



A Review of Acidizing Simulation Algorithms for Well Stimulation

S. Mousazadeh¹, F. Ameli^{2*}

1- M. Sc. Student of Petroleum Engineering, Iran University of Science and Technology

2- Assistant Professor of Petroleum Engineering, Iran University of Science and Technology

Email: ameli@iust.ac.ir

Abstract

Matrix acidizing refers to one of the two well stimulation processes in which acid penetrates the rock pores at pressures below the fracturing pressure. During matrix acidizing, the acid dissolves sediments and mud solids which reduce the rock permeability. This process enlarges the natural pores of the reservoir that stimulates the flow of hydrocarbons. In this article, different mechanisms of acidizing process in carbonate and sandstone reservoirs and the relevant reactions are studied. Moreover, various simulation techniques of acidizing in carbonate reservoirs are studied, including the dimensionless model, capillary tube model, network model, and continuum model. Moreover, numerical simulation of sandstone acidizing is also discussed. Also, optimization of the acidizing process is described. In each of the sections, field studies have been investigated based on the type of subject.

Received: 5 November 2022

Accepted: 5 June 2023

Page Number: 21-40

Keywords:

Matrix Acidizing,
Formation Stimulation,
Optimization Process,
Numerical Modeling of
Acidizing

Please Cite this Article Using:

Mousazadeh, S., & Ameli, F. (2025). A Review of Acidizing Simulation Algorithms for Well Stimulation. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(138), 21-40, [In Persian].



مروری بر الگوریتم‌های شبیه‌سازی اسیدکاری به منظور انگیزش چاه

سارا موسی‌زاده^۱، فروغ عاملی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار مهندسی نفت، دانشگاه علم و صنعت ایران

پیام نگار: ameli@iust.ac.ir

چکیده

اسیدکاری ماتریکس^۱ به یکی از دو فرایند تحریک چاه اشاره دارد که در آن اسید در منافذ سنگ، در فشارهای زیر فشار شکستگی نفوذ می‌کند. در طول اسیدکاری ماتریس، اسید، رسوبات و جامدات گل را در منافذی که مانع از نفوذپذیری سنگ می‌شوند، حل می‌کند. این فرایند، منافذ طبیعی مخزن را به منظور جریان هیدروکربن‌ها تحریک می‌کند. در این مقاله ضمن بررسی سازوکارهای مختلف فرایند اسیدکاری در مخازن کربناته و ماسه‌سنگی و ذکر واکنش‌های مربوطه، به بیان انواع دسته‌بندی‌ها در شبیه‌سازی عددی اسیدکاری در مخازن کربناته شامل مدل لوله‌مویینگی، مدل شبکه و مدل پیوسته و نیز شبیه‌سازی اسیدکاری در مخازن ماسه‌سنگی پرداخته شده است. هم‌چنین نحوه انجام مطالعات بهینه‌سازی عملیات اسیدکاری شرح داده شده است. در هر یک از بخش‌ها نیز به بررسی مطالعات میدانی بر اساس نوع موضوع پرداخته شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۵

شماره صفحات: ۲۱ تا ۴۰

کلیدواژه‌ها:

اسیدکاری ماتریس،
تحریک سازند،
بهینه‌سازی فرایند اسیدکاری،
مدل‌سازی عددی اسیدکاری

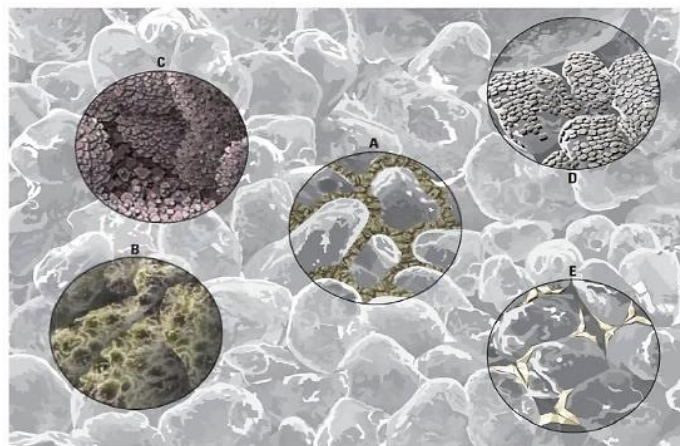
۱. مقدمه

با اسکن توموگرافی رایانه‌ای^۱ سه‌بعدی است. این آزمایش‌ها به تعیین رژیم‌های کرم‌چاله^۲ و هندسه کانال کمک و درعین حال نقاط کالیبراسیون را برای منحنی‌های بهره‌کنش سنگ اسیدی فراهم می‌کنند. این ضریب‌ها در نرم‌افزار مدل‌سازی اسیدکاری استفاده می‌شود که امکان بهینه‌سازی حجم سیال، نرخ پمپاژ و استراتژی انحراف را فراهم می‌کند. هدف از این مقاله بررسی کلی مفهوم اسیدکاری ماتریس و انواع مدل‌سازی‌های مربوطه آن است.

۱-۱ اسیدکاری ماتریس در مخازن ماسه‌سنگی

مخلوطی از اسید هیدروفلوئوریک^۳ و اسید کلریدریک^۴ به‌طور گسترده در اسیدکاری ماتریکس ماسه‌سنگ استفاده شده‌است. HF با کوارتز، فلدسپات و کانی‌های رسی که اجزای اصلی یک ماسه‌سنگ هستند، واکنش می‌دهد (شکل (۱)) و آن‌ها را حل می‌کند. HCl با محلول نگه‌داشتن محصولات واکنش در اسید، در دمای بالای ۲۰۰ درجه فارنهایت، رسوب را کنترل می‌کند، اسید گل^۵ باعث کاهش سریع بهره‌وری چاه می‌شود و در برخی موارد حتی منجر به ازدست‌دادن کل تولید می‌شود که یک اشکال نامطلوب برای افزایش تولید در عملیات بازیافت نفت^۶ است. چنین وضعیتی، نتیجه سرعت واکنش سریع بین اسید گل و کانی‌های ماسه‌سنگی است [۲].

هدف ساده اسیدکاری ماتریکس، بهبود تولید است. اسیدکاری به رفع آسیب پوسته و یا حل کردن آسیب سازند با ایجاد مسیرهای جدید در چند اینچ تا یک یا دو فوت در اطراف مرز چاه اطلاق می‌شود. این کار با پمپاژ سیال تصفیه با فشار نسبتاً کم انجام می‌شود تا از شکستگی سازند جلوگیری شود. در مقایسه با ایجاد شکاف در سازند با تزریق سیال با فشار بالا، اسیدکاری ماتریس یک عملیات کم‌حجم و کم‌هزینه است. قدمت اسیدکاری ماتریکس به اندازه حفاری چاه است. عملیات اسیدکاری در کربنات‌ها به دلیل واکنش‌پذیری بالای سازند با اسیدها، اغلب منجر به کاهش قابل توجه ضریب پوسته می‌شود. افزایش قابل توجه تولید یا ناتوانی در اجرای ابزارهای تجزیه و تحلیل پس از تصفیه ممکن است به این نتیجه برسد که اسیدکاری ماتریس به‌طور مؤثر انجام شده، در حالی که در واقع کار از نظر حجم سیال، انواع اسید، پوشش چاه و پمپاژ بهینه نشده‌است؛ در نتیجه، پوسته نهایی به اندازه‌ای که می‌توانست پایین نیست و مهم‌تر از همه، کاهش تولید میان‌مدت و بلندمدت پس از اسیدکاری سریع‌تر از آن است که با یک عملیات بهینه باشد [۱]. برای غلبه بر این مسائل، یک رویکرد یکپارچه برای عملیات اسیدکاری در میدان‌های نفتی مختلف اجرا شد. رویکرد یک‌پارچه شامل تست‌های آزمایشگاهی جامعی از قبیل تست‌های جریان مغزه



شکل ۱. کانی‌ها و رس‌های مختلف در ماسه‌سنگ با ریختمان‌های مختلف مانند (a) کائولینیت پرکننده منافذ، (b) الیت، (c) رشد بیش‌ازحد کربنات، (d) رشد بیش‌ازحد فلدسپات و (e) سیمان کوارتز [۳].

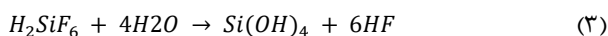
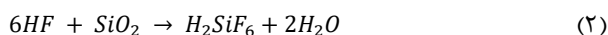
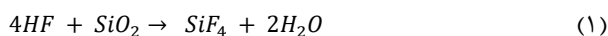
Figure 1. Different minerals and clays in sandstone with different morphologies such as (a) pore-filling kaolinite books, (b) fibrous illite, (c) carbonate overgrowth, (d) feldspar overgrowth and (e) quartz cement [3].

1. Computer Tomography
4. HCL

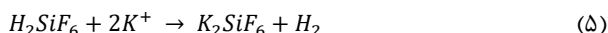
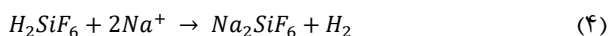
2. Wormhole
5. Mud Acid

3. HF
6. Enhance Oil Recovery (EOR)

دارد که عبارت‌اند از واکنش اولیه، ثانویه و سوم. از نزدیک‌ترین فاصله به چاه، واکنش اولیه انجام می‌شود که طی آن واکنش سریع بین اسیدها و مواد معدنی برای تشکیل فلوریدهای آلومینیوم و سیلیس، بدون تشکیل هیچ‌گونه رسوبی رخ می‌دهد. پس از آن، هنگامی که فرایند اسیدکاری در فواصل دورتر اتفاق می‌افتد، محصولات حاصل از واکنش اولیه با واکنش ثانویه پیش می‌روند. واکنش‌های ثانویه با سرعت کمتری رخ می‌دهند. سیلیکاژل و رسوبات در طی واکنش‌ها تشکیل می‌شوند. سپس، واکنش‌های سوم در فواصل دورتر با رسوب بیشتر سیلیکاژل رخ می‌دهد [۲]. در طی اسیدکاری ماسه‌سنگ، واکنش‌های رسوبی زیر رخ می‌دهد و ممکن است منجر به آسیب سازند و کاهش تخلخل و نفوذپذیری شود. رسوب سیلیس هیدراته طبق روابط (۱) الی (۳) انجام خواهد شد.



هم‌چنین رسوب سدیم، سیلیکات سدیم، پتاسیم، پتاسیم سیلیکات و کلسیم، فلوراید کلسیم نیز طبق روابط (۴) الی (۶) امکان می‌پذیرد.



۳-۱ اسیدکاری ماتریس در مخازن کربناته

اسیدکاری ماتریس در کربنات‌ها و سیلیکات‌ها دو دنیا از هم جدا هستند. سنگ‌های کربناته که عمدتاً شامل سنگ‌آهک و دولومیت هستند، به سرعت در HCl حل می‌شوند و محصولات واکنشی را ایجاد می‌کنند که به آسانی در آب حل می‌شوند، واکنش اسید HCl با سنگ‌آهک و دولومیت عبارتند از:

از این‌رو، مصرف اسید خیلی سریع رخ می‌دهد و این منجر به نفوذ کم عمق اسید در سازند می‌شود. علاوه بر این، استفاده از اسید HF در طول تحریک چاه باعث کاهش قابل توجه مقاومت فشاری سازند، به‌ویژه سازند با محتوای خاک رس بالا می‌شود. در نتیجه، سازند متلاشی و باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری می‌شود. اسید گل نیز بسیار خطرناک است و منجر به خوردگی و مشکلات مهاجرت می‌شود؛ بنابراین، این امر اهمیت بهبود انتخاب اسید را برای اسیدکاری ماسه‌سنگ نشان می‌دهد. با توجه به بررسی مقالات، انواع مختلفی از اسیدها وجود دارد که جدا از اسید گلی برای استفاده معمولی مانند عامل کی‌لیت^۱، اسیدهای به‌تعویق افتاده^۲، اسیدهای آلی^۳ و هم‌چنین اسید فلوروپوریک^۴ تولید شده‌اند. از بین تمام این اسیدها، HBF₄ برتری‌هایی را برای فرایند اسیدکاری ماسه‌سنگ به‌ارمغان آورده است. سهم عمده^۴ HBF₄ به دلیل فرایند آبکافت کند آن در فاز آبی برای تولید HF است. این یک برتری قابل توجه است؛ زیرا منجر به سرعت نفوذ کندتر و در نتیجه عمق نفوذ بیشتر در سازندهای ماسه‌سنگی می‌شود. جدای از آن، این خاصیت HBF₄ توانایی آن در حل کردن کانی‌های ماسه‌سنگ را کاهش نمی‌دهد. هم‌چنین، HBF₄ در کنترل مهاجرت ریزدانه‌ها و هم‌چنین استحکام رس مؤثرتر است و در مقایسه با اسید گل، خوردگی کمتری نیز دارد. نه تنها HBF₄ باعث افزایش بیشتر در نفوذپذیری می‌شود، بلکه تغییر کمتری در استحکام سازند ایجاد می‌کند [۲].

۲-۱ سازوکار واکنش شیمیایی اسیدکاری ماتریکس در ماسه‌سنگ‌ها

دو نوع واکنش در طول اسیدکاری ماسه‌سنگ رخ می‌دهد که شامل واکنش همگن در فاز آبی و واکنش ناهمگن بین سطح کانی و فاز آبی است. با ورود HF به مغزه ماسه‌سنگ، تقریباً همه کانی‌ها با سرعت‌های متفاوت بسته به سرعت ذاتی واکنش‌های ناهمگن و سطح در معرض آن شروع به حل شدن می‌کنند. کانی‌های واکنش‌دهنده را می‌توان به دو دسته مجزا تقسیم کرد: واکنش کند و سریع. کوارتز تمایل دارد با سرعت کمتری عمل کند در حالی که فلدسپات و خاک رس با سرعت بیشتری واکنش نشان می‌دهند. سه واکنش وجود

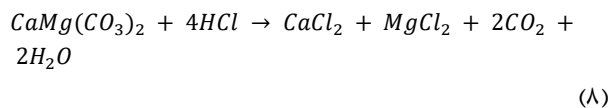
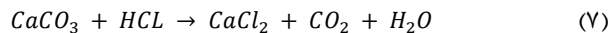
1. Chelating Agents
2. Retarded Acid
3. Organic Acid
4. HBF₄

شبهه حفره‌سازی سنگ کربناته است، می‌تواند در طول فرایند اسیدکاری ماسه‌سنگ رخ دهد. اگر ماسه‌سنگ بسیار ناهمگن باشد، یک الگوی کانالی در مقیاس ریز با نفوذپذیری بالا وجود خواهد داشت. انتشار کرم‌چاله، تابعی از مقدار اسید مصرف‌شده‌ای است که به نوک کرم‌چاله می‌رسد و این به سه عامل بستگی دارد:

- ۱- مقدار اسید واردشده به کرم‌چاله ~ توزیع سیال
 - ۲- ازدست‌دادن سیال از کرم‌چاله تا سازند، در امتداد دیواره کرم‌چاله و در انتهای آن
 - ۳- مصرف اسید روی دیواره کرم‌چاله
- تشکیل کرم‌چاله تنها در صورتی اتفاق می‌افتد که نرخ مصرف اسید کنترل شده‌باشد.

۲. بررسی پیشینه مدل‌سازی عددی و مطالعات شبیه‌سازی اولیه

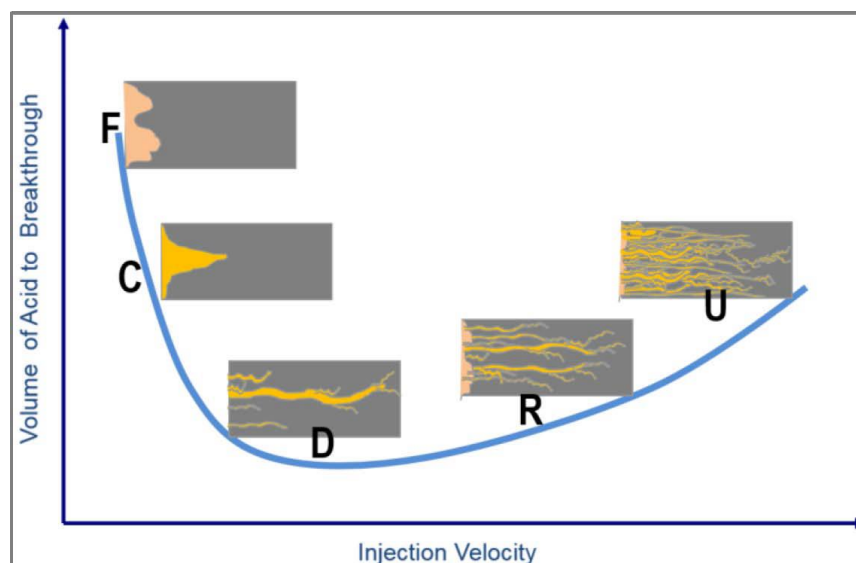
مدل‌های عددی در اسیدکاری ماسه‌سنگ از دهه ۱۹۶۰ توسعه یافته‌بود. به‌طور کلی، واکنش‌های شیمیایی و سازوکارهای بین کانی‌های ماسه‌سنگ و اسید گل به‌صورت ریاضی مدل‌سازی شده‌اند و بیشتر مدل‌های توسعه‌یافته بر اساس سینتیک کانی‌های



سرعت انحلال عمدتاً با سرعتی که اسید می‌تواند به سطح سنگ منتقل شود، محدود می‌شود. این منجر به تولید سریع کانال‌هایی با شکل نامنظم به‌نام کرم‌چاله می‌شود که در بخش بعدی به آن می‌پردازیم. اسید با ایجاد مسیره‌های میان بر^۱ در اطراف آسیب به‌جای حذف مستقیم آن، تولید را افزایش می‌دهد.

۴-۱ کرم‌چاله

الگوی کرم‌چاله (شکل (۲)) در اسیدکاری کربناته رایج است، درحالی‌که برای اسیدکاری ماسه‌سنگ، یک الگوی انحلال سطحی یک‌نواخت مشاهده می‌شود و هیچ مسیر جریان ترجیحی ایجاد نمی‌شود. ایجاد کرم‌چاله به‌خصوص در تشکیل ماسه‌سنگ همگن غیرمعمول است. این به دلیل سرعت کم واکنش بین اسید HF و کوارتز است که کانی اصلی موجود در ماسه‌سنگ است. با این وجود، چندین مطالعه تحقیقاتی نشان داده که یک الگوی کانال‌گذاری که



شکل ۲. رژیم‌های تشکیل کرم‌چاله به‌عنوان تابعی از دبی تزریق. F نشان‌دهنده حالت انحلال صورت، C انحلال مخروطی، D کرم‌چاله غالب، R کانال‌های شاخه‌ای و U انحلال یک‌نواخت است. رژیم بهینه برای عملیات اسیدکاری ماتریس D است [۴].

Figure 2. Wormholing regimes as a function of acid volume pumped and injection velocity. F is face dissolution mode, C is conical dissolution, D is dominant wormhole, R is ramified channels, and U is uniform dissolution [4].

1. Bypass

ماسه‌سنگ و HF است. اساساً چهار مدل اصلی توسعه‌یافته وجود دارد که شامل مدل پارامتری توده‌ای^۱، مدل دو پارامتری^۲، مدل چهار پارامتری^۳ و مدل شیمی دقیق^۴ است. هر کدام از این مدل‌ها دارای برتری‌ها و محدودیت‌هایی مخصوص به خود هستند؛ اما به دلیل قدیمی و در حد تئوری بودن کاربرد هر یک به طور مفصل به آن‌ها نمی‌پردازیم و در ادامه ابتدا چهار چوب‌های مورد بررسی در فرمول‌بندی را توضیح می‌دهیم، سپس وارد مباحث مدل‌سازی‌های عددی اخیر می‌شویم.

۲-۱ شبیه‌سازی سه‌بعدی فرایند اسیدکاری در سنگ‌های کربناته با استفاده از چارچوب داریسی - فورچهایمر^۵

مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که انواع مختلفی از الگوهای انحلال هنگام تزریق اسید به سنگ‌های کربناته تشکیل می‌شوند. الگوی انحلال به سرعت تزریق، نوع و غلظت اسید، نوع مواد معدنی درون سنگ، ناهمگونی سنگ و هم‌چنین دما و غیره بستگی دارد. به عنوان مثال، زمانی که سرعت تزریق بسیار کم است، اسید تزریق شده قبل از نفوذ عمیق به سنگ، کاملاً مصرف می‌شود. سنگ نزدیک انتهای ورودی به طور کامل حل می‌شود و در نتیجه یک الگوی انحلال تشکیل می‌شود. برعکس، وقتی اسید با سرعت بسیار بالایی به سنگ تزریق می‌شود، اسید زنده تقریباً به تمام منافذ سنگ حمله می‌کند. تخلخل به طور یک‌نواخت افزایش می‌یابد که منجر به یک الگوی انحلال یک‌نواخت می‌شود. با افزایش سرعت تزریق، بین این دو حد، الگوهای انحلال مخروطی، کرم‌چاله و انحلال شاخه‌ای متعاقباً تشکیل می‌شوند. بامقایسه حجم اسید مورد نیاز برای شکستن مغزه، مشخص می‌شود که وقتی الگوی انحلال کرم‌چاله شکل می‌گیرد، حجم نفوذ به حداقل می‌رسد. در نتیجه، یک انگیزه عملی برای یافتن شرایط تزریق بهینه که در آن انحلال کرم‌چاله تشکیل می‌شود، وجود دارد [۵]. برای بررسی فرایند انحلال، آزمایش‌های متعددی انجام شده است که مشاهده مستقیمی از دینامیک انحلال در سنگ‌ها و هم‌چنین پایه‌ای برای مدل‌سازی ریاضی برای پیش‌بینی تشکیل کرم‌چاله ارائه می‌دهد. مدل‌های عددی که در چند دهه اخیر ارائه شده‌اند، مدل‌های

عددی روشی کارآمد برای بررسی اجزا یا جزئیات مختلف طراحی ارائه می‌کنند. این رویکرد طراحی به‌طور مؤثر و در عین حال کاهش هزینه‌ها را تضمین می‌کند. مدل عددی را می‌توان به‌طور کلی به چهار نوع طبقه‌بندی کرد:

۱- مدل لوله‌مویبندی^۶

۲- مدل پیوسته^۷ [۶،۷]

۳- مدل شبکه^۸ [۸]

۴- مدل نیمه‌تجربی

از آنجایی که مدل پیوسته در پیش‌بینی الگوهای انحلال مشاهده‌شده در آزمایش‌ها بهتر است [۹،۱۰]، می‌تواند حجم پیشرفت را به‌طور دقیق تخمین بزند. تاکنون این مدل در چند سال اخیر به‌طور گسترده به کار رفته است. نخستین بار لیو و همکاران مدل پیوسته را ارائه کردند که متأسفانه در رژیم کنترل شده با انتقال انبوه معتبر نیست. سپس گلفیر و همکاران مدلی را با در نظر گرفتن اثر انتقال جرم ایجاد کردند؛ اما در رژیم جنبشی معتبر نیست. بر اساس کارهای قبلی، پانگا و همکاران یک مدل پیوسته ارائه کردند که می‌تواند هم رژیم جنبشی و هم رژیم کنترل شده با انتقال جرم را به‌طور هم‌زمان ضبط کند. پس از آن، مدل پیوسته به‌طور گسترده‌ای برای بررسی اثر خواص سنگ یا سیال، از جمله هندسه جریان (خطی و شعاعی)، روش‌های تکمیل، نوع اسید تزریقی (اسید کلریدریک و اسید خودانحلال^۹)، ناهمگنی متوسط (وجود وگ‌ها^{۱۰} و شکاف‌ها) و دمای مخزن بر انتشار کرم‌چاله و حجم تزریق بهینه به‌طور گسترده به کار رفته است. اگرچه مطالعات فوق‌بیش‌های مهمی را در مورد فرایند انحلال به ارمغان می‌آورد؛ اما معادلاتی که به جریان سیال در سنگ اشاره می‌کنند، هم‌چنان بهبود بیشتری دارند. در اکثر مطالعات منتشر شده، از قانون داریسی برای ارتباط دادن سرعت جریان در افت فشار، نفوذپذیری سنگ و گرانروی سیال استفاده می‌شود. با این وجود، قانون داریسی فقط برای جریان‌های آرام معتبر است. در طول فرایند انحلال، با ادامه تزریق اسید، تخلخل در ناحیه محلول افزایش می‌یابد. کانال‌های بسیار نفوذپذیر نیز ممکن است در برخی مناطق ایجاد شوند، جایی که سنگ به‌طور کامل حل می‌شود.

6. Capillary tube model
7. Continuum Model
8. Network Model
9. Self-Diverting Acid
10. Vugs

1. Lumped-Parameter Model
2. Two-Parameter Model
3. Four-Parameter Model
4. Detailed-Chemistry Model
5. Darcy-Forchheimer Framework

به‌دست آوردن ساختار منافذ دقیق یک مغزه و تقریب تغییر آن در حین انحلال بسیار دشوار است و یکی از کاستی‌های استفاده از مدل مقیاس داری است. با این حال، با استفاده از مدل‌های مختلف مقیاس منافذ که نماینده مغزه هستند، می‌توان حساسیت نتایج به‌دست آمده از مدل‌های مقیاس داری را بررسی کرد. لیو و همکاران (۱۹۹۷) مدل‌های متوسط برای اسیدکاری کربنات را توسعه دادند. گلفیر و همکاران (۱۹۸۸) با جای‌گزینی چارچوب داری با چارچوب داری - فورچهایمر برای توصیف میدان جریان سیال، مدل مقیاس داری را به صورت زیر بیان کردند:

$$\nabla P + \frac{\mu}{K} u + \beta \rho |u| u = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\nabla \cdot u, \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\phi C_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (u C_f) = \nabla \cdot (\phi D_e \nabla C_f) - k_c a_v (C_f - C_s) \quad (11)$$

$$k_c (C_f - C_s) = R(C_s) \quad (12)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{R(C_s) a_v \alpha}{\rho_s} \quad (13)$$

که در آن P فشار سیال منفذی، μ گرانروی، K تانسور نفوذپذیری، u بردار سرعت و β به‌عنوان عدد فورچهایمر شناخته می‌شود که می‌تواند به‌طور تجربی به‌دست آید. ρ چگالی سیال، t زمان است و ϕ تخلخل سنگ است. C_f غلظت اختلاط املاح در فاز سیال و C_s غلظت اسید در سطح مشترک جامد و سیال است. D_e تانسور انتشار مؤثر، a_v سطح مقطع سطحی موجود برای واکنش در واحد حجم محیط، k_c ضریب انتقال جرم، $R(C_s)$ نرخ انحلال و a قدرت انحلال اسید است که به‌عنوان گرم جامد محلول در هر مول اسید واکنش داده شده، تعریف می‌شود. تخلخل با حل شدن سنگ افزایش می‌یابد که منجر به تغییر در نفوذپذیری، مساحت ویژه a_v و شعاع منافذ r_p می‌شود. از آنجایی که این متغیرها وابسته به ساختار منافذ هستند، یک مدل مقیاس منافذ که تکامل این متغیرها را با تغییر در تخلخل نشان می‌دهد برای تکمیل مدل مقیاس داری مورد نیاز است. ما در اینجا یک فرمول مبتنی بر نظریه فراکتال را برای ارتباط نفوذپذیری با تخلخل به‌صورت سطر بعد اتخاذ می‌کنیم:

علاوه بر این، جریان در این مناطق غیرخطی است و قانون داری دیگر قابل اجرا نیست. به‌منظور توصیف دقیق جریان سیال در ناحیه محلول، برخی از محققان از چارچوب داری - برینگمن - فورچهایمر^۱ به‌جای معادله داری برای شبیه‌سازی فرایند انتقال واکنشی استفاده می‌کنند. با این حال، کار آن‌ها محدود به شرایط دوبعدی است که نمی‌تواند به‌طور دقیق عملیات اسید کاری واقعی را نشان دهد [۵].

۲-۱-۱ مدل لوله‌مویبندی

این مدل برای نشان دادن آزمایش‌های نفوذ در مقیاس آزمایشگاهی استفاده می‌شود. هدف این است که با بررسی دقیق رفتار میکروسکوپی، درک بیشتری از رفتار کلی^۲ ایجاد کنیم. کاهش رسانایی هیدرولیکی با افزایش محتوای آب در مطالعات آزمایشگاهی بر روی جریان از راه مواد انقباض - متورم مشاهده شده است. سازوکار پیشنهادی که باعث کاهش رسانایی می‌شود، تغییر در توزیع اندازه منافذ است. ویژگی منحصر به فرد مدل جدید لوله‌مویبندی این است که با جریان آب به پایین لوله، سطح مقطع لوله برای محدود کردن جریان منقبض می‌شود؛ بنابراین نشان‌دهنده تغییر در توزیع اندازه منافذ مشاهده شده در آزمایش‌های فیزیکی است. داده‌های جریان از لوله‌مویبندی برای مدل‌سازی نتایج آزمایشگاهی استفاده می‌شود و بینش جدیدی در مورد رفتار جریان کل به‌دست می‌دهد. از این مدل نیز برای بررسی موضوع تورم رس - که خود نوعی آسیب چاه است - می‌توان استفاده کرد [۱۱].

۲-۱-۲ مدل پیوسته (مدل ریاضی)

مدل پیوسته دومقیاسی که توسعه یافته پانگا و همکاران (۲۰۰۵) است [۱۲]، شامل یک مدل مقیاس داری و یک مدل مقیاس منافذ است. مدل مقیاس داری فرایند انتقال واکنش اسید و تکامل سنگ را توصیف می‌کند. مدل مقیاس داری به اطلاعاتی در مورد فرایندهای مقیاس منافذ نیاز دارد که از مدل مقیاس منافذ به‌دست می‌آید. پیش‌بینی‌های مدل مقیاس منافذ به ساختار منافذ بستگی دارد که با زمان به دلیل انحلال تغییر می‌کند.

1. Darcy-Brinkman-Forchheimer Framework
2. Bulk

از جمله منافذ و گلو اجرا می‌شود. تغییرات در هندسه شبکه منافذ ناشی از انحلال کلسیت بر اساس سرعت واکنش شیمیایی ناهمگن در سطح کانی در نظر گرفته می‌شود. شبکه‌ها حوزه‌های دوبعدی و سه‌بعدی را با تعداد منافذ متنوع در نظر می‌گیرند.

فرد و فوگلر (۱۹۹۸) یک مدل شبکه سه‌بعدی را با استفاده از یک بستر پر از کره با اندازه متغیر ارائه می‌دهند. جداسازی کره‌ها برای شناسایی مراکز منافذ و گلو استفاده می‌شود. رسانایی بین منافذ به صورت عددی با استفاده از محلول ونتوری هاپرپولیک^۱ حساب می‌شود. انتقال جرم مقیاس منافذ با استفاده از یک رابطه هاگن-پوازوی^۲ (با فرض شعاع مؤثر به گونه‌ای که رسانایی با منافذ گلوگاه واقعی مطابقت دارد) مدل‌سازی می‌شود. واکنش بر اساس عدد دامکوهرل^۳ (Da) محلی بر اساس ابعاد گلو انجام می‌شود. به دانه‌های کروی اجازه داده می‌شود تا تحت انحلال جمع شوند و حجم منافذ افزایش یابد. ادغام منافذ ظاهراً با این واقعیت تسهیل می‌شود که دانه‌ها می‌توانند کاملاً حل شوند، اگرچه شبکه ساختار و شماره هماهنگی ثابت خود را حفظ می‌کند. گلوگاه حل شده شعاع خود را حفظ می‌کند و حتی زمانی که ماتریکس اطراف کاملاً حل شده‌است، به ایجاد مقاومت در برابر جریان ادامه می‌دهد [۸].

محیط‌های متخلخل با استفاده از مدل‌های شبکه منفذ مکعبی دو و سه‌بعدی بررسی می‌شوند. منافذ به صورت کروی مشخص و به وسیله گلوگاه‌های استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای به یکدیگر متصل می‌شوند. اندازه منافذ دارای توزیع یک‌نواخت است و اندازه گلوها به اندازه منافذ متصل به آن‌ها مربوط می‌شود. معادلات حاکم بر مسئله انتقال واکنشی با انحلال محیط متخلخل در این بخش به شرح زیر ارائه شده‌است: تعیین میدان فشار، موازنه جرم، رویکرد سینتیکی ساده‌شده، به‌روزرسانی هندسه، معیار انحراف استاندارد برای تفسیر توزیع اسید و اعداد بدون بعد.

۲-۱-۳-۱-۲ میدان جریان حالت پایدار

برای به‌دست‌آوردن میدان فشار شبکه، جریان حالت پایدار یک سیال تراکم‌ناپذیر تک‌فاز را در نظر می‌گیریم که در آن بقای جرم برای هر منفذ به صورت زیر است [۱۳]:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{(\pi D_f)^{(1-D_T)/2} (8-4D_f)^{(1+D_T)/2} (3+D_{T0}-D_{f0})}{(\pi D_{f0})^{(1-D_{T0})/2} (8-4D_{f0})^{(1+D_{T0})/2} (3+D_T-D_f) \left(\frac{\theta}{1-\theta}\right)^{(3+D_T)/2} \left(\frac{\theta_0}{1-\theta_0}\right)^{-3+D_{T0}/2}} \quad (14)$$

با تعریف فراکتال بعد فضای منافذ و پر پیچ‌وخم، D_T و D_F به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$D_T = 1 + \frac{\ln\left(1 - \frac{\theta}{2} + \frac{\sqrt{1-\theta}}{4} + \frac{(1+\theta+\sqrt{1-\theta})\sqrt{9-5\theta-8\sqrt{1-\theta}}}{8\theta}\right)}{\ln\left(\frac{D_f^{-1} \lambda_{max} \sqrt{1-\phi} \pi}{D_f \lambda_{min} \sqrt{\phi} 8-4D_f}\right)} \quad (15)$$

جایی که dE بعد اقلیدسی است λ_{min} و λ_{max} به ترتیب کوچک‌ترین قطر منافذ و بزرگ‌ترین قطر هستند. ضریب انتقال جرم و ضرایب پراکندگی مؤثر در داخل منافذ با روابط زیر بیان می‌شوند:

$$Sh = \frac{2R_e r_p}{D_m} = Sh_{\infty} + \frac{0.7}{m^{1/2}} Re_p^{1/2} Sc^{1/3} \quad (16)$$

$$D_e X = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_X |u| r_p}{\phi} \quad (17)$$

$$D_e T = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_T |u| r_p}{\phi} \quad (18)$$

که در آن Sh عدد شروود است که نشان‌دهنده ضریب انتقال جرم بدون بعد است. D_m انتشار مولکولی است. Re_p عدد منافذ رینولدز است که به صورت $Re_p = 2ur_p/v$ تعریف شده‌است، v گرانروی سینماتیکی است. Sc عدد اشمیت است که به صورت $Sc = v/D_m$ تعریف شده‌است. $D_e T$ و $D_e X$ به ترتیب ضریب پراکندگی طولی و عرضی هستند. α_{os} ، λ_X و λ_T ثابت‌هایی هستند که به ساختار منافذ بستگی دارند و مقادیر معمولی آن‌ها به ترتیب ۰/۵، ۰/۵، ۰/۱ برای یک بستر پر از کره هستند.

۲-۱-۳-۲ مدل شبکه

یک رویکرد مدل‌سازی شبکه منفذی برای درک رژیم‌های انحلال مواد معدنی در طول حمل‌ونقل راکتیو و هم‌چنین تغییرات در تخلخل و نفوذپذیری پیشنهاد شده‌است. مشکل حمل‌ونقل با در نظر گرفتن کامل تعادل جرمی املاح در تمام فضاهای منفذی،

1. Hyperbolic Venturi
2. Hagen-Poiseuille Equation
3. Damköhler Number

ناهمگن و $A_{r,i}$ سطح فعال موجود منفذ i است. در سمت چپ عبارت انباشت است که در ادامه این بخش گسسته شده‌است. در سمت راست، دو عبارت اول نرخ‌های ورودی جرم فرارفتی را در نظر می‌گیرند، که با جرمی که از گلوگاه‌های متصل ij به منافذ i می‌رسد و نرخ خروج جرم فرارفتی، نشان‌دهنده جرمی که از منافذ i از راه گلوگاه ij خارج می‌شود، نشان داده می‌شود. عبارت سوم سرعت تغییر جرم را به دلیل انتشار بین منافذ i و تمام گلوهای متصل ij توصیف می‌کند و آخرین اصطلاح تغییر جرم گونه‌ها را به دلیل واکنش شیمیایی ناهمگنی که در سطح فعال موجود منفذ i رخ می‌دهد، توصیف می‌کند.

۲-۳-۱-۳ تعاریف هندسه و به‌روزرسانی

از آنجایی که راه‌حل ما شامل تغییرات هندسی است، در هر مرحله زمانی در طول شبیه‌سازی، حجم‌های کنترلی منافذ و گلو تغییر می‌کنند. بدین ترتیب، پس از هر مرحله زمانی، با حل میدان غلظت بر اساس موازنه جرم، تغییر حجم فضاهای منفذی از رابطه بین جامد مصرفی در سطح واکنش‌پذیر موجود در هر فضای منفذی و چگالی ماده معدنی واکنشی که محیط متخلخل را تشکیل می‌دهد، به دست می‌آید. با در نظر گرفتن یک سرعت واکنش مرتبه اول برای واکنش شیمیایی ناهمگن و یک ضریب استوکیومتری که مصرف اسید کلریدریک ($\alpha=A$) و مصرف ماده معدنی فعال را مرتبط می‌کند، تغییر حجم جامد به‌عنوان تابعی از زمان این چنین ارائه می‌شود:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{R_{(het)} A_{r,i} \beta}{\rho_{solid}} = \frac{(k_r c_A) A_{r,i} \beta}{\rho_{solid}} \quad (24)$$

که در آن A_r مساحت سطح فعال منفذ یا گلوست، c_A غلظت جرم اسیدی منفذ یا گلوست، β ضریب استوکیومتری است که مصرف اسید را به کانی فعال مصرفی مرتبط می‌کند، ρ_{solid} چگالی جامد ماده معدنی راکتیو جامد است و k_r ثابت جنبشی واکنش شیمیایی ناهمگن است. از معادله (24)، می‌توان سه کمیت مهم را شناسایی کرد: جرم مصرفی اسید $m_{A,con}$ ، جرم مصرفی جامد m_{solid} و حجم مصرفی جامد V_{con} . می‌توان تغییر حجم منافذ dV_i و گلوها dV_{ij} را تعیین کرد و این تغییرات حجم را به افزایش شعاع منافذ dr_i و تخمین افزایش شعاع گلو dr_{ij} مرتبط کرد.

$$\sum_{ij} q_{ij} = 0 \quad (19)$$

سرعت جریان حجمی از راه گلوگاه منفذی با اختلاف فشار بین منافذ متصل i و $(P_i - P_j)$ و رسانایی گلوگاهی c_{ij} به شرح زیر تعیین می‌شود:

$$q_{ij} = c_{ij} (P_i - P_j) \quad (20)$$

رسانایی گلو با استفاده از قانون پوازوی برای جریان آرام در یک لوله استوانه‌ای به دست می‌آید.

$$c_{ij} = \frac{\pi r_{ij}^4}{8 \mu_{ij}} \quad (21)$$

که در آن شعاع سطح مقطع گلو r_{ij} است، μ گرانروی دینامیکی سیال و l_{ij} طول ij گلو است. جای‌گزینی معادله (20) و معادله (21) به معادله (19) یک سامانه جبری خطی برای میدان فشار ناشناخته برای فشار در هر منفذ حل شده است. با در نظر گرفتن دبی کل از راه شبکه Q پس از تعیین میدان فشار به دست می‌آید و از قانون دارسی که در معادله (22) بیان شده، برای محاسبه نفوذپذیری مطلق K سامانه استفاده می‌شود [8].

$$K = \frac{\mu Q L}{A \Delta P} \quad (22)$$

۲-۳-۱-۲ میدان تمرکز

مشکل انتقال و انحلال واکنشی با موازنه جرم در تمام فضاهای منافذ و گلوهای موجود توصیف می‌شود و از معادلات موازنه جرم گونه‌های شیمیایی استنباط می‌شود. انتقال یک‌گونه شیمیایی از راه انتقال^۱ و انتشار انجام می‌شود. برای حجم کنترلی که با منافذ نشان داده می‌شود، معادله موازنه جرم برای گونه‌های شیمیایی α در منافذ i به صورت زیر است:

$$\frac{d}{dt} (c_{\alpha,ij} V_{ij}) = \sum_{ij,in} c_{\alpha,ij} q_{ij} - c_{\alpha,i} \sum_{ij,out} q_{ij} + \sum_{ij} A_{ij} D_{\alpha} \left(\frac{c_{\alpha,ij} - c_{\alpha,i}}{0.5 l_{ij} + r_i} \right) - R_{(het)\alpha} A_{r,i} \quad (23)$$

جایی که t زمان است، $c_{\alpha,i}$ غلظت جرمی گونه‌ها در منافذ i ، $c_{\alpha,ij}$ غلظت جرمی گونه α ها (α) در گلو ij است، V_i حجم منافذ i ، A_{ij} سطح مقطع گلو ij است، D_{α} ضریب انتشار گونه‌هاست، r_i شعاع منفذ i ، $R_{(het)\alpha}$ نرخ واکنش گونه‌ها به دلیل واکنش شیمیایی

1. Advection

۲-۱-۳-۴ بی‌بعدسازی

متغیرها و مشخصه‌های بدون بعد برای ساده‌سازی بیشتر به کار می‌روند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} x_D &= \frac{x}{L} & y_D &= \frac{y}{L} & z_D &= \frac{z}{L} \\ U &= \frac{u}{u_0} & B &= \frac{K_0 \beta \rho u_0}{\mu} \\ t_D &= \frac{t}{L/u_0} & r_D &= \frac{r_p}{r_0} & a_v D &= \frac{a_v}{a_0} \\ k &= \frac{K}{K_0} & C_D &= \frac{C_f}{C_0} & P_D &= \frac{P - P_e}{(\mu u_{0L})/k_0} \\ D &= \frac{D_e}{D_m} & Da &= \frac{R_s \bar{r}_0 L}{u_0} & Pe_L &= \frac{u_0 L}{D_m} \\ h_T^2 &= \frac{2R_s \bar{r}_0}{D_m} & N_{ac} &= \frac{\alpha C_0}{\rho_s} & m\phi^2 &= \frac{k_s a_0 L^2}{D_m} \\ N_{ac} &= \frac{\alpha C_0}{\rho_s} & m\phi^2 &= \frac{k_s a_0 L^2}{D_m} & \eta &= \frac{2\bar{r}_0}{L} & \alpha_{LH} &= \frac{H}{L} \\ \alpha_{LW} &= \frac{W}{L} \end{aligned} \quad (25)$$

H و W به ترتیب ارتفاع و عرض دامنه هستند. U بردار سرعت بدون بعد است. η نسبت طول منفذ به دامنه است. ز نفوذپذیری و B ضریب غیرداری بدون بعد هستند. مشخصه‌های به دست آمده از بی‌بعدسازی عبارت‌اند از مقیاس منافذ مدول Thiele h_T^2 ، که به عنوان نسبت زمان انتشار به زمان واکنش تعریف و عدد Da دامکوهلر به عنوان نسبت زمان انتقال به زمان واکنش تعریف می‌شود. عدد پکلت محوری Pe_L ، که به عنوان نسبت نرخ انتقال انتقالی به سرعت انتقال انتشاری تعریف می‌شود. ظرفیت اسیدی عدد N_{ac} که به عنوان حجم جامد محلول در واحد حجم اسید مصرف شده تعریف می‌شود. مدول ماکروسکوپی ϕ^2 Thiele معادل مقیاس مغزه مدول Thiele در مقیاس منافذ است. جزئیات بیشتر در مورد تعریف این گروه‌های بدون بعد را می‌توان در پانگا و همکارانش (۲۰۰۵) یافت. هدف استفاده از اعداد بدون بعد در انتقال واکنشی تعمیم پیش‌بینی‌ها و نتایج در طیف وسیعی از شرایط انتقال و سرعت واکنش است. مشکلات مربوط به انتقال واکنشی معمولاً اعداد Pe ، Da و $PeDa$ را برای مشخص کردن الگوهای انحلال مختلف در نظر می‌گیرند. عدد رینولدز نسبت اثرات اینرسی به نیروهای گران‌رو را بیان می‌کند و با فرمول زیر می‌توان آن را حساب کرد:

$$Re = \frac{\rho_f v_0 \sqrt{k}}{\mu_f} \quad (26)$$

که در آن ρ_f چگالی سیال و v_0 یک سرعت مشخصه است. عدد

پکلت به عنوان نسبت نرخ انتقال به سرعت انتشار یک گونه شیمیایی تعریف می‌شود:

$$Pe = \frac{v_0 \sqrt{k}}{D_\alpha} \quad (27)$$

که در آن D_α ضریب انتشار گونه‌هاست. $PeDa$ به عنوان نسبت سرعت واکنش و سرعت انتقال جرم انتشاری تعریف می‌شود.

$$PeRe = \frac{k_r}{A_{ss} D_\alpha} \quad (28)$$

که در آن k_r ثابت واکنش و A_{ss} سطح ویژه محیط متخلخل است. در نهایت، عدد دامکوهلر که نشان‌دهنده نسبت سرعت واکنش به سرعت انتقال است، به عنوان نسبت اعداد $PeDa$ و Pe تعریف می‌شود [۸، ۱۴].

$$Da = \frac{k_r}{v_0 \sqrt{k} A_{ss}} \quad (29)$$

۲-۱-۴ مدل نیمه تجربی

بیوسی و گلاسرگن در سال ۲۰۰۵ [۱۵] به بیان یک مدل نیمه تجربی در خصوص توسعه کرمچاله‌ها پرداختند که در آن اصول اساسی فیزیکی و شیمیایی مسئله لحاظ می‌شود و دارای دقت قابل قبولی است. این مدل، نیمه تجربی و دقت آن به دو مشخصه تجربی وابسته است که باید در یک تست ساده در مغزه انجام شود. هم‌چنین از داده‌های موجود در سایر مطالعات هم می‌توان برای تعیین این ضریب‌ها استفاده کرد. در این مدل نرخ متوسط رشد کرمچاله در یک سنگ هموزن به صورت تابعی از نرخ تزریق اسید مدل‌سازی می‌شود. وابستگی مدل به عبورپذیری، دما و نوع اسید غلظت آن با استفاده از مؤلفه‌های تنظیم‌شونده بیان می‌شود. در این مدل مشخصه‌های فاکتور بازدهی کرمچاله (W_{eff}) و فاکتور B برای کرمچاله با روابط زیر حساب می‌شود. نرخ رشد کرمچاله با این رابطه حساب می‌شود:

$$V_{wh} = W_{eff} \cdot V_i^{\frac{2}{3}} \cdot B(V_i)$$

V_i نرخ سرعت سیال است.

۳. شبیه‌سازی تزریق اسید در مخازن ماسه‌سنگی

اسیدکاری ناحیه پایین حفره یکی از روش‌های انگیزش چاه است که شامل تزریق اسید به داخل چاه تحت فشار، زیر فشار شکست

توسعه طراحی با استفاده از ابزارهای مدرن برای شبیه‌سازی دقیق تصفیه اسید، بیشترین پتانسیل را برای افزایش اثربخشی اسیدکاری ناحیه ته چاهی نشان می‌دهد. علاوه بر این، شبیه‌ساز عملیات اسیدکاری و نمونه‌هایی از کاربرد آن در عمل برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی طراحی عملیات اسیدکاری توضیح داده شده است [۱۶، ۱۷]. برای حل مشکل ساخت طراحی بهینه تصفیه اسید در چارچوب نرم‌افزار توسعه‌یافته، لازم است اقدامات زیر به‌طور مداوم انجام شود:

۱- ساختن مدلی از ناحیه ته چاهی که حاوی داده‌های ترکیب کانی‌شناسی سنگ، کلماتنت‌ها، خواص سیال مخزن و مؤلفه‌های چاه باشد.

۲- تنظیم مؤلفه‌های مدل فیزیکی و ریاضی اسیدکاری بر روی نتایج کار واقعی انجام‌شده بر روی چاه قبل یا در چاه‌های مشابه.

۳- شناسایی طرح اسیدکاری که حداکثر اثر اقتصادی را با بهینه‌سازی غلظت معرف، نرخ تزریق و حجم ارائه می‌دهد. به‌منظور حل هر یک از مسائل فوق‌الذکر، الگوریتم‌ها و ماژول‌های محاسباتی مربوطه در چارچوب توسعه شبیه‌ساز تصفیه اسید ایجاد شدند. روش ساخت یک طراحی تأثیر اسید در زیر با شرح هر یک از نمونه‌های ماسه ماژول از نحوه کار آن‌ها توضیح داده شده است [۱۶].

۳-۱ شرح مدل اسیدی

شبیه‌ساز اسید توسعه‌یافته بر اساس یک ماژول محاسبه مستقیم عملیات اسید است. این ماژول برای شبیه‌سازی تزریق ترکیب اسیدی به مخزن، واکنش‌های شیمیایی اجزای ترکیبات اسیدی با مواد معدنی و کلماتنت‌ها، تغییر در تخلخل و نفوذپذیری ناشی از انحلال مواد معدنی و تعیین تغییر نهایی در فاکتور ضریب پوسته پس از عملیات در نظر گرفته شده است. ماژول محاسبه مستقیم دو رویکرد مدل‌سازی را با استفاده از الگوریتم‌هایی برای محاسبه تصفیه اسید در شبکه‌های سه‌بعدی و دوبعدی پیاده‌سازی می‌کند.

رویکرد اول الگوریتم‌هایی را برای محاسبه تصفیه اسید بر روی شبکه‌های سه‌بعدی^۴ (شکل (۳)) نشان می‌دهد که بر اساس یک مدل دوفازی (آب، نفت) چندجزئی جریان سیال است. این مدل

4. PEBI

هیدرولیکی است. معمولاً از مخلوطی از اسیدهای هیدروفلوئوریک و کلریدریک با افزودنی‌های مختلف در مخازن ماسه‌سنگ استفاده می‌شود. اسید موجود در مخزن کلماتنت‌ها^۱ را از فضای منافذ حذف و مواد معدنی سنگ را حل می‌کند. فرایندهای انحلال در مخازن ماسه‌سنگ با انواع واکنش‌های شیمیایی که به سه گروه تقسیم می‌شوند، مشخص می‌شود [۱۵ و ۱۶]:

۱- واکنش‌های اولیه که فرایند انحلال سنگ با اسید گل را توصیف می‌کند.

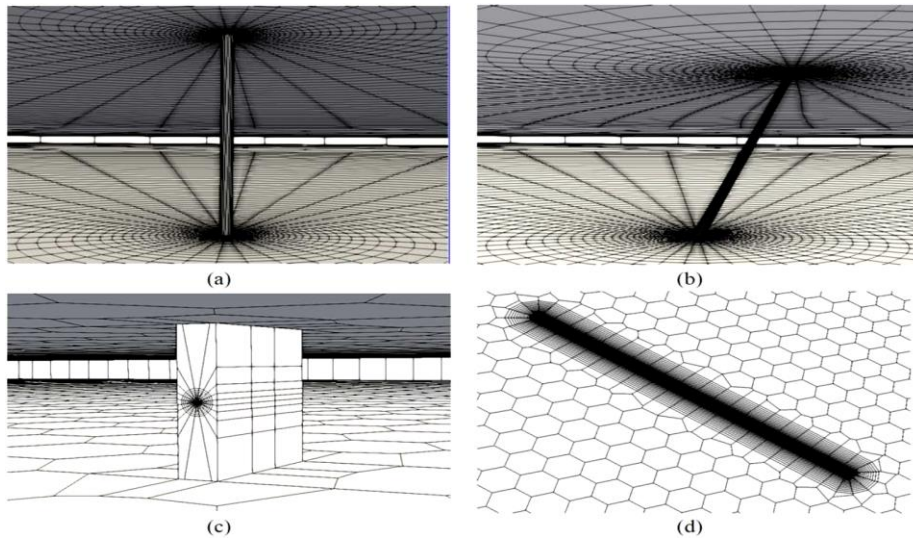
۲- واکنش‌های ثانویه که فرایند تشکیل رسوب سیلیکاژل را در نتیجه برهم‌کنش اسید هیدروفلوئوریک به‌دست‌آمده در نتیجه واکنش‌های اولیه با آلومینوسیلیکات‌ها توصیف می‌کند.

۳- واکنش‌های درجه سوم که فرایند تشکیل رسوب سیلیکاژل را در نتیجه برهم‌کنش فلوریدهای آلومینیوم حل‌شده در آب و در نتیجه واکنش‌های اولیه و ثانویه با آلومینوسیلیکات‌ها توصیف می‌کند.

ده‌ها ترکیب شیمیایی، یون‌ها و مواد معدنی می‌توانند در واکنش‌های شیمیایی فوق‌الذکر واکنش نشان دهند؛ علاوه بر سیلیکاژل، سایر ترکیبات نیز می‌توانند ته‌نشین شوند. نشان‌داده شده است که ترکیبات آلومینیوم، کلسیم، پتاسیم، سدیم و آهن نیز می‌توانند ته‌نشین شوند و نتیجه ته‌نشینی توصیف‌شده بر نفوذپذیری ناحیه ته چاهی تأثیر منفی می‌گذارد.

نتیجه تمام واکنش‌های شیمیایی بین اسید و مواد معدنی، کلماتنت‌ها تغییر در تخلخل و نفوذپذیری ناحیه حفرة ته چاهی است که می‌تواند مثبت یا منفی باشد. ترکیبی از عوامل مانند بهبوددهنده‌ها در ترکیب اسیدی، کیفیت معرف‌ها و سیالات، سازگاری معرف‌ها و سیالات تشکیل‌دهنده، قابلیت انحلال بخش فعال ترکیب اسید، کیفیت انتخاب ترکیب در شرایط خاص. دما، نوع آسیب، طراحی عملیات اسیدکاری (شامل مراحل پیش از فلاش^۲ و فلاش^۳) بر نتیجه اسیدکاری منطقه حفرة ته چاهی تأثیر می‌گذارند. طراحی اسیدکاری شامل محاسبه و تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اسیدها مانند ترکیب و حجم سیالات، سرعت، توالی پمپاژ در شرایط مخزن (معدن‌شناسی، دما، فشار و غیره) است.

1. Colmatants
2. Pre-Flush
3. Flush



شکل ۳. ساختن یک شبکه سه‌بعدی در مورد چاه عمودی (a)، چاه انحرافی (b)، چاه افقی (c)، و شکاف هیدرولیکی (d) [۱۶].

Figure 3. Building a 3D grid in the case of a vertical well (a), a deviation well (b), a horizontal well (c), and a hydraulic fracture (d) [16].

شکستگی‌های شکاف هیدرولیکی به‌وسیله تخلخل پروپانت^۱ تعیین می‌شود. معادلات کلیدی که مدل تصفیه اسید را توصیف می‌کند در زیر نشان داده شده‌است. قوانین موازنه جرم اجزای آب در فاز آب به‌شکل زیر است:

$$\frac{\partial \psi S_w C_i}{\partial t} + \text{div}(C_i \vec{U}_w) = \sum_{r=1}^{Nr, aq} v_{ir} I_{r, aq} + \sum_{r=1}^{Nr, s} v_{ir} I_{r, s} + Q_{i, well} \quad (30)$$

$$i=1, N_{aq}, x \in \Omega_m \quad (31)$$

v_{ir} ضریب استوکیومتری است، $I_{r, aq}$ ، $I_{r, s}$ ، α -امین سرعت واکنش همگن در فاز آب، s ، α -امین سرعت واکنش ناهمگن در فاز آب، N_{aq} عدد اجزای آب، $N_{r, aq}$ تعداد واکنش‌های همگن است و $N_{r, s}$ عدد واکنش‌های ناهمگن است. فرض بر این است که رئولوژی انحراف‌کننده به‌وسیله یک مدل توانی سیال توصیف می‌شود:

$$\mu = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (32)$$

که در آن K ضریب قوام، $\dot{\gamma}$ نرخ برش و n شاخص قانون توان است. به‌منظور محاسبه اثرات حرارتی واکنش‌های شیمیایی، سامانه معادلات مدل با معادله قانون موازنه انرژی تکمیل می‌شود که به‌شکل زیر است [۱۶]:

تعداد دلخواه از مواد معدنی در سنگ، واکنش‌های شیمیایی کنترل‌شده جنبشی ناهمگن و همگن را در نظر می‌گیرد [۱۸]. استفاده از شبکه‌های سه‌بعدی امکان ساخت یک شبکه دقیق را در نزدیکی چاه فراهم می‌کند که به‌وضوح ویژگی‌های هندسی تکمیل چاه مانند چاه‌های انحرافی و افقی، وجود شکاف‌های هیدرولیکی و شکاف‌های هیدرولیکی چندمرحله‌ای را حل می‌کند. رویکرد دوم ماژول محاسبه مستقیم الگوریتم‌هایی را برای محاسبه تصفیه اسید بر روی شبکه‌های دوبعدی قائم بر اساس مدل جریان یک سیال چندجزئی تک‌فاز نشان می‌دهد. این مدل هم‌چنین تعداد دلخواه مواد معدنی در سنگ، تعداد دلخواه واکنش‌های شیمیایی و اجزای آب را در نظر می‌گیرد. استفاده از شبکه‌های دوبعدی و فرض تک‌فاز بودن جریان باعث می‌شود تا سرعت محاسبات به‌میزان قابل توجهی افزایش یابد و درعین حال ویژگی‌های کلیدی تعیین‌کننده اثر اسیدکاری؛ مانند ترکیب کانی‌شناسی دقیق سنگ و انواع واکنش‌های شیمیایی حفظ شود. کاربرد این الگوریتم‌ها در مقایسه با موارد فوق به چاه‌های عمودی و انحرافی بدون شکاف هیدرولیکی محدود شده‌است [۱۶].

Ω حوزه محاسباتی است که در آن جریان سیال و واکنش‌های شیمیایی رخ می‌دهد. جریان در شکاف‌های هیدرولیک و ماتریس با یک گروه معادلات فیلتراسیون توصیف می‌شود، درحالی‌که تخلخل

1. Proppant

دارای نفوذپذیری بالا و پایین است. ارتفاع مخزن اول در محوطه مرز چاه ۸/۴ متر و ارتفاع مخزن دوم ۱۴ متر است. نفوذپذیری مخزن با نفوذپذیری بالا ۵۴/۸ میلی‌داری و نفوذپذیری لایه کم‌تراوا ۰/۵۹ میلی‌داری است. کانی‌شناسی لایه‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است [۱۶].

در چاه مورد نظر، تصفیه انجام شد که در آن ترکیب اسید با سرعت ۱۰ مترمکعب در ساعت و حجم ۱۴ مترمکعب و سیال فروش با سرعت ۱۰ مترمکعب در ساعت و حجم ۲۳ مترمکعب تزریق شد. بر اساس داده‌های واقعی تولید چاه، نتیجه‌گیری شد که OPP انجام شده بی‌اثر است. در نتیجه محاسبه مستقیم عملیات اسیدکاری فاکتور پوسته ۳/۵۳+ به دست آمد. شکل (۵) توزیع تخلخل را در پایان عملیات اسیدکاری چاه نشان می‌دهد. سپس انطباق مدل با استخراج داده‌های واقعی انجام شد. پس از آن، محاسبه مستقیم عملیات اسیدکاری چاه تحت مؤلفه‌های تعریف شده در فرایند سازگاری انجام شد. در نتیجه فاکتور پوسته مقدار ۸/۴۴+ به دست آمد. علاوه بر این، طراحی تصفیه اسید بهینه شد. در فرایند بهینه‌سازی طراحی برای مرحله اسیدی، حجم محلول اسید در محدوده [۰، ۱۰] متر مکعب و غلظت هیدروفلوئوریک اسید در محدوده [۰، ۱۰]٪ متغیر بود. ارزش فعلی خالص^۱ به‌عنوان تابع هزینه در نظر گرفته شد. فرایند بهینه‌سازی طراحی در شکل (۶) نشان داده شده است.

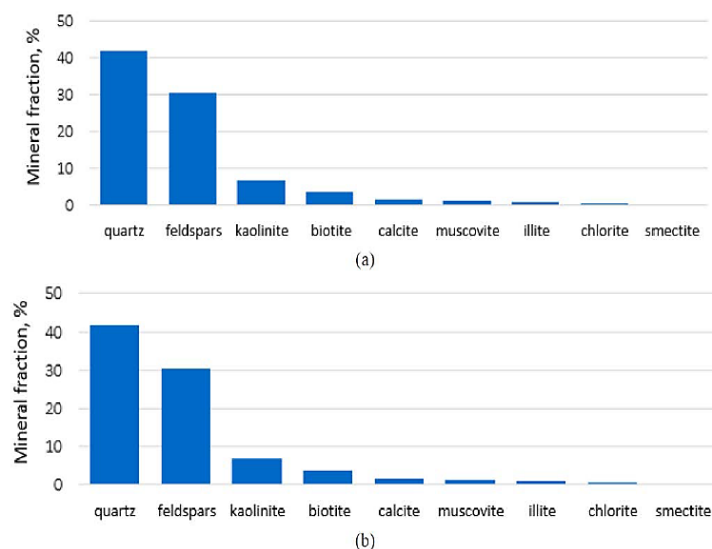
$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi C_o S_o H_o + \phi \sum_{i=1}^{Naq} C_i S_w H_i + (1 - \phi) H_s \rho_s) = \text{div}(\sum_{i=1}^{Naq} C_i H_i \vec{U}_w) + \text{div}(C_o H_o \vec{U}_o) + \text{div}(K_T \nabla T) + \sum_{i=1}^{Naq} C_i H_i Q_w + \sum_{r=1}^{Nr, aq} r_{r, aq} I_{r, aq} + \sum_{r=1}^{Nr, s} H_{r, s} I_{r, s} + Q_T \quad (33)$$

که در آن H_i آنتالپی جزء آب، T دما، H_o آنتالپی جزء نفت، H_s آنتالپی سنگ، ρ_s چگالی سنگ، K_T هدایت حرارتی، Q_T انرژی حاصل از چاه و C_o چگالی مولی نفت است [۱۶]. در شبیه‌ساز توسعه‌یافته، وظیفه تعیین فاکتور پوسته در چند مرحله انجام می‌شود:

- ۱- محاسبه جریان چاه در مؤلفه‌های حجمی فیلتراسیون اولیه مخزن.
- ۲- محاسبه اثر اسید در ناحیه ته چاهی سازند که منجر به اصلاح زمینه‌های نفوذپذیری و تخلخل می‌شود.
- ۳- محاسبه جریان چاه با در نظر گرفتن زمینه‌های تغییر یافته تخلخل و نفوذپذیری.
- تعیین تغییرات فاکتور پوسته بر اساس نسبت میزان ورودی چاه قبل و بعد از عملیات.

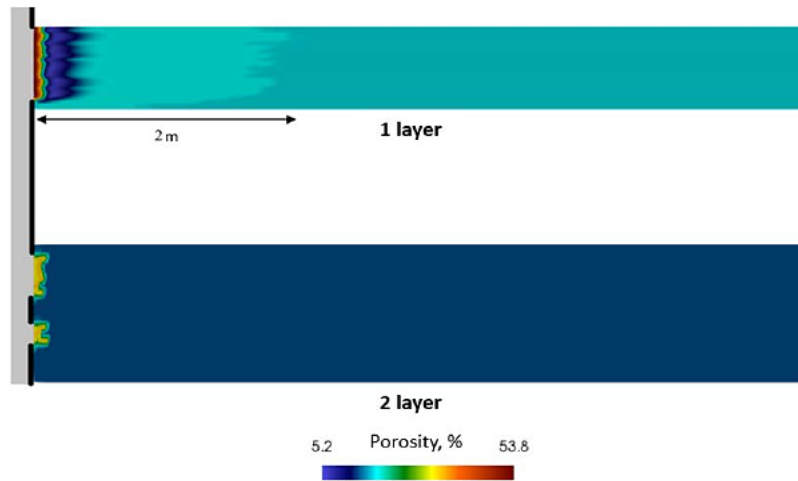
۲-۳ بهینه‌سازی طراحی اسیدکاری

در این آزمایش این بخش چاه عمودی با شعاع مخزن ۲۵۰ متر در نظر گرفته شده است. چاه ۲ لایه را قطع می‌کند که به ترتیب

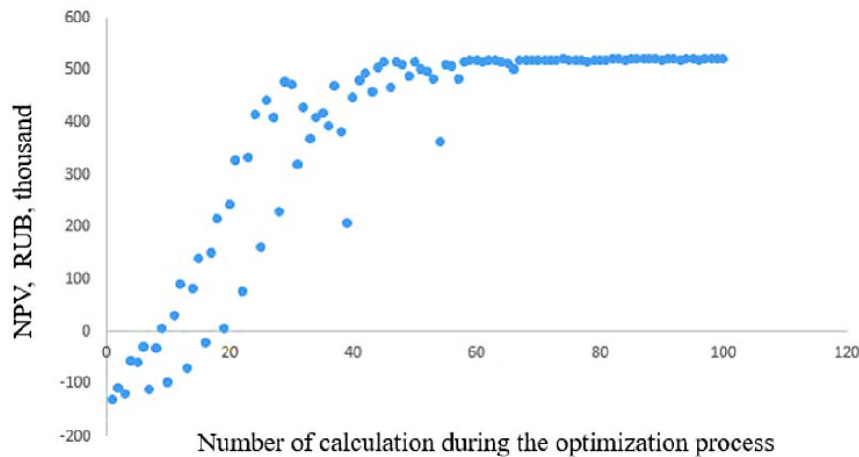


شکل ۴. کانی‌های سازند با نفوذپذیری بالا (a) و نفوذپذیری پایین (b) [۱۶].

Figure 4. Mineralogy of a high-permeable (a) and low-permeable (b) formation [16].



شکل ۵. توزیع تخلخل پس از عملیات اسیدکاری چاه [۱۶].
Figure 5. Porosity distribution after well acidizing treatment [16].



شکل ۶. NPV نسبت به مقدار بهینه [۱۶].
Figure 6. Dynamics of NPV convergence to the optimal value for iterations at the first well [16].

بهینه‌سازی انواع سیالات، نرخ‌ها و حجم‌ها در نرم‌افزار کالیبره‌شده با استفاده از مدل مخزن اپراتور و کالیبراسیون نرم‌افزار پس از انجام عملیات.

۴-۱ آزمایش و تفسیر جریان مغزه

مرحله اولیه رویکرد یک پارچه شامل آزمایش‌های جریان مغزه بر روی نمونه‌های واقعی سازند داده‌شده، یا حداقل، سازنده‌های آفست^۱ نماینده است. قبل از آزمایش جریان مغزه، یک قطعه کوچک از سنگ باید برای تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس^۲ گرفته شود تا

در نتیجه بهینه‌سازی طراحی، مؤلفه‌های مرحله تزریق اسید به دست آمد: حجم ترکیب اسید ۴۹/۳ مترمکعب و غلظت اسید هیدروفلوئوریک ۰٪ است. نتیجه نشان می‌دهد که چاه باید با اسید هیدروکلریک تصفیه می‌شد [۱۶].

۴. رویکرد یک پارچه برای بهینه‌سازی اسیدکاری: شرح گام به گام

رویکرد یک پارچه برای بهینه‌سازی شامل مراحل زیر است: آزمایش جریان مغزه، تجسم نتایج جریان اصلی؛ کالیبراسیون سازوکارهای تعامل اسید و سنگ در نرم‌افزار بر اساس آزمایش‌های آزمایشگاهی.

1. Offset
2. XRD

۴- عکس با وضوح خوب از ورودی‌ها و خروجی‌های مغزه

۴-۲ ارائه نتایج آزمایش جریان مغزه

پس از اتمام مرحله ۱ که داده‌های کمی را مانند محتوای کانی‌شناسی، PVBT و نفوذپذیری ارائه می‌دهد، مرحله بعدی، تجسم ساختار کرم‌چاله داخلی، برای به‌دست‌آوردن اطلاعات زیر انجام می‌شود:

۱- رژیم تکثیر کرم‌چاله اسیدی

۲- مؤلفه‌های خاص هندسه کرم‌چاله

روش تجسم پیشنهادشده در اینجا میکروتوموگرافی پرتو ایکس نمونه‌های مغزه است. این روش وسیله‌ای غیر مخرب برای بازسازی توزیع فضایی سه‌بعدی (تصویر سه‌بعدی) ضریب تضعیف خطی^۲ پرتو ایکس در نمونه سنگ فراهم می‌کند. مقدار LAC برای هر ماده (به‌عنوان مثال، مواد معدنی) به ترکیب شیمیایی، چگالی مواد و انرژی تابش پرتو ایکس بستگی دارد [۴]. نمونه‌ای از بازسازی میکروسی‌تی در شکل (۸) ارائه شده‌است. چنان‌که در بالا ذکر شد، مناطق خالی به‌طور قابل توجهی تیره‌تر از سنگ هستند. با استفاده از این واقعیت، تصاویر میکروسی‌تی به‌صورت دیجیتالی برای تقسیم‌بندی تمام فضاهای خالی در سه‌بعدی پردازش شدند.

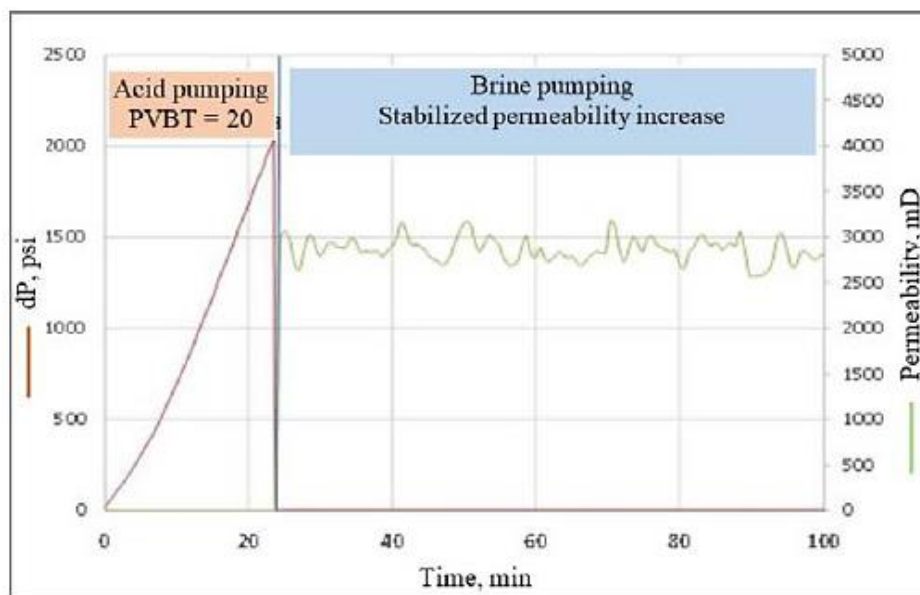
لیتولوژی نمونه دقیقاً مشخص شود. درصد سنگ آهک، دولومیت و کانی‌های غیر کربناته به‌شدت بر سرعت واکنش تأثیر می‌گذارد، هم در شرایط واقعی و هم در محاسبات نرم‌افزاری؛ در دماهای بالا، سرعت واکنش اسید با سنگ آهک می‌تواند ۱۰ برابر سریع‌تر از دولومیت باشد. انجام تست‌های XRD برای کل فاصله عملیات معمولاً به‌دلیل عدم وجود مواد اصلی یا به‌دلیل محدودیت‌های زمانی/بودجه‌ای پروژه امکان‌پذیر نیست. در نتیجه، چندین نقطه کلیدی را می‌توان برای تجزیه و تحلیل XRD انتخاب کرد و سپس توزیع سنگ‌شناسی اولیه از ورود به سامانه را می‌توان با توجه به اختلافات یافت‌شده بین XRD و داده‌های گزارش در این نقاط کلیدی تنظیم کرد. این پروفایل لیتولوژی تنظیم‌شده یا کالیبره‌شده با XRD می‌تواند به‌عنوان ورودی سنگ‌شناسی برای شبیه‌سازی نرم‌افزار انگیزش ماتریس استفاده شود [۴]. خروجی آزمون (شکل (۷)) در مراحل بعدی رویکرد فعلی استفاده می‌شود و باید حداقل اطلاعات زیر را داشته باشد:

۱- نفوذپذیری نمونه مغزه به نمک KCl قبل از قرارگرفتن مغزه

در معرض اسید اندازه‌گیری می‌شود.

۲- نفوذپذیری پس از شکست اسید

۳- حجم منافذ تا پیشرفت^۱

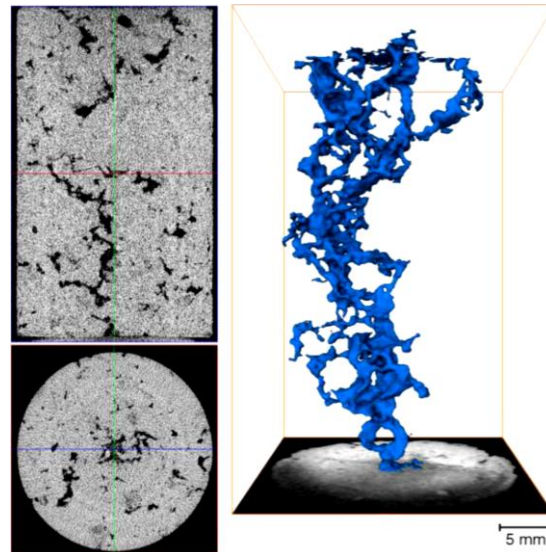


شکل ۷. خروجی مؤلفه‌های ارزشمند اندازه‌گیری و حساب‌شده در طول آزمایش‌های جریان مغزه اسید [۴].

Figure 7. Output of valuable parameters measured and calculated during the acid core flow tests [4].

1. PVBT

2. LAC



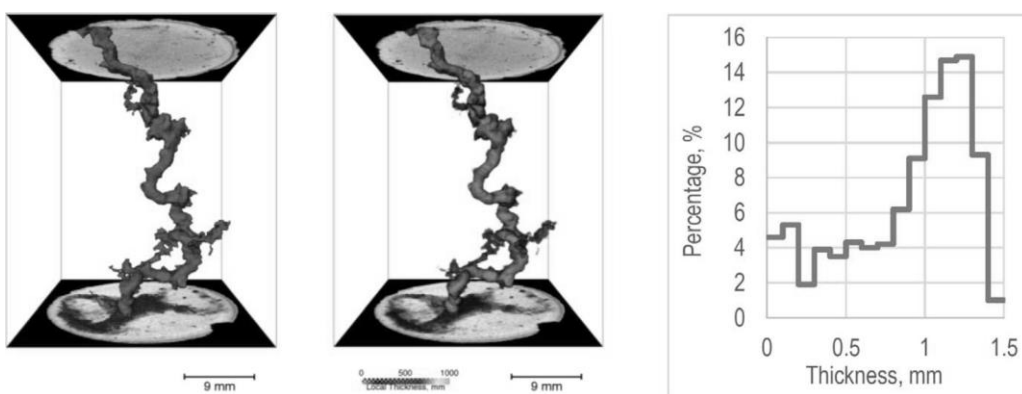
شکل ۸. نمونه‌ای از برش‌های افقی و عمودی بازسازی میکروسی‌تی (سمت چپ) و رندر سه‌بعدی یک کرم‌چاله در داخل نمونه مغزه (راست) [۴].

Figure 8. An example of horizontal and vertical slices of microCT reconstruction (left) and 3D render of a wormhole inside core sample (right) [4].

این حفره‌ها منافذ اصلی و منافذی هستند که در اثر عملیات اسیدکاری از جمله کرم‌چاله‌ها ایجاد می‌شوند. برای تجسم تنها ساختار کرم‌چاله، تمام نواحی خالی متصل به جز بزرگ‌ترین آن‌ها حذف شدند [۴].

شگردی که در بالا توضیح داده شد، امکان بازرسی کیفی بصری هندسه کرم‌چاله را در یک نمونه فراهم می‌کند. علاوه بر این، گردش‌های کاری پردازش تصویر پیچیده‌تر را می‌توان برای ارائه

خصوصیات کمی ساختار تولیدشده به کار برد. به عنوان مثال، مقدار ضخامت محلی (قطر کانال) را می‌توان در هر نقطه از یک کرم‌چاله حساب کرد (شکل ۹)؛ سمت چپ و مرکز). توزیع‌هایی که در اینجا و زیر نشان داده شده‌اند با استفاده از یک رویکرد شناخته‌شده برآزش کره به دست آمده‌اند. این شگرد بر اساس برآزش حداکثر کره در ساختار سه‌بعدی است [۴].



شکل ۹. سمت چپ، رندر سه‌بعدی از یک کرم‌چاله در یک نمونه مغزه دیجیتال. مرکز، توزیع ۳ بعدی ضخامت محلی کرم‌چاله. راست، توزیع ضخامت در کرم‌چاله در نظر گرفته شده است [۴].

Figure 9. Left, 3D render of a wormhole in a digital core sample (acid is injected from the bottom side); center, 3D distribution of local thickness of wormhole; right, thickness distribution at the considered wormhole [4].

برای یک برنامه پمپاژ معین با یک شبیه‌ساز قرارگیری اسید که به وسیله تاردی توصیف شده، شبیه‌سازی شده است. پروفایل‌های ورودی مخزن در شبیه‌ساز از معادلات کلاسیک موازنه جرم همراه با جریان داری حساب می‌شود. با نفوذ سیالات اسیدی به لایه‌های کربناته، کرم‌چاله‌ها (اگر شرایط اجازه دهد) ایجاد می‌شوند و قابلیت تزریق‌پذیری لایه را بهبود می‌بخشند. از سوی دیگر، در صورت استفاده از مواد انحراف‌کننده، میزان تزریق‌پذیری کاهش می‌یابد. همان‌طور که شبیه‌سازی عملیات پیشرفت می‌کند، قابلیت تزریق‌پذیری هر لایه با افزودن اسید یا انحراف‌کننده به‌روز می‌شود. متغیرهای زیر در هر مرحله محاسبه و به‌روز می‌شوند:

۱- چاه

توزیع فشار، کسر حجمی همه سیالات، غلظت اسید، مشخصات سرعت/ سرعت جریان، بزرگ‌شدن مرز چاه، در صورت استفاده از سیلرهای توپ، موقعیت توپ‌ها و موجودی مشبک‌های باز.

۲- لایه‌های سازند

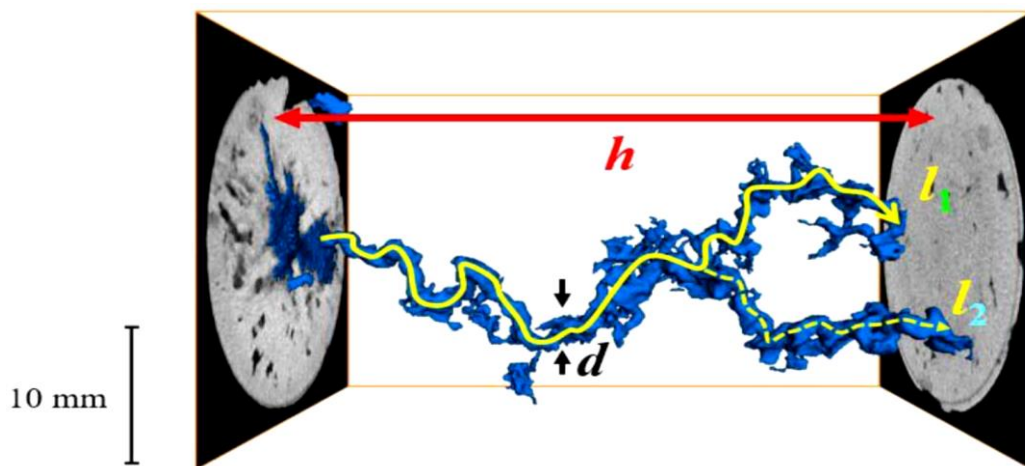
نمایه فشار دور از حفره چاه، نمایه تهاجم کرم‌چاله، جلوی سیالات، پروفایل ضریب پوسته کلی (پوسته‌های آسیب- تحریک- تکمیل)، سرعت‌های جریان.

برای رویکرد پیشنهادی در این مطالعه، مؤلفه‌های خروجی میکروسی تی سه‌بعدی زیر باید تحلیل شوند:

- ۱- ناحیه رسانای مؤثر سامانه کانال اسید acid-etched، A_e سطح مقطع به ضخامت کرم‌چاله بستگی دارد. با ضخامت d ، بعد مشخصه باید درک شود.
- ۲- نفوذپذیری کلی به‌دست‌آمده پس از نفوذ اسید در طول آزمایش جریان مغزه، باید بر اساس A_e و ناهم‌واری تنظیم شود. هرچه تعداد کانال‌های بیشتری در خروجی مغزه مشاهده شود، نفوذپذیری هر کانال کمتر است. اگر بسیاری از کانال‌ها، ضخامت کمتری از ضخامت بحرانی d_c داشته باشند (شکل (۱۰))، A_e بالا و k_a به‌طور قابل توجهی کمتر از نفوذپذیری اندازه‌گیری شده از آزمایش جریان مغزه خواهد بود [۴].

۳-۴ کالیبراسیون سازوکارهای تعامل اسید و سنگ در نرم‌افزار بر اساس آزمایش‌های آزمایشگاهی

پس از آنالیز برهم‌کنش اسید با سازند داده‌شده در مراحل ۱ و ۲، مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملیات اسیدکاری با استفاده از نرم‌افزار اختصاصی خاص باید انجام شود. جریان در لایه‌های چاه و سازند



شکل ۱۰. مدل تجسمی ساختار کرم‌چاله (آبی). سمت چپ و راست مدل مقاطع مدل دیجیتالی یک نمونه مغزه هستند. منطقه روشن مربوط به مواد معدنی و سیاه به فضای منافذ است [۴].

Figure 10. Visualized model of wormhole structure (blue). Left and right sides of the model are cross sections of digital model of a core sample [4].

۳- متغیرهای جهانی

ضریب پوسته‌کل، فشار حفره ته نتایج مرحله ۱ و ۲ با روش زیر در نرم‌افزار گنجانده شده‌است. ابتدا، لیتولوژی کالیبره‌شده XRD از مرحله ۱ برای ساخت مدل کانی‌شناسی لایه‌ها استفاده می‌شود. سپس، مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده در طول آزمایش‌های جریان مغزه در مرحله ۱ و سی‌تی‌اسکن کرم‌چاله در مرحله ۲، تا جریان شعاعی اندازه‌گیری می‌شوند و سپس برای کالیبره کردن ضرایب پیش‌فرض در نرم‌افزار استفاده می‌شوند. در طول کالیبراسیون، واکنش اسید به سنگ و ضرایب انتشار با شروع از داده‌های کتابخانه نرم‌افزار داخلی تکرار می‌شود. کالیبراسیون زمانی تکمیل می‌شود که خط مشخصه اسید برای لایه مخزن داده‌شده از نقطه (های) به دست آمده در طول آزمایش آزمایشگاهی عبور کند. نقطه آزمایشگاه، به نوبه خود، باید بر اساس سرعت واقعی کرم‌چاله، مقادیر PVBT تنظیم شده با حضور حفره‌های درون مغزه باشد. تنظیم PVBT برای حضور حفره‌ها و واگ‌ها بر اساس درک این است که شار بهینه تا دو مرتبه بزرگی در نمونه‌های ولوم کاهش می‌یابد [۱۹]. در این مرحله، نرم‌افزار به شرایط داده‌شده از نظر تعامل اسید به سنگ کالیبره می‌شود.

۴-۴ کالیبراسیون نرم‌افزار پس از عملیات

پس از مرحله قبل، کار اجرا می‌شود. پس از اجرای کار، نرم‌افزار باید نسبت به پاسخ چاه واقعی کالیبره شود. برای انجام این کار، قابل‌اعتمادترین شگرد تجزیه و تحلیل داده‌های سنسور دمای توزیع شده است [۲۰]. DTS امکان ارزیابی جریان سیال را در امتداد بازه تیمار شده فراهم می‌کند؛ بنابراین، پروفایل نفوذپذیری مدل چاه در نرم‌افزار را می‌توان ترجیحاً پس از آزمایش تزریق تنظیم کرد. به عبارت دیگر در این مرحله نرم‌افزار با شرایط داده‌شده در سطح، کالیبره می‌شود. بر اساس این داده‌ها، برنامه درمان یکبار دیگر در نرم‌افزار اسیدکاری بهینه شده‌است. پس از بهینه‌سازی، برنامه هم برای برهم‌کنش سازند با اسید (پس از مرحله ۳) و هم برای پروفایل تزریق چاه کالیبره می‌شود؛ بنابراین، این برنامه می‌تواند به عنوان برنامه بهینه برای چاه‌ها و فواصل Offset در نظر گرفته شود [۴].

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شده‌است که مهم‌ترین مطالب مربوط به عملیات اسیدکاری ماتریس و مدل‌های عددی آن بررسی شود که شامل موارد زیر هستند:

- ◀ پیشینه کلی از اسیدکاری ماتریس، تفاوت و انواع آن در مخازن کربناته و ماسه‌سنگی که در نوع و غلظت اسید مصرفی تأثیرگذار است و منجر به یک عملیات بهینه در طول درمان می‌شود.
 - ◀ واکنش‌های مهمی که در هر مرحله از این سازوکارها رخ می‌دهد، هر یک نیاز به بررسی دقیق برای جلوگیری از تشکیل رسوب سیلیکات، کاهش تخلخل و تراوایی دارند؛ در نتیجه در مخازن میکا و فلدسپات این واکنش‌ها چالش‌برانگیز هستند.
 - ◀ طبقه‌بندی اولیه و طبقه‌بندی‌های اخیر و بررسی کاربردهای تئوری و میدانی آن‌ها و فرمول‌بندی برگرفته از هر یک که ارتباط میان آن‌ها منجر به شناخت انواع الگوهای انحلال و تشکیل کرم‌چاله می‌شوند، به دست می‌آیند.
 - ◀ مقایسه میان عملیات بهینه و غیربهینه در مخازن کربناته و نتیجه مهم بهینه‌سازی در اسیدکاری ماتریس که می‌تواند درصد تولید را چشم‌گیرانه بالا برد و منجر به نتیجه مطلوبی در ضریب پوسته نهایی شود و هم‌چنین به لحاظ اقتصادی بسیار به صرفه باشد.
 - ◀ بررسی مخازن ماسه‌سنگی و ماهیت پیچیده آن، مخازن ماسه‌سنگی از کانی‌های متفاوت تشکیل شده‌اند؛ به همین دلیل از مخلوط HCL و HF استفاده می‌کنیم تا هم انحلال کانی رخ دهد و هم محصولات ناشی از واکنش‌ها باعث آسیب نشوند و در نتیجه واکنش با HCL از بین بروند و همین‌طور با یک رشته فرضیات مانند در نظر گرفتن کانی غالب و مؤلفه میانگین می‌توان مدل را ساده‌سازی کرد.
 - ◀ اهمیت بهینه‌سازی در مخازن ماسه‌سنگی نیز نشان داده شده‌است که می‌تواند به‌طور قابل توجهی در نتیجه نهایی تأثیرگذار باشد.
- باتوجه به موردهایی که بررسی شد، باید موارد زیر نیز هنگام اسیدکاری لحاظ شود:

1. Vuggy Samples
2. DTS

- [3] Ali, S., Frenier, W. W., Lecerf, B., Ziauddin, M., Kotlar, H. K., Nasr-El-Din, H. A., & Vikane, O. (2004). Virtual testing: the key to a stimulating process. *Oilfield Review*, 16(1), 58–68.
- [4] Abdrazakov, D., Ziauddin, M., Vernigora, D., Beletskaya, A., Yakimchuk, I., Olennikova, O., Usoltsev, D., Nikolaev, M., Panga, M., & Burlibayev, A. (2019). Integration of latest laboratory, software and retarded acid technologies to increase efficiency of acid treatments in carbonates: case studies from Central Asia. *International Petroleum Technology Conference*,
- [5] Liu, P., Ren, X., Kong, L., & Yao, J. (2020). Three-dimensional simulation of acidizing process in carbonate rocks using the Darcy–Forchheimer framework. *Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles*, 75, 48.
- [6] Liu, P., Yao, J., Couples, G. D., Huang, Z., Sun, H., & Ma, J. (2017). Numerical modelling and analysis of reactive flow and wormhole formation in fractured carbonate rocks. *Chemical Engineering Science*, 172, 143–157.
- [7] Liu, P., Yao, J., Couples, G. D., Ma, J., Huang, Z., & Sun, H. (2017). Modeling and simulation of wormhole formation during acidization of fractured carbonate rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 154, 284–301.
- [8] Tansey, J. (2014). Pore-network modeling of carbonate acidization. SPE Annual Technical Conference and Exhibition?
- [9] Ghommem, M., Zhao, W., Dyer, S., Qiu, X., & Brady, D. (2015). Carbonate acidizing: Modeling, analysis, and characterization of wormhole formation and propagation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 131, 18–33.
- [10] Maheshwari, P., Ratnakar, R., Kalia, N., & Balakotaiah, V. (2013). 3-D simulation and analysis of reactive dissolution and wormhole formation in carbonate rocks. *Chemical Engineering Science*, 90, 258–274.
- [11] Siemens, G., Blatz, J. A., & Ruth, D. (2007). A capillary-tube model for two-phase transient flow through bentonite materials. *Canadian geotechnical journal*, 44(12), 1446–1461.
- [12] Panga, M. K., Ziauddin, M., & Balakotaiah, V. (2005). Two-scale continuum model for simulation of wormholes in carbonate acidization. *AIChE journal*, 51(12), 3231–3248.
- [13] Esteves, B. F., Lage, P. L., Couto, P., & Kovscek, A. R. (2020). Pore-network modeling of single-phase reactive transport and dissolution pattern evaluation. *Advances in Water Resources*, 145, 103741.

به‌هنگام اسیدکاری ماتریس باید به افزایش‌دهنده‌ها برای جلوگیری از مشکلات دیگر بیشتر توجه شود؛ زیرا وجود آن‌ها می‌تواند سرعت اسید مصرفی را کاهش دهد، در نتیجه اسید به عمق نفوذ بیشتری رسوخ کند.

در مدل‌های عددی، به مدل شبکه باید بیشتر توجه کرد و خواص پتروفیزیکی مخزن و جزئیات را بیشتر بررسی کرد؛ زیرا که با انحلال سنگ، با گذشت عملیات اسیدکاری ماتریس ساختار منافذ تغییر می‌کند و این باعث تغییرات در بقیه موارد نیز می‌شود. این مدل بسیار به ساختار منافذ و خواص آن‌ها - که دارای اهمیت بالایی هستند - اشاره می‌کند.

برخلاف اهمیت توزیع سایز منافذ، به آن کمتر توجه می‌شود؛ در نتیجه باید درباره این مورد بیشتر تأمل کرد که با به‌کارگیری فناوری به‌نام رایانه‌توموگرافی می‌توانیم به سایز منافذ و توزیع آن‌ها دست یابیم.

پیش از عملیات اسیدکاری واجب است با نرم‌افزارهایی اعم از استیم‌پرو^۱ عملیات را به‌صورت بهینه شبیه‌سازی کرد، تا بتوانیم تولید را چند درصد بالا ببریم. این نرم‌افزار این امکان را فراهم می‌کند که بتوانیم در هر مرحله از شبیه‌سازی خروجی بگیریم و کالیبراسیون مؤلفه‌ها را انجام دهیم.

عملیات اسیدکاری ماتریس را در سنگ‌های ماسه‌سنگی به‌طور بهینه مدل‌سازی کنیم؛ زیرا نتیجه نهایی برخلاف انتظارات امکان تغییر دارد که از لحاظ هزینه می‌تواند کمک بزرگی محسوب شود.

مراجع

- [1] Helaleh, A. H., Changalvae, A. (2016). Investigating the effect of matrix acidification optimization of carbonate reservoirs of Darian formation in Ahvaz oil field. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 15, 84 [In Persian].
- [2] Leong, V. H., Mahmud, H. B., Law, M. C., Foo, H. C. Y., & Tan, I. S. (2018). A comparison and assessment of the modelling and simulation of the sandstone matrix acidizing process: a critical methodology study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 57, 52–67.

1. Stimpro

- [14] Soulaïne, C., Roman, S., Kovscek, A., & Tchelepi, H. A. (2017). Mineral dissolution and wormholing from a pore-scale perspective. *Journal of Fluid Mechanics*, 827, 457–483.
- [15] Buijse, M., & Glasbergen, G. (2005). A semiempirical model to calculate wormhole growth in carbonate acidizing. SPE Annual Technical Conference and Exhibition?,
- [16] Blonsky, A. V., Mitrushkin, D. A., Kazakov, A. V., Filippov, D. D., Mokropulo, Y. I., Bazanov, I. E., Shcherbakov, G. Y., Melnikov, A. V., Roshchektaev, A. P., & Maltcev, A. A. (2020). Development of acidizing simulator for sandstone reservoirs. SPE Russian Petroleum Technology Conference,
- [17] Moghaddam, M., & Nooripoor, V. (2018). Simulation Study of Matrix Acidizing in Carbonate Reservoirs: A Case Study. 10th International Chemical Engineering Congress and Exhibition, Isfahan, Iran,
- [18] Filippov, D., Kudryashov, I. Y., Maksimov, D. Y., Mitrushkin, D., Vasekin, B., & Roshchektaev, A. (2017). Reservoir modeling of complex structure reservoirs on dynamic adaptive 3D Pebi-grid. SPE Russian Petroleum Technology Conference?
- [19] Izgec, O., Keys, R., Zhu, D., & Hill, A. (2008). An integrated theoretical and experimental study on the effects of multiscale heterogeneities in matrix acidizing of carbonates. SPE Annual Technical Conference and Exhibition?
- [20] Tardy, P. M., Ramondenc, P., Weng, X., Burgos, R., Baez, F., & Yekta-Ganjeh, K. (2012). Inversion of Distributed-Temperature-Sensing Logs To Measure Zonal Coverage During and After Wellbore Treatments With Coiled Tubing. SPE Production & Operations, 27(01), 78–86.