این امر این است که دبی بهینه تزریق به صورت تقریبی، بالاتر از ۱ بشکه بر دقیقه است. به شکلی که با افزایش دبی تزریق اسید تا ۱ بشکه بر دقیقه، کماکان ضریب پوسته نهایی در حال کاهش است. در واقع با نزدیک‌تر شدن به دبی تزریق بهینه اسید، الگوی انحلال به الگوی انحلال مربوط به شکل‌گیری مسیرهای کرمی شکل نزدیک‌تر می‌شود. در نتیجه بازده عملیات اسیدکاری افزایش یافته و ضریب پوسته پایانی عدد کوچکتری خواهد بود. شکل (۲-۲۰؛ ب) نشانگر ضریب پوسته نهایی برحسب دبی تزریق، به ازای تزریق حجم‌های متفاوتی از هیدروکلریک اسید ۱۵٪ است. این شکل وجود دبی‌های بهینه تزریق را نشان می‌دهد. در واقع نقطه کمینه نسبی نمودارها که نشانگر منفی‌ترین ضریب پوسته قابل دستیابی است، نشانگر حالات بهینه هستند. در واقع تزریق اسید با دبی‌هایی بسیار پایین (برای مثال، دبی ۱/۰ بشکه بر دقیقه) الگوی انحلال کامل سنگ را در پی خواهد داشت.

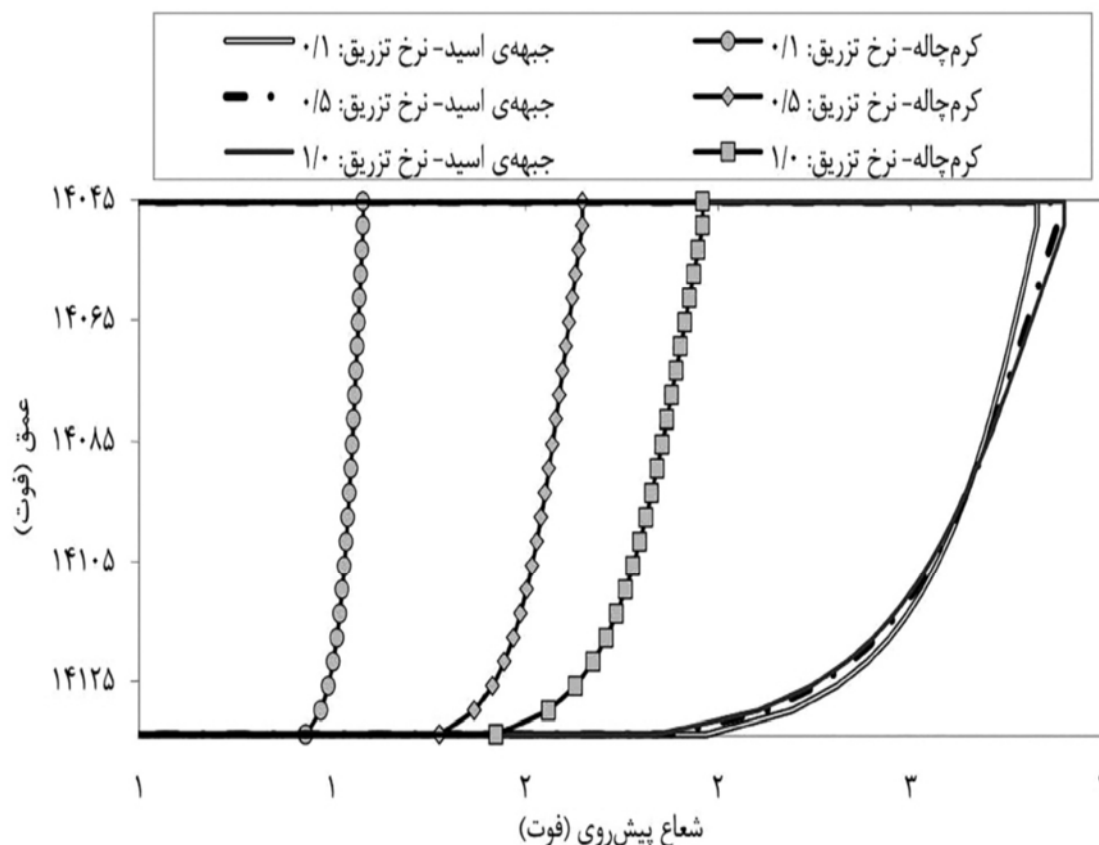


شکل ۲-۲۰: تغییرات ضریب پوسته سازند کربناته در هنگام تزریق هیدروکلریک اسید ۱۵٪؛

الف- نمودارهای تغییرات ضریب پوسته برحسب زمان در هنگام تزریق ۱۰۰۰ گالن اسید با دبی‌های تزریق متفاوت و ب- ضریب پوسته نهایی برحسب دبی تزریق، به ازای تزریق هیدروکلریک اسید با حجم‌های متفاوت (نظری صارم و مرادی، ۱۴۰۰)

همچنین، در نرخ‌های تزریق بسیار بالا (برای مثال، ۵ بشکه بر دقیقه)؛ نیز الگوی انحلال یکنواخت به وجود می‌آید که باعث هدررفت اسید می‌گردد. خط چین عمودی رسم شده در شکل (۲-۲۰؛ ب) نشانگر بالاترین دبی مجاز برای تزریق اسید می‌باشد. در دبی‌هایی بالاتر از این مقدار، فشار ته‌چاهی از فشار شکست سازند فراتر خواهد رفت. با توجه به این شکل، مقدار دبی بهینه تزریق (نقطه کمینه نسبی نمودارها)، تا حدی بیشتر از حداکثر دبی قابل اعمال (خط چین عمودی) می‌باشد. لذا دبی مطلوب تزریق هیدروکلریک اسید، همان بیشترین دبی قابل اعمال خواهد بود. همان طور که مشخص است، نقطه کمینه نمودارهای مختلف (شبه سازی برای حجم‌های اسید مختلف)، متفاوت است (شکل ۲-۲۰؛ ب). این نقطه کمینه نمودارها برای حجم‌های بیشتر اسید، به سمت راست جابه‌جا می‌گردد. در واقع به هنگام تزریق حجم بیشتری از اسید، قاعدتاً شعاع گسترش اسید نیز افزایش می‌یابد که کاهش سرعت در جبهه حرکت اسید را در پی خواهد داشت. لذا برای حفظ سرعت بهینه در جبهه مسیره‌های کرمی شکل، نیازمند تزریق اسید با نرخ بالاتری هستیم. برای نشان دادن تأثیر نرخ تزریق بر میزان پیش روی اسید و مسیره‌های کرمی، نتایج حاصل از شبی هساز یها برای تزریق ۱۰۰۰ گالن از هیدروکلریک اسید ۱۵٪ با دبی‌های متفاوت تزریقی در شکل (۲-۲۱) توسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) رسم شده است. همان گونه که مشاهده

می‌شود، شعاع پیشروی اسید در محیط متخلخل برحسب عمق تغییر می‌کند. این مسئله متأثر از مقدار متغیرهایی است که بر توزیع فشار در داخل ستون چاه و داخل مخزن تأثیرگذار هستند. در واقع مجموعه عواملی همچون چگالی و گرانیوی سیال مخزن و اسید تزریقی، نرخ تزریق، محل تزریق اسید و میزان تراوایی محیط متخلخل بر شکل نهایی جبهه پیش روی اسید در محیط متخلخل تأثیرگذار هستند. مشابه بودن جبهه نهایی اسید در نمودارهای شکل (۲-۲۱) به علت برابر بودن حجم اسید تزریقی (۱۰۰۰ گالن) است و عدم تطابق کامل این نمودارها به علت تفاوت در نرخ تزریق اسید است. پیش‌بینی این شبیه ساز برای میزان گسترش مسیرهای گرمی شکل، تا حدی قابل توجهی وابسته به دبی تزریق اسید است. با افزایش نرخ تزریق از ۰/۱ تا ۱ بشکله بر دقیقه، شعاع گسترش مسیرهای گرمی شکلدر پژوهش نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) بیش از ۱/۵ برابر شده است.



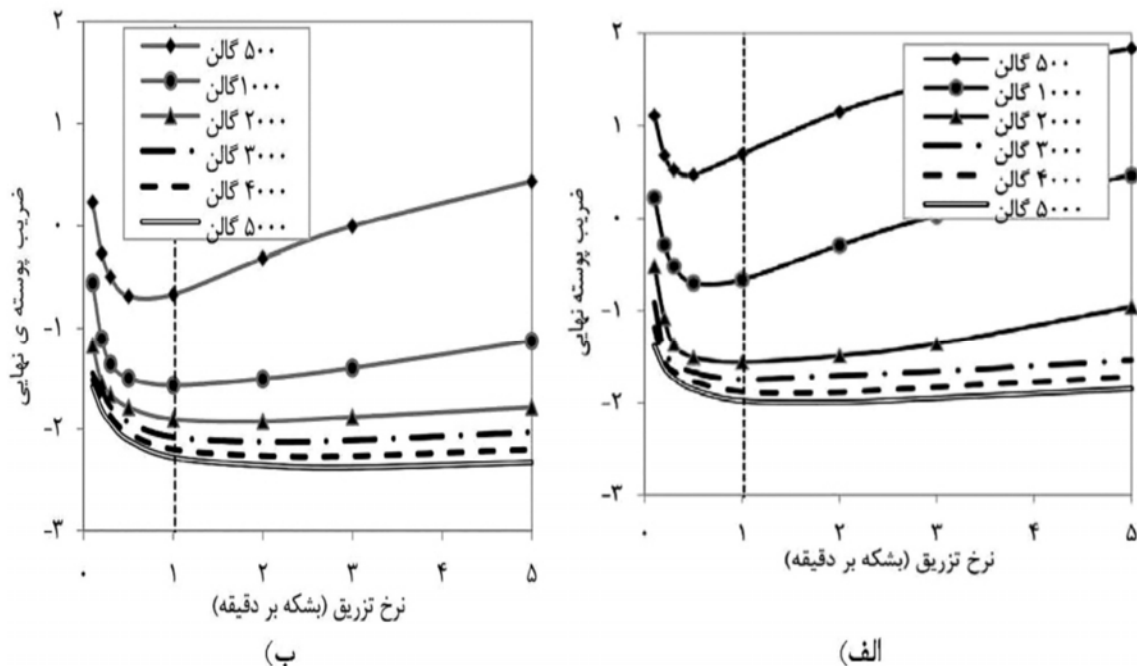
شکل ۲-۲۱: نمودارهای شعاع پیش روی جبهه اسید و جبهه مسیرهای گرمی شکل پس از تزریق ۱۰۰۰ گالن از هیدروکلریک اسید ۱۵٪ با دبی‌های متفاوت تزریق در ناحیه تولیدی اول (نظری صارم و مرادی، ۱۴۰۰)

عموماً تمایل بیشتری برای استفاده از اسیدهای قوی برای دستیابی به بهره‌دهی بیشتر وجود دارد. ولی در برخی از موارد، به علت بالا بودن احتمال خوردگی تجهیزات و ایجاد رسوب‌های مختلف، استفاده از هیدروکلریک اسید میسر نیست. در این موارد استفاده از اسیدهای ضعیف می‌تواند جایگزین مناسبی باشد. لذا بررسی نحوه عملکرد این اسیدها نیز با اهمیت است. در این بخش میزان تأثیر دو اسید ضعیف (استیک اسید و فرمیک اسید) بر رفع آسیب سازند، مورد بررسی نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) قرار گرفته است. اسیدهای ضعیف عموماً به شکل جزئی یونیزه می‌شوند. میزان یونیزه شدن این اسیدها وابسته به مقدار ثابت تعادل واکنش مربوطه است. شکل (۲-۲۲)؛ نشانگر میزان ضریب پوسته‌نهایی در ناحیه تولیدی، پس از تزریق استیک اسید و فرمیک اسید با غلظت ۱۲٪ می‌باشد. در واقع در این شکل، تأثیر حجم و دبی تزریق بر عملکرد این دو اسید ضعیف توسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰)؛ بررسی شده است. با توجه به این شکل، افزایش حجم اسید تزریقی تا ۳۰۰۰ گالن (معادل ۳۴ گالن بر دقیقه)، سبب کاهش ضریب پوسته گردیده است ولی در صورت تزریق حجم‌های بالاتری از این اسیدها، تغییر محسوسی در ضریب پوسته پایاندر پژوهش نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) مشاهده نگردیده است.

برای هر دو اسید مورد بررسی، میزان نرخ تزریق بهینه اسید، پایین‌تر از میزان دبی بحرانی به دست آمده است. سرعت انحلال سنگ آهک در هنگام تزریق استیک اسید و فرمیک اسید کمتر از سرعت انحلال این سنگ در مجاورت هیدروکلریک اسید در پژوهش نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰)؛ بوده است. علت این امر به خاطر یونیزه شدن جزئی این اسیدهای ضعیف است که تولید یون هیدروژن کمتر و سرعت واکنش پایین‌تر را به دنبال دارد. در نتیجه مدت زمان بیشتری برای واکنش مؤثر سنگ آهک و اسید به منظور تشکیل مسیره‌های کرمی شکل مورد نیاز است. قاعدتاً حرکت اسید با سرعت پایین‌تر در محیط متخلخل، این زمان را برای انحلال مؤثر سنگ آهک فراهم می‌آورد.

به همین دلیل، نرخ تزریق بهینه به دست آمده برای اسیدهای ضعیف (شکل ۲-۲۲) کمتر از نرخ تزریق بهینه به دست آمده برای هیدروکلریک اسید است (شکل ۲-۲۰؛ ب). این امر با نتایج به دست آمده در مطالعات مربوط به مقیاس مغزه مطابقت دارد.

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۲-۲۲؛ الف و ب) نشان می‌دهد که میزان ضریب پوسته‌نهایی به دست آمده پس از تزریق فرمیک اسید کمتر از مقدار به دست آمده برای استیک اسید می‌باشد. دلیل این امر ضعیف‌تر بودن استیک اسید نسبت به فرمیک اسید می‌باشد. ثابت یونیزه شدن استیک اسید کوچکتر از فرمیک اسید است.

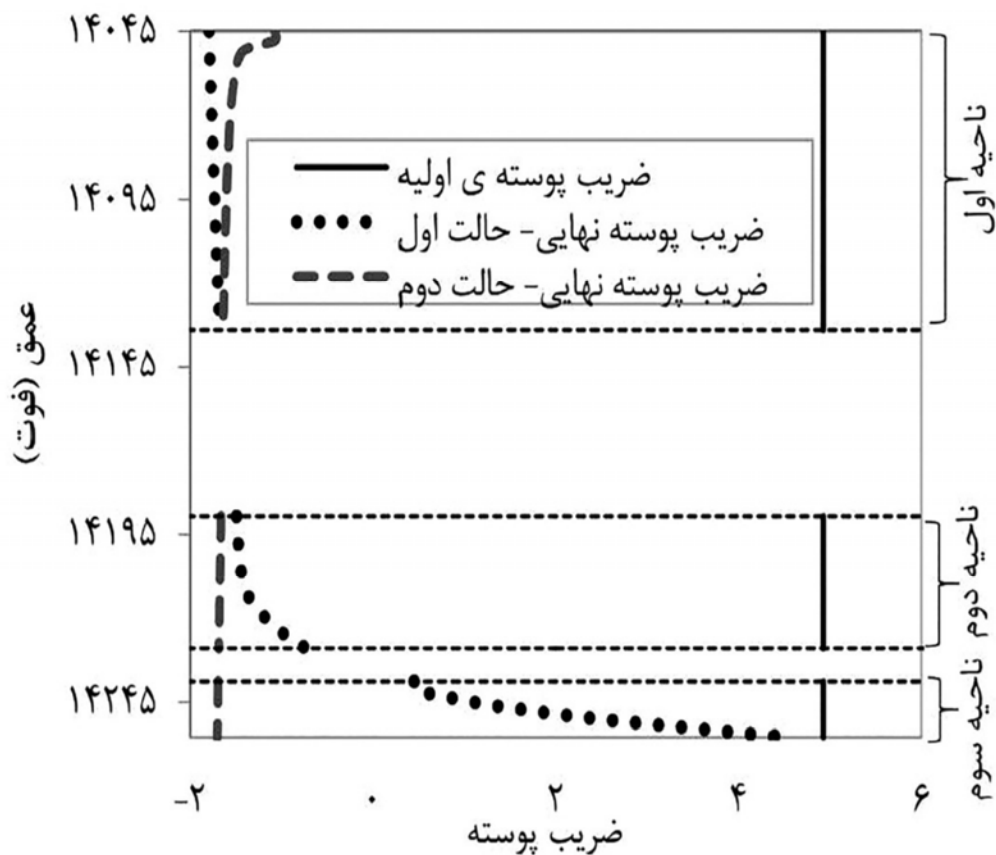


شکل ۲-۲۲: نمودارهای ضریب پوسته نهایی بر حسب دبی تزریقی به ازای تزریق حجم‌های متفاوتی از دو اسید مختلف: الف) تزریق استیک اسید و ب) تزریق فرمیک اسید (نظری صارم و مرادی، ۱۴۰۰)

لذا استیک اسید، کمتر یونیزه می‌شود که تولید یون هیدروژن کمتری را در پی خواهد داشت. در نتیجه واکنش کمتر و تدریجی‌تری را در هنگام تزریق این اسید شاهد خواهیم بود. مقایسه دبی‌های تزریق بهینه به دست آمده در شکل (۲-۲۲) (برای اسیدهای ضعیف) با نرخ‌های تزریق بهینه به دست آمده در شکل (۲-۲۰؛ ب) (برای اسید قوی) نشان می‌دهد که استفاده از اسیدهای ضعیف در این سازندها در پژوهش نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) بر استفاده از هیدروکلریک اسید ارجحیت دارد. در شکل (۲-۲۰؛ ب) (هیدروکلریک اسید) نقطه کمینه نمودارها عموماً مربوط به نرخ‌های تزریق بالاتر از ۱ بشکه بر دقیقه هستند. همان گونه که شرح داده شد، امکان تزریق هیدروکلریک اسید با این نرخ‌های تزریق به علت بالاتر رفتن فشار ته‌چاهی از فشار شکست سازند وجود ندارد. اگر تزریق هیدروکلریک اسید در دبی‌هایی پایین‌تر از نرخ تزریق بهینه صورت گیرد، احتمال انحلال کامل سنگ وجود دارد. لذا تزریق هیدروکلریک اسید با حداکثر دبی مجاز (۱ بشکه بر دقیقه) نیز می‌تواند منجر به انحلال کامل نواحی اطراف چاه شود و یا الگوهای مشابه با الگوی انحلال کامل ایجاد گردد که کاهش شدید بازده عملیات را در پی خواهد داشت. ولی با توجه به شکل (۲-۲۰؛ ب)، نرخ تزریق بهینه به دست آمده است.

برای اسیدهای ضعیف، کمتر از حداکثر نرخ تزریق مجاز (۱ بشکه بر دقیقه) است. لذا تزریق اسیدهای ضعیف در حالت بهینه می‌تواند منجر به ایجاد مسیرهای گرمی شکل شود که نتیجه مطلوبی برای فرآیند اسیدکاری به شمار می‌رود.

در این بخش، تأثیر محل تزریق اسید بر نحوه پیش روی اسید و گسترش مسیرهای گرمی شکل در سه ناحیه تولیدیتوسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از لوله مغزی سیار در شبیه‌سازی‌ها بهره گرفته شده است. لوله مغزی سیار می‌تواند در هنگام تزریق اسید به شکل متحرک باشد. لذا، محل ورود اسید از درون لوله مغزی به درون ستون چاه قابل کنترل است. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این بخش، ورود اسید به هر سه ناحیه تولیدی توسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که حداکثر نرخ تزریق قابل اعمال، بدون ایجاد شکست در سازندها، برابر با ۱/۸ بشکه بر دقیقه است. در حالت اول، تزریق ۱۰۰۰ گالن هیدروکلریک اسید ۱۵٪ از بالای نواحی تولیدی (عمق ۱۴۰۴۵ فوت) توسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) شبیه‌سازی شده است. در این حالت، لوله مغزی سیار، بدون حرکت بوده است. در حالت دوم، لوله مغزی سیار در هنگام اسیدکاری به صورت متحرک در نظر گرفته شده است. به شکلی که انتهای این لوله مغزی در حین فرآیند تزریق اسید، از عمق ۱۴۲۶۵ (پایین لایه‌های تولیدی) تا عمق ۱۴۰۴۵ (بالای لایه‌های تولیدی) با سرعت ثابت حرکت کرده است. شکل (۲-۲۳) نحوه توزیع ضریب پوسته نهایی در طول سه بخش تولیدی در پژوهش نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰)، پس از تزریق اسید با دو الگوی متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در پایان شبیه‌سازی اول (تزریق اسید از عمق ۱۴۰۴۵ فوت و بدون حرکت دادن لوله مغزی سیار)، توزیع ضریب پوسته نهایی برحسب عمق دارای الگوی یکنواختی نیست. به شکلی که در ناحیه اول، نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) بیشترین مقدار کاهش ضریب پوسته را شاهد بوده‌اند و در ناحیه سوم کمترین مقدار کاهش ضریب پوسته مشاهده نمودند. این امر به علت توزیع غیریکنواخت سیال تزریقی در سه ناحیه مختلف بوده است. در واقع در این حالت، ناحیه اول، نزدیک‌ترین نقطه به محل تزریق اسید است. لذا با شروع فرآیند، بخشی از اسید تزریقی وارد این ناحیه شده و سبب افزایش تراوایی آن می‌گردد، مشخص است.



شکل ۲-۲۳: توزیع ضریب پوسته نهایی در طول نواحی تولیدی پس از پایان اسیدکاری سازند با دو الگوی متفاوت به هنگام تزریق ۱۰۰۰ گالن هیدروکلریک اسید ۱۵٪: (حالت اول) در طول فرآیند تزریق اسید، انتهای لوله مغزی سیار در عمق ۱۴۰۴۵ فوت به شکل ثابت قرار گرفته است و (حالت دوم) انتهای لوله مغزی سیار از عمق ۱۴۲۵۵ فوت تا عمق ۱۴۰۴۵ فوت در حین تزریق اسید جابه جا می‌گردد (نظری صارم و مرادی، ۱۴۰۰)

که این افزایش تراوایی در ناحیه اول، منجر به تسهیل ورود اسید بیشتر به این ناحیه خواهد شد. در مقابل، ناحیه سوم در شکل (۲-۲۳)، دورترین نقطه به محل تزریق اسید می‌باشد. لذا مدت زمانی طول می‌کشد تا اسید تزریقی به این ناحیه رسیده و وارد آن گردد. همین مسئله باعث می‌شود که ضریب پوسته نهایی ناحیه اول نسبت به ناحیه سوم عدد منفی تری باشد. به شکلی که پس از تزریق ۱۰۰۰ گالن از هیدروکلریک اسید، همچنان ضریب پوسته در بخش‌های عمده‌ای از ناحیه سوم مثبت می‌باشد. در حالت دوم از لوله مغزی سیار توسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) استفاده شده است تا اسید تزریقی به شکل یکنواخت‌تری در هر سه ناحیه توزیع گردد و تا حد

امکان، ضریب پوسته هر سه ناحیه تولیدی در پایان فرآیند، کوچکتر از صفر باشد. در واقع در شروع فرآیند اسیدکاری، انتهای لوله مغزی در انتهای چاه قرار گرفته است (عمق تقریبی ۱۴۲۵۵ فوت) و در هنگام تزریق ۱۰۰۰ گالن هیدروکلریک اسید، لوله مغزی سیار با سرعت ثابت به سمت بالا جابه‌جا می‌گردد. نتایج این شبیه‌سازی (شکل ۲-۲۳) نشان می‌دهد که در این حالت، ضریب پوسته هر سه ناحیه مورد بررسی منفی شده است که نشان‌گر بهینه‌تر بودن فرآیند اسیدکاری در این حالت است. در واقع اجرای این الگوی تزریق اسید باعث شده است که حجم اسید وارد شده به هر فوت از نواحی مختلف تولیدی، عدد مشابهی باشد که حالت نسبتاً مطلوبی به شمار می‌آید. در جدول (۲-۴) ضریب پوسته‌های به دست آمده برای سه ناحیه تولیدی، پس از تزریق اسید با استفاده از دو الگوی مختلف ذکر شده توسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰)، آورده شده است.

جدول ۲-۴: پارامترهای مورد بررسی در آنالیز حساسیت‌های انجام شده (نظری صارم و مرادی، ۱۴۰۰)

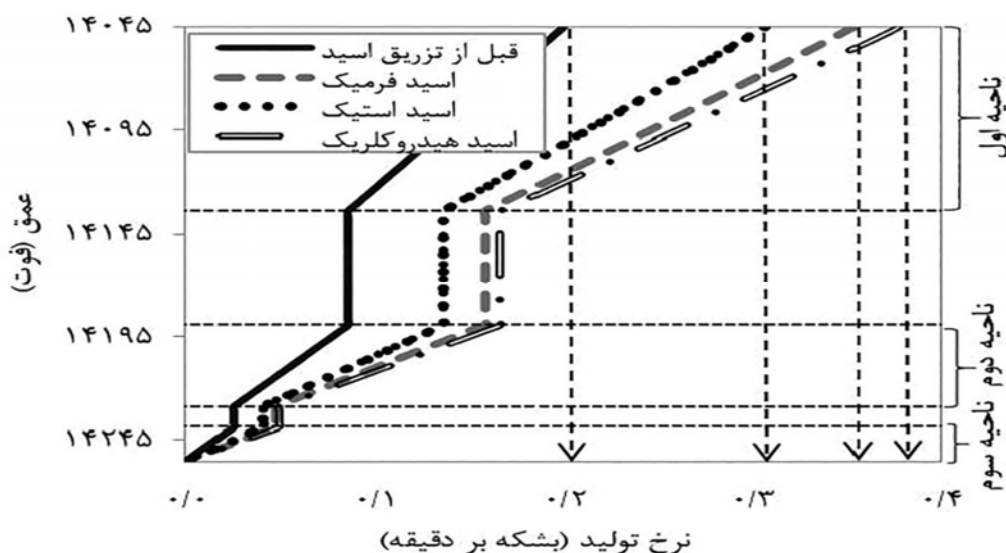
پارامترها و موارد مورد بررسی	توضیحات و محدوده متغیرها
نوع اسید تزریق شده	هیدروکلریک اسید، استیک اسید و فرمیک اسید
محل تزریق اسید	تزریق از نقطه بالایی لایه‌های تولیدی استفاده از لوله مغزی سیار متحرک در طول ناحیه تولیدی
حجم اسید تزریقی (فوت بر گالن)	۵ - ۵۷
نرخ تزریق اسید (بشکه بر دقیقه)	۱ - ۰/۵

در مرحله بعدی، تزریق ۱۰۰۰ گالن از هیدروکلریک اسید، فرمیک اسید و استیک اسید با غلظت ۱۲٪ شبیه‌سازی و مقایسه شده است. در این موارد نیز لوله مغزی سیار به صورت متحرک در نظر گرفته شده است و در حین تزریق اسید، از انتهای ناحیه سوم تا ابتدای ناحیه اول حرکت کرده است. همان گونه که در جدول (۲-۵) مشخص شده است این فرآیند تزریق، برای نرخ‌های تزریق مختلف تکرار شده است و نتایج شبیه‌سازی‌ها توسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) نشان می‌دهند که دبی بهینه تزریق برای فرمیک اسید و استیک اسید به ترتیب برابر با ۱/۷ و ۱/۲ بشکه بر دقیقه است. همچنین، تزریق هیدروکلریک اسید نیز با نرخ تزریق ۱/۸ بشکه بر دقیقه (حداکثر نرخ تزریق قابل اعمال) توسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) شبیه‌سازی شده است.

جدول ۲-۵: ضریب پوسته نهایی در نواحی مختلف تولیدی پس از پایان تزریق اسید
(نظری صارم و مرادی، ۱۴۰۰)

ضریب پوسته نهایی		نواحی تولیدی
حالت دوم: استفاده از لوله مغزی بسیار متحرک	حالت اول: تزریق اسید از یک نقطه ثابت	نوع اسید تزریق شده
-۱/۶	-۱/۷	ناحیه اول
-۱/۷	-۱/۳	ناحیه دوم
-۱/۷	۲/۰	ناحیه سوم

نتایج پایانی شبیه‌سازی تزریق این سه اسید با نرخ های تزریق ذکر شده توسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰)، در شکل (۲-۲۴) آورده شده است. در این شکل، نرخ تولید تجمعی نفت در طول سه ناحیه تولیدی، به ازای فشار ته چاهی ۵۵۰۰ پوند بر اینچ مربع رسم شده است. قبل از تزریق اسید، نرخ تولید در فشار ته چاهی ۵۵۰۰ پوند بر اینچ مربع، برابر با ۳۰۰ بشکه در روز (معادل ۰/۲ بشکه در دقیقه) بوده است. با توجه به این نمودارها، تزریق بهینه هیدروکلریک اسید، فرمیک اسید و استیک اسید می‌تواند منجر به افزایش نرخ تولید به ۵۴۴، ۵۱۱ بشکه در روز (معادل ۰/۳۷ و ۰/۳۵ بشکه بر دقیقه) گردد.



شکل ۲-۲۴: نمودار دبی تجمعی تولیدی بر حسب عمق در قبل و بعد از اسیدکاری سازندها با دو اسید مختلف
(نظری صارم و مرادی، ۱۴۰۰)

در جدول (۲-۶) اطلاعات تکمیلی در ارتباط با درصد افزایش تولید نفت پس از تزریق اسیدهای مختلف توسط نظری صارم و همکاران (۱۴۰۰) آورده شده است. در واقع مشخص گردیده است که پس از انجام اسیدکاری، نرخ تولید نفت در هر لایه چند درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها (توضیحات مربوط شکل (۲-۱۸)، در صورت استفاده از هیدروکلریک اسید، امکان انحلال سنگ به شکل کامل وجود دارد. لذا، علی‌رغم دست‌یابی به نرخ تولید نفت مناسب در صورت اسیدکاری سازندها با هیدروکلریک اسید (شکل (۲-۲۴)، استفاده از این اسید در این سازندها توصیه نمی‌شود. در واقع در سیستم مورد بررسی، استفاده از اسیدهای ضعیف ارجحیت خواهند داشت.

جدول ۲-۶: نمودار دبی تجمعی تولیدی بر حسب عمق در قبل و بعد از اسیدکاری سازندها با دو اسید مختلف (نظری صارم و مرادی، ۱۴۰۰)

سیال اسیدی	ناحیه اول (%)	ناحیه دوم (%)	ناحیه سوم (%)
هیدروکلریک اسید	۸۵	۸۸	۸۹
فرمیک اسید	۷۲	۷۹	۸۰
استیک اسید	۴۸	۵۳	۵۵

۲-۶ تعامل شکاف و اسید

با توجه به این که اکثر مخازن نفتی ایران از نوع شکافدار می‌باشند؛ اطلاعات کافی در این زمینه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بایستی سعی شود تمامی مکانیزم‌های جابجایی نفت در بازیافت اولیه و مخصوصاً بازیافت ثانویه و نیز تخمین اندازه بلوک سنگ مخزن برای تعیین پارامترهای لازم به منظور استفاده در شبیه‌سازی‌های مهندسی مخازن^۱ و نیز بررسی بلوک‌های سنگ مخزن از نظر شکل هندسی و بررسی جریان سیال از سنگ مخزن به درون ترک‌ها^۲ مورد توجه خاص قرار گیرد. بطور کلی شکاف‌ها در این سیستم‌ها؛ قابلیت هدایت و ذخیره‌سازی پایینی دارند، یا به عبارتی ماتریکس دارای نفوذپذیری پایین و ظرفیت ذخیره‌سازی بالایی می‌باشد. جریان واقع در این چاه‌ها که تنها از طریق شکاف‌ها می‌باشد توسط بلوک‌های ماتریکس تغذیه می‌شود. مخازن سنگ آهکی ایران عمدتاً شکافدار است و در ابتدا بهره‌برداری از فشار مخزن کاسته شده و تولید نفت کاهش می‌یابد به این دلیل لزوم ثابت نگه داشتن و یا کاهش سرعت افت فشار مخزن امری ضروری می‌باشد. لذا عامل فشار یکی از مهم‌ترین مباحث مهندسی مخازن بوده که اکثر محاسبات مهندسی برای تعیین خصوصیات و وضعیت مخزن و با مشاهدات واقعی

^۱. Reservoir Simulator

^۲. Fractured

آزمایشات مغزه و نیز با استفاده از تست‌های چاه‌آزمایی؛ انجام می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که هر چه قطر شکاف در مخازن شکافدار کوچکتر باشد گاز تزریقی در سرعت‌های پایین‌تر به شکاف نفوذ کرده و نفت را به سمت چاه‌های تولیدی حرکت می‌دهد و هر چه تراوایی ماتریس بالاتر باشد میزان بازیافت نفت در اثر تزریق گاز افزایش می‌یابد. این مخازن دارای شکاف‌هایی هستند که تشکیل شبکه می‌دهند و کل مخزن از طریق شکاف‌ها به هم ارتباط دارد و بطور کلی از ارتباط بین حفره و کانال بوجود می‌آید که حفره‌ها؛ سیستم ماتریس و کانال‌ها؛ سیستم ترک را در سراسر مخزن تشکیل می‌دهد (کردونی، کمری و درویش، ۱۳۹۱).

بررسی رفتار بین مخازن ماسه‌ای معمولی و مخازن شکافدار مشخص می‌کند که تعدادی از پارامترهای تولید نفت علاوه بر مشخصات سنگ اساساً در این نوع مخازن متفاوتند. در بررسی تعداد زیادی از مخازن ماسه سنگی، آهکی، دولومیتی، ترکیبی و غیره مشاهده می‌شود که اگر تعداد شکاف‌ها، محدود و جزئی باشد و یا بصورت مکانیکی در مخزن ایجاد شود چنین مخازنی شکافدار را از غیرشکافدار متمایز می‌کند و در این حالت قسمت شکافدار تنها بخشی از مخزن را در بر می‌گیرد و هنگامی که یک مخزن دارای شکاف‌هایی با توزیع تصادفی بدون یک شبکه مشخص باشد به عنوان مخزن شکافدار در نظر گرفته نمی‌شود. یک مخزن شکافدار را در اولین مراحل تاریخچه آن می‌توان شناخت اما مهمترین آن‌ها تنها پس از دوره نسبتاً طولانی تولید، شناخت آن امکان‌پذیر است. سیالات موجود در مخازن شکافدار؛ مشابه سیالات در مخازن ماسه سنگی می‌باشد. به هر حال ترکیب سیال در مخازن شکافدار؛ توزیع یکنواخت‌تری نسبت به مخازن ماسه سنگی دارند. بطور کلی مخازن شکافدار را می‌توان به دو گروه عمده بر حسب نقش ماتریکس در مقدار نفت قابل بازیابی تقسیم کرد که این دو گروه عبارتند از:

الف- ذخایری که نفت قابل بازیابی اکثراً در شکاف‌ها هستند. در این گروه از مخازن شکافدار، تخلخل و نفوذپذیری ماتریکس بسیار پایین است؛

ب- ذخایری که نفت قابل بازیابی معمولاً در ماتریکس می‌باشد. در این گروه شکاف‌ها، ناحیه سطحی زیادی را برای بلوک‌های ماتریکس فراهم نموده و وسیله‌ای برای ارتباط بین ماتریکس و دهانه چاه ایجاد می‌کنند. این گروه مخازن شکافدار را می‌توان به چند گروه دیگر بر حسب تراوایی ذاتی ترک و تراوایی ترک به ماتریکس تقسیم نمود. در این مخازن سیستم بلوک سنگ مخزن به علت تشکیل شدن از سنگ‌های کربناته دارای تراوایی خیلی کم (کسری از چند میلی داری) هستند و حجم عمده‌ای از سیال مخزن را در خود جای داده‌اند.

عمدتاً مخازن شکافدار؛ k بیشتری نسبت به مخازن معمولی دارند و در این مخازن مقدار (نفوذپذیری عمودی به افقی) بزرگتر از ۱۰۰ است این بدان معناست که شکاف‌های عمودی بازترند. در این مخازن گرادیان افقی فشار نسبت به مخازن معمولی حدود ۲۵ برابر کمتر است. بدلیل این که در حالت کلی؛ تراوایی افقی مخازن شکافدار از مخازن

معمولی بیشتر است پس: در این مخازن تراوایی ماتریکس در مقایسه با تراوایی ترک ناچیز می‌باشد. به طور مثال یک ترک با قطر ۱۰۰ میکرون تراوایی به بزرگی چند صد برابر تراوایی ماتریکس خواهد داشت؛ لذا تراوایی ماتریکس تأثیر چندانی بر حرکت سیال نخواهد داشت. تخلخل ماتریکس و ضریب فشردگی سنگ شاخصی برای میزان ذخیره سیال در ماتریکس می‌باشد. ماتریکس علی‌رغم تراوایی پایین دارای تخلخل بالایی نسبت به ترک می‌باشد. آنچنان که ذخیره اصلی سیال در ماتریکس سنگ باشد. لذا انتقال این پتانسیل به ترک که مسیر خوبی برای حرکت سیال است موجب افزایش راندمان حرکت خواهد بود. در مخازن شکافدار در شرایط مساوی میزان نسبت گاز به نفت تولیدی نسبت به مخازن بدون شکاف کمتر است چون قسمت عمده‌ای از گاز آزاد شده بجای آن که همراه نفت تولید شوند به سمت بالای مخزن حرکت می‌کنند و تشکیل کلاهک گازی می‌دهند.

مخازن شکافدار سه نوع هستند: ۱. ممکن است نفت در ماتریکس باشد و در شکاف نباشد. ۲. نفت در شکاف باشد و در ماتریکس نباشد. ۳. نفت هم در شکاف و هم در ماتریکس باشد. در این مخازن از ابتداء تولید یک چاه سه مرحله وجود دارد: ۱. تولید بیشتر به دلیل انبساط و حرکت در شکستگی می‌باشد. ۲. تولید هم از ماتریس و هم از شکستگی تأثیر می‌پذیرد. ۳. مکانیسم تولید و مقدار نفت از ماتریس می‌باشد ولی طی این مدت نفت خارج شده از مخزن عمدتاً از مسیر شکاف‌ها بسوی چاه حرکت می‌کند.

تست‌های جریان سیال در مخازن طبیعی شکافدار (ترکدار) با استفاده از مدل مخزن می‌تواند ادامه یابد با فرض این که سیستم ماتریکس و شکاف در سراسر سازند ادامه داشته باشد. ماتریکس سنگی که نفوذپذیری خیلی پایینی دارد سیال ذخیره شده در ابعاد متخلخل آن زیاد است و در حالتی که تخلخل بی‌نهایت کوچک باشد سیال طبق قاعده نفوذپذیری عبور می‌کند. بطور کلی شکاف‌ها در این سیستم‌ها قابلیت هدایت بالا و قابلیت ذخیره‌سازی پایینی دارند و یا عبارتی ماتریکس دارای نفوذپذیری پایین و ظرفیت ذخیره سازی بالایی می‌باشد. که طبق مدل وارن و روت^۱ (۱۹۶۲) جریان بسمت چاه تنها از طریق شبکه ترک‌ها صورت می‌پذیرد و در اغلب بررسی‌ها فرض شده که بلوک‌های ماتریکس دارای اندازه یکسانی هستند. هنگامی که در چنین مخازنی (مخازن شکافدار) تولید می‌شود تغییرات فشار در تمامی قسمت شکاف بعلاوه پدیده انتشار اتفاق می‌افتد و با اختلاف فشار ناچیز سرعت حرکت سیال بالایی در سیستم بوجود می‌آید. با ادامه داشتن جریان، فشار ماتریکس و شکاف به حالت تعادل می‌رسد و عکس‌العمل جریان شکاف بار دیگر دیده می‌شود تا این که جریان سیال در نهایت از ترکیب ماتریکس و شکاف عبور نماید و وجود ترک در این گونه محیط‌ها موجب افزایش تراوایی سنگ تا میزان بسیار بالایی می‌گردد. عمل متقابل بین ماتریکس و شکاف تأثیر خیلی زیادی بر شکل هندسی شکاف‌ها (ترک‌ها) دارد. با توجه به فیزیک سنگ

^۱. Warren and Root

حرکت سیال در سنگ‌های شکافدار؛ تابع روابط خاص خود بوده که در حقیقت آن چه ما بعنوان بهره‌برداری از مخزن می‌شناسیم برآیند تولید از هر دو محیط ماتریکس و ترک می‌باشد. سیال اشباع کننده محیط متخلخل شکافدار ابتداء از طریق مسیر ترک‌ها تخلیه می‌گردد لذا از آنجائی که محیط ترک محیطی با مقاومت کم در برابر حرکت سیال می‌باشد لذا بخش اعظم سیال اشباع کننده از مسیر ترک تخلیه خواهند شد. پارامترهای استفاده شده برای تعیین خصوصیات و تأثیر متقابل ماتریکس و شکاف نسبت سختی ماتریکس می‌باشد هنگامی که توزیع سیال بصورت نسبی باشد. و بطور کلی عبارتست از حجم تخلخل شکاف به حجم متخلخل ماتریکس یا ظرفیت ذخیره بدون بعد از شبکه شکافدار می‌باشد که به تخلخل و تراکم پذیری ماتریکس بستگی دارد. چند روش پایه و کلی برای دستیابی به شکافی با قابلیت هدایت بالا در سازندهای کربناته با استفاده از اسید وجود دارد که در زیر هر کدام از این روش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد (یاحق و عاشوری، ۱۳۹۸):

الف- انگشتی شدن در فاز گرانرو^۱

در این روش از سیال پیشرو و اسید استفاده می‌شود. ابتدا سازند توسط یک ژل با گرانروی بالا (معمولاً آبی که توسط عامل پیوندی ژله‌ای شده) به عنوان سیال پیشرو به طور هیدرولیکی شکافته می‌شود. سیال پیشرو برای ایجاد هندسه شکاف (طول، عرض و ارتفاع) و همچنین خنک کردن سازند به منظور کاهش نرخ واکنش اسید استفاده می‌شود. پس از این مرحله، اسیدی با گرانروی کم (معمولاً اسید هیدروکلریک یا مخلوط آلی اسید هیدروکلریک) به درون شکاف پمپ می‌شود. فرض می‌شود اسید به دلیل تفاوت گرانروی‌ها و در نتیجه تحرک پذیری، به صورت انگشتی در درون سیال پیشروی گرانرو حرکت می‌کند. رایج‌ترین اسید ماتریسی مورد استفاده، اسد هیدروکلریک؛ ۱۵ درصد وزنی است. غلظت‌های بالاتر اسید هیدروکلریک مانند ۲۰ یا ۲۸ درصد، دارای مزیت گرانروی بیشتر نسبت به اسید ۱۵ درصد، قبل و بعد از مصرف هستند. این موضوع همچنین موجب کاهش میزان هرزروی می‌شود.

ب- اسیدکاری شکاف بسته^۲

یکی از روش‌های افزایش تراوایی نهایی، تکنیک اسیدکاری شکاف بسته است. این روش شامل پمپ کردن مقدار کمتری اسید در مرحله‌ای جداگانه به درون شکاف‌های اسیدی بسته شده می‌باشد. فشار تزریق در این مرحله به طور معمول برابر با فشار لازم برای تزریق سیال در ماتریکس است. هدف از این روش، حصول اطمینان از متصل بودن شکاف‌ها به چاه است که شبیه به استفاده از پروپانت در آخرین مرحله لایه شکافی پروپانتی، برای حصول اطمینان از بازماندن شکاف می‌باشد (کلفایان، ۲۰۱۷).

¹. Viscouse Fingering

². Closed Fracture Acidizing (CFA)

فصل سوم:

نتیجہ گیری

۳-۱ نتیجه گیری

در چاه‌هایی که عوامل آسیب سازند، موجب انسداد مسیرهای جریانی، ایجاد افت فشار اضافی و کاهش تولید می‌شوند، می‌توان از عملیات انگیزش چاه به منظور رفع آسیب‌ها استفاده نمود. از معمول‌ترین راه‌های تحریک چاه، عملیات اسیدکاری است که می‌تواند در گستره وسیعی از موارد به کار رود. قبل از طراحی عملیات اسیدکاری شامل انتخاب نوع اسید، غلظت اسید تزریقی، افزایش ها، فشار و دبی تزریقی اسید، باید آزمایشاتی روی سنگ و سیال سازند انجام گیرد؛ چراکه نتایج داده‌های آزمایشگاهی می‌تواند مستقیماً روی تصمیم‌گیری‌های مربوط به طراحی عملیات مؤثر باشد. زیرا در برخی موارد، عدم رعایت پیش‌نیازهای بالا، موجب تشکیل رسوب‌های لجنی، امولسیون‌های چند فاز غیر قابل کنترل و حتی گشایش منافذ ورود آب به چاه توسط اسید تزریق شده و نهایتاً تولید آب از چاه شده است. مقایسه پارامترها و عوامل مختلف مربوط به قبل و بعد از انجام عملیات اسیدکاری، از جمله کاهش ضریب پوسته، افزایش فشار سرچاهی، افزایش دبی تولیدی و افزایش میزان تراوایی سازند در دهانه چاه، موفقیت‌آمیز بودن اسیدکاری و اجرای صحیح عملیات را تأیید می‌کند.

همچنین؛ نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی، میدانی و مدل‌سازی به دست پژوهش‌های مهندسی نفت در زمینه روش‌های بهینه‌سازی و افزایش بازده اسیدکاری در مخازن کربناته شکافدار نشان می‌دهد که:

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.
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 تأخیری 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. به طور کلی با توجه به هزینه بالای عملیات اسیدکاری لازم است قبل از انجام عملیات اسیدکاری چاه‌ها برای انجام عملیات اسیدکاری موفق با ارزیابی و بررسی تاریخچه عملیات‌های مختلف چاه، خصوصیات

سنگ و سیال مخزن و خصوصیات سیال تزریقی و با بالا بردن کیفیت و کمیت نتایج آزمایشگاهی و خروجی نرم افزار شبیه‌ساز می‌توانیم در عملیات اسیدکاری حجم و دبی‌های تزریق اسید را طوری انتخاب کرد که ضریب پوسته اطراف چاه را کاهش دهد و حفره‌های کرمی عمیق‌تر ایجاد کند.

۲-۳ پیشنهادها

استفاده از نرم‌افزارهایی نظیر پانسیس^۱؛ به منظور بررسی تغییرات افت فشار نسبت به زمان و میزان افت فشار برای قبل و بعد از عملیات اسیدکاری به منظور دستیابی به نتایج بهتر، توصیه می‌گردد.

با توجه به افت فشار مخازن نفت و گاز کشور به دلیل دوره طولانی تولید از آن‌ها و همچنین ویژگی سنگ‌های مخزنی میدین کشورمان و از سوی دیگر با توجه به اهمیت زیاد نفت و گاز در برنامه‌ریزی‌های کلان کشور، نیاز به روش‌های افزایش و بهبود تولید از چاه‌ها و مخازن نفتی بیش از پیش احساس می‌شود. به همین دلیل فرآیند لایه‌شکافی، به ویژه لایه شکافی اسیدی به عنوان روشی نوین و بسیار مؤثر بر روند تولید چاه‌های نفت و گاز کشور پیشنهاد شده و بر لزوم توجه و مطالعه بیشتر در این زمینه تأکید می‌شود.

به دلیل واکنش غیرقابل پیش‌بینی اسید و سنگ، مکانیزم‌های حاکم بر عملیات لایه‌شکافی به وسیله اسید با مکانیزم حاکم بر لایه‌شکافی پروپانتی متفاوت است. لذا به منظور شبیه‌سازی این عملیات برای میدانی خاص، حتماً باید از داده‌های مربوط به آزمایش‌های لایه‌شکافی و اسیدکاری صورت گرفته بر روی مغزه‌های میدان استفاده کرد.

در فرآیند لایه شکافی با اسید مهمترین پارامترها عبارتند از: میزان هرزروی اسید، نرخ واکنش اسید و گسترش سوراخ‌های کرمی که در این پژوهش راهکارهای مواجهه با هر کدام ارائه شد.

طراحی بهینه سیستم‌های اسیدی برای یک میدان خاص به خواص مکانیک سنگی، خواص سیالات مخزن، امکانات عملیاتی موجود و نتایج آزمایش‌های بسیاری بستگی دارد. لذا قبل از شروع شبیه‌سازی و فاز اجرایی عملیات، نیاز به یک مجموعه کامل از داده‌های مرتبط احساس می‌شود.

با توجه به این که عملیات لایه شکافی فرآیندی است که چندین علم را به طور همزمان درگیر کرده و تغییر هر پارامتر، تأثیر قابل توجهی بر سایر پارامترها می‌گذارد، لذا توجه به پارامترهای مختلف طراحی و استفاده از روش‌های آماری، تصمیم‌گیری چندمتغیره و در نظر گرفتن تأثیر همزمان پارامترها بر عملیات ضروری به نظر می‌رسد.

^۱. Pansys

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 ژله‌ای استفاده کرد.

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

قبل از انجام عملیات اسیدکاری باید ضریب پوسته سازند تعیین شود و مشخص شود که حداقل بخشی از بهره‌دهی کم چاه ناشی از آسیب سازند قابل حل در اسید است.

مهمترین موضوع در طراحی اسیدکاری ماتریس توصیف مخزن است که شامل درک کانی شناسی سازند، نفوذپذیری، تخلخل و دینامیک سیال مخزن است. ارزیابی آسیب سازند به نوبه خود شامل تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی، سازگاری سیال و آزمایش مغزه است که باید قبل از انجام عملیات اسیدکاری سازند انجام شود. هنگام پمپاژ با سرعت کم، استفاده از بالاترین غلظت اسید لزوماً منجر به ایجاد کارآمدترین انتشار کرم چاله نمی‌شود.

محدودیتی برای کاهش قدرت اسید وجود دارد که می‌تواند از نفوذ کرم چاله و کاهش پوسته سود برد. اسیدهای با غلظت کمتر می‌توانند منجر به نفوذ عمیق‌تر شوند و برای موارد با نرخ تزریق محدود مناسب‌تر هستند در حالی که اسیدهای با غلظت بالاتر به اسید کمتری نیاز دارند، هزینه و زمان تزریق را کاهش می‌دهند. شبیه‌سازی انجام شده فقط برای چاه و مخزن و سازند موردنظر صادق است و با توجه به اینکه داده‌های هر چاه و لیتولوژی هر سازند و سیال هر مخزن با مخزن دیگر متفاوت است لذا برای امکان‌سنجی اسیدکاری، شبیه‌سازی اسیدکاری و اجرا عملیات اسیدکاری در هر چاه با چاه دیگر متفاوت بوده و لذا می‌بایست همه این مراحل برای هر چاه به صورت کامل انجام شود تا عملیات اسیدکاری موفقیت‌آمیز باشد.

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.

استفاده از اسیدهای تأخیری 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.

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 ژله‌ای استفاده کرد.

منابع و مأخذ

- [۱]. بصیر، مجتبی و شهبازی، خلیل. (۱۳۹۶). روش‌های بهینه‌سازی و افزایش بازده اسیدکاری در مخازن هیدروکربنی. ماهنامه علمی - ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۴۹: ۶۶-۶۰.
- [۲]. حدادی، موحد و مؤمنی‌میانی. (۱۳۹۴). عملیات اسیدکاری سازندهای کربناته و مطالعه موردی نتایج اسیدکاری یکی از چاه‌های نفت واقع در یکی از میداین حوزه نفت مرکزی. مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی، تهران: مرکز همایش‌های صدا و سیما.
- [۳]. حسین‌زاده‌هلاله، امیر. (۱۳۹۲). آنالیز بهبود آسیب چندگانه با استفاده از لایه شکافی اسیدی در یکی از مخازن نفتی جنوب غرب ایران. ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۱۰۱.
- [۴]. حسینی، علی و کیوانی، سعید. (۱۳۹۷). مبانی عملیات اسیدکاری. تهران: انتشارات کتاب آوا، چاپ دوم.
- [۵]. خدیری، سحر؛ بخشی زیدانلو، ناهید و مولا، داریوش. (۱۳۹۱). مدلسازی دو بعدی فرآیند اسیدزنی ماتریسی در مخازن نفتی کربناته. اولین کنفرانس بین‌المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی، مرکز همایش‌های بین‌المللی هتل المپیک تهران.
- [۶]. زارعیان، محمدحسین و زورمند، غلامحسین. (۱۳۹۰). اسیدکاری چاه‌های نفت و گاز. تهران: انتشارات عروج.
- [۷]. سعیدی. (۱۳۹۸). مخازن شکافدار. ترجمه: میلاد مقصودی‌اکبری و صابر کیماز، تهران: انتشارات مثبت.
- [۸]. عبدالمهی، شهریار و شهبازی، خلیل. (۱۳۹۹). بهینه‌سازی بازده عملیات اسیدکاری ماتریس در یکی از مخازن کربناته جنوب غرب ایران به کمک نرم‌افزار stimCADE. ماهنامه علمی اکتشاف و تولید، ۱۸۱: ۴۱-۳۲.
- [۹]. قله، محسن. (۱۳۹۸). اسیدکاری و انگیزش طبقات. گروه نکسنور به ادرس اینترنتی: nexnor.com.
- [۱۰]. قناعت‌پیشه، احسان. (۱۳۹۲). اسیدکاری سازند جهت افزایش تولید گاز و میعانات گازی در یکی از مخازن گاز تر در جنوب غرب ایران. سومین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی.
- [۱۱]. کردونی، علی؛ کمری، آرش و درویش، هدی. (۱۳۹۱). بررسی مؤثرترین مکانیزم موجود در مخازن شکافدار برای انجام ازدیاد برداشت نفت. اولین کنفرانس بین‌المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی، مرکز همایش‌های بین‌المللی هتل المپیک تهران.
- [۱۲]. کرم‌نژاد، میلاد و کاکائی، سجاد. (۱۳۹۶). مخازن کربناته و شکافدار. تهران: نشر صانعی‌شهمیرزادی، چاپ اول.

- [۱۳]. گراوند، رویا؛ نخعی، علی و عباسی، مژگان. (۱۴۰۰). ارزیابی عملکرد عملیات اسیدکاری ماتریسی در یک مخزن گازی کربناته چند لایه با استفاده از تلفیق نتایج چاه آزمایشی و نمودار نگار تولید. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۱(۴): ۸۵۵-۸۳۸، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [۱۴]. موحد، عطا. (۱۳۹۲). انگیزش چاه به روش اسیدکاری. اولین کنفرانس بین‌المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی.
- [۱۵]. مودت‌نیا، سعید؛ مدنی‌فر، فرشید و حبیب‌نیا، بهرام. (۱۳۹۱). مقایسه مخازن معمولی و شکافدار از لحاظ میزان تولید، بهره‌بری و بازیافت نهایی، با نگاه ویژه به مخازن شکافدار. اولین کنفرانس بین‌المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی، تهران: مرکز همایش‌های بین‌المللی هتل المپیک.
- [۱۶]. مؤمنی‌میانی، احمد؛ حدادی، محمد و داراب‌پور، احمد. (۱۳۹۴). بررسی مطالعاتی نتایج عملیات اسیدکاری چاه نفت شماره ۱ واقع در یکی از میداین حوزه نفت خلیج فارس. مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی، تهران: مرکز همایش‌های صدا و سیما.
- [۱۷]. میرعباسی، مرتضی؛ حسینی، علی و خامه‌چی، احسان. (۱۳۹۱). فناوری لایه شکافی اسیدی، روشی نوین جهت انگیزش و بهبود تولید از مخازن کربناته. ماهنامه اکتشاف و تولید، ۹۵: ۳۳-۳۰.
- [۱۸]. نظری‌صارم، مهدی و مرادی، محمدحسین. (۱۴۰۰). شبیه‌سازی تزریق بهینه اسیدهای قوی و ضعیف در مخازن کربناته، مطالعه موردی: اسیدکاری در دولایه هیدروکربوری مربوط به یکی از مخازن جنوب غرب ایران. پژوهش نفت: ۱۲۰: ۱۲۶-۱۱۴.
- [۱۹]. هاشمی‌زاده، عباس. (۱۳۹۶). انگیزش چاه. دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده مهندسی نفت و پتروشیمی.
- [۲۰]. یاحق، میلاد و عاشوری، سیاوش. (۱۳۹۸). بررسی فرایند لایه شکافی اسیدی در مخازن کربناته. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه نفت، فارس، ایران.

- [21]. Aggour, M. A., Al-Muhareb, M.A., Abu-Khamsin, S.A. & Al-Majed, A.A. (2000). Improving Sandstone Matrix Acidizing for Oil Wells by Gas Preconditioning. SPE 63180, Society of Petroleum Engineers.
- [22]. Akanni, O. O., & 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.
- [23]. Chang, F.F., Qiu, X., & Nasr-El-Din, H.A. (2007). Chemical Diversion Techniques Used for Carbonate Matrix Acidizing: An Overview and Case Histories. SPE 106444, Society of Petroleum Engineers.

- [24]. Da Motta, E., P. & dos Santos J., A. (2011). New fluosilicic acid system removes deep clay damage. SPE Drilling & Completion, 16(03): 159-163.
- [25]. Furui, K., Burton, R., C. & Burkhead, D., W. (2012). A Comprehensive Model of High-Rate Matrix-Acid Stimulation for Long Horizontal Wells in Carbonate Reservoirs: Part I—Scaling Up Core-Level Acid Wormholing to Field Treatments. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/134265-PA.
- [26]. Gomez, J., N. (2006). Design, Set Up, and Testing of a Matrix Acidizing Apparatus. Texas A & M University.
- [27]. Guidry, G. S., Ruiz, G.A., & Saxon, A. (1989). SXE/N2 Matrix Acidizing. SPE 17951, Society of Petroleum Engineers.
- [28]. Hu, J., Liu, H., Wu, D., & Zhang, J. (2015). Acidizing flowback optimization for tight sandstone gas reservoirs. Journal of Natural Gas Science and Engineering , 24: 311-316.
- [29]. Kalfayan. L., J. (2017). Fracture Acidizing: History, Present State, and Future. SPE 106371.
- [30]. Shirley, R. M., Zhu, D., Hill, A. D. & Da Motta, E. P. (2018). Texas A&M University, Maximizing the Value of Matrix Acidizing Treatments in Carbonate Reservoirs.
- [31]. Taylor, R., Fyten, G. C., & McNeil, F. (2019). Acidizing—Lessons from the Past and New Opportunities. SPE 162238, Society of Petroleum Engineers.
- [32]. Wang, Y., Hill, A.D., & Schechter, R., S. (2013). The Optimum Injection Rate for Matrix Acidizing of Carbonate Formations. SPE 26578, Society of Petroleum Engineers.