

(پژوهشی)

بررسی عددی تأثیر اسیدکاری بر نفوذپذیری درزه‌سنگ‌ها حین حرکت برشی

علیرضا باغبانان^{۱*}، امیرحسین مؤمنی^۱، امید جعفرآقایی^۱، ابراهیم اسدالله‌پور^۱۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
(دریافت: تیر ۱۴۰۰، پذیرش: بهمن ۱۴۰۰)

چکیده

در یک توده سنگ درزه‌دار، عمدتاً نفوذپذیری از طریق شبکه‌ی درزه یا از طریق مجموعه درزه‌های به‌هم‌پیوسته که به‌صورت کانال‌های جریان درآمده‌اند، صورت می‌گیرد. بررسی وضعیت نفوذپذیری و جریان سیال درون درزه‌های سنگ یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در بسیاری از فعالیت‌های مهندسی از جمله حفاری‌های زیرزمینی، بازیابی و استخراج از مخازن هیدروکربوری و منابع زمین‌گرمایی به شمار می‌رود. اسیدکاری درزه‌سنگ‌ها به‌منظور افزایش میزان نفوذپذیری مخازن صورت می‌گیرد و یک روش کلیدی برای افزایش بهره‌برداری منابع هیدروکربنی است. با توجه به این‌که چاه‌های نفت ایران اغلب در سازندهای کربناتی قرار دارند، یکی از بهترین روش‌ها برای انگیزش چاه‌ها، اسیدکاری در آنها است. به همین منظور مطالعات آزمایشگاهی و عددی مختلفی باهدف بررسی تأثیر اسیدکاری بر رفتار هیدرولیکی درزه‌ها انجام گرفته است. درعین حال در اثر جابجایی درزه‌سنگ‌ها، الگوی جریان سیال و میزان جریان عبوری از درزه‌های آسیب‌دیده، تغییر می‌کند که این مورد در مطالعات انجام‌شده درگذشته با شرایط مذکور، مورد بررسی قرار نگرفته و هدف اصلی این پژوهش است. در این مطالعه، نمونه‌های مختلف درزه طبیعی به‌وسیله روش کشش غیرمستقیم بر سنگ‌آهک آسماری که سنگ مخزن میدان‌های نفتی جنوب ایران می‌باشد، تهیه شده است. بعد از اسیدکاری به‌وسیله سلول اسیدکاری توسعه داده‌شده، میزان جریان عبوری سیال در شرایط اولیه اندازه‌گیری شد. یک کد عددی بر مبنای روش المان محدود در محیط متلب به‌منظور بررسی عددی تأثیر نرخ برش درزه بر رفتار هیدرولیکی درزه‌ها در شرایط قبل و بعد از اسیدکاری نیز توسعه داده شده است. نتایج عددی با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ برش در هر دو شرایط قبل و بعد از اسیدکاری، میزان دبی عبوری روندی افزایشی دارد. همچنین الگوی جریان سیال با افزایش میزان برش به سمت کانالیزه شدن می‌رود. بعد از اسیدکاری سطح درزه، اختلاف ضریب زبری و زبری خطی سطوح شکستگی بیشتر شده است که باعث افزایش مقدار هدایت هیدرولیکی اولیه شکستگی می‌گردد و تغییرات دبی دارای شیب کمتری نسبت به شرایط مشابه در حالت قبل از اسیدکاری است. در برخی موارد، روند تغییرات دبی در شرایط بعد از اسیدکاری، از الگوی کلی تغییرات دبی پیروی نمی‌کند.

کلمات کلیدی

نفوذپذیری، اسیدکاری، جابجایی برشی، مدل‌سازی عددی، قانون مکعب

*عهده‌دار مکاتبات: bagh110@iut.ac.ir

۱- مقدمه

وجود جریان‌های زیرزمینی یک پدیده قطعی و تأثیرگذار در بسیاری از مناطق زمین است و این جریان‌ها می‌توانند وضعیت و ساختار زمین و در نتیجه سازه‌های ساخته‌شده در اطراف آن محیط را تحت تأثیر قرار دهند. از جمله این تأثیرات می‌توان ایجاد حرکت‌های افقی در راستای درزه‌ها، بازشدگی درزه‌ای جدید در اثر فشار و جریان دائم، انتقال سیال‌های حاوی مواد حل‌کننده به مناطق دیگر و در نتیجه برهم‌زنی تنش‌های برجا را اشاره کرد؛ بنابراین بررسی وضعیت نفوذپذیری و جریان سیال درون درزه‌های سنگ، یکی از موضوعات مهم و اساسی در بسیاری از فعالیت‌های مهندسی از جمله طراحی شیب‌ها، تأسیسات سد، حفاری‌های زیرزمینی، بازیابی و استخراج نفت و گاز، ذخایر زمین‌گرمایی و مخازن زباله‌های هسته‌ای به‌شمار می‌رود [۴-۱]. به همین دلیل برای بررسی دقیق این پدیده، تخمین بهتر از رفتار جریان و اثرات آن روی درزه‌ها و در نتیجه روی ساختار زمین و سازه‌های احداث‌شده بر روی آن یا درون زمین، ابتدا باید عواملی که بر میزان نفوذپذیری و نحوه‌ی جریان سیال از میان درزه‌ها تأثیر می‌گذارد را مورد مطالعه قرار دهیم. با توجه به مطالعاتی که تاکنون بر روی این موضوع صورت گرفته، مشخص شده است که عامل زبری سطح درزه مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار روی میزان نفوذپذیری درزه است، بنابراین بررسی این موضوع که چه پارامترهایی زبری درزه را تحت تأثیر قرار می‌دهد اهمیت خاصی پیدا می‌کند. بررسی‌ها و تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته، نشان داده است که عوامل زیادی همچون وضعیت تنش‌های برشی و نرمال روی سطح درزه، مواد پرکننده، فشار سیال محیط، میزان جفت‌شدگی اولیه و اندازه یا مقیاس درزه، بر روی وضعیت ناهمواری درزه و در نتیجه نفوذپذیری و وضعیت جریان تأثیرات اساسی می‌گذارند. در این میان، پارامتر مکانیکی برش به دلیل وجود تنش‌های برجا و عوامل تکتونیکی موجود در ساختارهای زیرزمینی و همچنین ایجاد تنش‌های القایی در اثر عواملی چون انواع پروژه‌های حفاری در منطقه، یک امر اجتناب‌ناپذیر است و در نتیجه با توجه به تأثیر عمده‌ی آن روی جابجایی سطوح درزه‌ها و به دنبال آن جابجایی وضعیت جفت‌شدگی و دندان‌های سطح درزه که می‌تواند به‌طور جدی وضعیت جریان و نفوذپذیری را

تحت تأثیر قرار دهد، دارای اهمیت زیادی است [۸-۵]. در سال‌های اخیر تغییرات نفوذپذیری درزه‌سنگ‌ها و تغییر شکل‌های مکانیکی سنگ توسط برخی محققین که به اصطلاح روندهای توأمان هیدرومکانیکی (H-M) نامیده می‌شوند همراه با تأثیرات مواد شیمیایی که به اصطلاح فرآیندهای (H-M-C) نامیده می‌شوند، بررسی شده است. بررسی روندهای توأمان هیدرومکانیکی-شیمیایی درزه با توجه به وضعیت تنش‌ها و سیالات موجود در ساختار زمین، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این بررسی‌ها عموماً بر روی توده سنگ درزه‌دار صورت می‌گیرد [۵]. تست‌های برش - جریان توأمان به‌طور عمومی تحت شرایطی که جهت جریان یا موازی با جهت برش است یا به‌صورت شعاعی از مرکز نمونه درزه است اجرا شده‌اند و این به‌خاطر محدودیت‌های حاصل از شرایط دشوار آزمایشگاهی است. یکی از این دشواری‌ها، عایق‌بندی کامل نمونه برای ایجاد جریان خطی یک‌بعدی در راستای جهت برش است [۹، ۱۰]. شبیه‌سازی‌های عددی می‌توانند دشواری‌های آزمایشگاهی را با شرایط آب‌بندی جریان (عایق‌کاری نمونه در جهت‌های مورد نظر) حذف کنند. در این میان آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس به دلیل گرانی و دشواری در آماده‌سازی شرایط و با دقت بالای طراحی، کمیاب هستند [۱۴-۱۱]. مطالعه دیگری در راستای بررسی تأثیر اسیدکاری بر نرخ جریان انجام گرفته است، به این صورت که ابتدا نتایج تزریق منظم اسید در مخزن مورد نظر ارائه شده است و سپس توسط یک کد توسعه داده‌شده، مدل را اعتبار سنجی کرده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این مدل‌سازی عددی، تخلخل و نفوذپذیری مخازن می‌توانند در یک منطقه با فاصله‌های متعدد در اطراف چشمه تزریق مشخص شوند. واکنش‌پذیری بالا و یک جریان ضعیف از نفوذ اسید در مناطق دور جلوگیری می‌کند. این واکنش‌پذیری بالا می‌تواند باعث ایجاد حفره‌های کرم شکل و در نتیجه افزایش تخلخل شود اما همیشه نمی‌تواند باعث افزایش نفوذپذیری مخزن درزه‌دار شود. همچنین این موضوع درک شده است که عوامل زیادی در واکنش اسیدی و در تغییر شکل‌پذیری تخلخل و نفوذپذیری سنگ نظیر سینتیک واکنش و نرخ تزریق مؤثر می‌باشند [۱۵].

همان‌طور که اشاره شد، اسیدکاری ماتریس سنگ یک روش تحریک برای افزایش بازیابی نفت در مخازن کربناتی است. در مطالعه‌ای که توسط [۲۰] و همکاران انجام شده

یک مدل پیوسته‌ی دو مقیاسی جدید برای مطالعه فرآیند اسیدی کاری در جریان شعاعی استفاده شده است. حالت پیوسته دو مقیاسی به دلیل هزینه محاسباتی نسبتاً کمتری نسبت به مدل شبکه، به تدریج به یکی از مدل‌های مهم در مدل‌های نظری اسیدکاری ماتریس تبدیل شده است و نسبت به یک مدل تجربی تطابق بیشتری دارد. نتایج نشان می‌دهد که روند اسیدکاری به‌طور واضح تحت تأثیر سرعت تزریق اسید و سرعت واکنش سطح اسید قرار دارد. نادیده گرفتن مدت تبادل جرم بین فازهای مایع و جامد منجر به تخمین بیش‌ازحد حجم منافذ برای تعیین نفوذپذیری می‌شود. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشی موجود مقایسه و الگویی هماهنگ دیده شد [۱۹-۲۱].

در مطالعه‌ای که توسط صالح الجواد^۱ و همکاران انجام شده است به اندرکنش سیالات به لحاظ هیدرولیکی با شکستگی‌های طبیعی پرداخته شده است که به‌ندرت در مدل‌سازی شکستگی اسید موردتوجه قرار می‌گیرد. این مطالعه یک رویکرد یکپارچه ارائه می‌دهد که در آن شکستگی‌های طبیعی در هر دو مدل‌سازی شکستگی اسید و بهره‌وری در نظر گرفته شده است. مدل شکستگی اسیدی پیشنهادی، نفوذپذیری شبکه شکستگی را تعیین می‌کند و سپس در مدل بهره‌وری استفاده شده است. با انجام این مطالعه مشخص شد که وجود شکستگی‌های طبیعی بر بازدهی تأثیر منفی می‌گذارد زیرا آنها گسترش شکستگی هیدرولیکی را محدود می‌کنند. همچنین مشخص شد در سطوح متوسط نفوذپذیری مخزن، میزان بهینه تزریق اسید با افزایش شدت شکستگی طبیعی افزایش می‌یابد [۲۲].

الگوهایی که برای طبقه‌بندی سطوح انحلال‌یافته در طی فرآیند اسیدکاری ارائه شده، کیفی است و برای توصیف سطح شکستگی و مطالعه رسانایی به‌اندازه کافی دقیق نیست. این مطالعه بر روی الگوی انحلال و رسانایی سطح شکستگی متمرکز است. با استفاده از پروفیلومتر لیزری برای اسکن سطح ناصاف شکستگی اسیدکاری شده، مشخصات هندسی سطح خشن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر اساس تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته شده چهار پارامتر جدید برای توصیف ساختار سطح خشن تعریف شد. با استفاده از یک روش دیجیتالی به همراه پارامترهای جدید، ۹ الگوی انحلال برای طبقه‌بندی سطح شکستگی اسیدکاری شده ارائه شد [۲۳].

چی^۲ و همکاران مطالعه‌ای را با تمرکز بر مورفولوژی انحلال‌یافته شکستگی توسط اسید انجام دادند که در آن عوامل تأثیرگذار و روش‌های بهبود رسانایی شکستگی بررسی شده است. تجزیه و تحلیل آنها نشان می‌دهد که مورفولوژی سطح انحلال‌یافته وابستگی مستقیمی به رژیم کنترل واکنش بین اسید - سنگ ندارد و آن را نرخ واکنش تعیین می‌کند. ایجاد شکل ناهنجار برای سطح انحلال‌یافته با کاهش نرخ جریان و غلظت اسید درحالی‌که به‌تناسب دو نوع محلول اسیدی را به مخازن تزریق کنند، امکان‌پذیر است [۲۴].

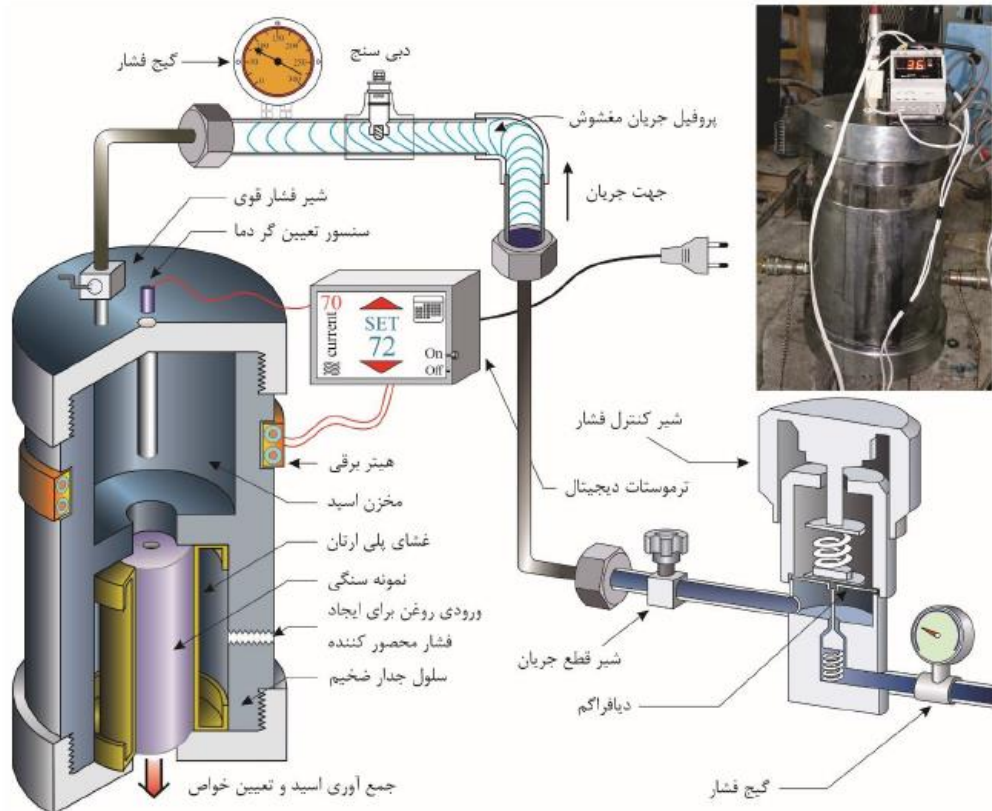
یکی از کاربردهای مهم اسیدکاری، توسعه فعالیت‌ها در مخازن هیدروکربنی واقع در شیل است. در این مخازن تخلخل و نفوذپذیری کم مخزن و فشار بالای ساختار شکستگی مواجه هستیم به همین منظور این مطالعه برای مقابله با این مشکلات انجام شده است. در این مطالعه پس از آزمایش‌های انحلال اسید، ریزساختارها و پارامترهای مکانیکی شیل پس از بهبود سطح به‌وسیله اسیدکاری، با استفاده از میانگین پراش اشعه X، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمایش مکانیکی سه محوری موردبررسی قرار گرفت [۲۵].

اسداله‌پور و همکاران برای شبیه‌سازی فرآیند اسیدکاری در شکستگی‌ها، ارزیابی انحلال سطح شکستگی و ایجاد بازشدگی به علت اسیدکاری، یک سلول تزریق اسید را توسعه دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد، دهانه‌های بازشدگی هیدرولیکی و مکانیکی اولیه و نفوذپذیری (در تنش صفر) به علت اسیدکاری افزایش‌یافته و میزان تماس سطوح در بازه ۲ تا ۱۲ مشاهده شده است. نتایج مدل‌سازی جریان ایجاد یک کانال جریان در راستای جریان اسید را نشان داد. علاوه بر این با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی ترتیبی سریع بازشدگی‌هایی با طول همبستگی فضایی مختلف در راستای x و y تولید شد. مشخص شد کانالیزه شدن جریان با افزایش طول همبستگی در راستای x افزایش می‌یابد. دبی سیال با افزایش طول همبستگی در راستای x افزایش و در راستای y کاهش می‌یابد.

با توجه به شرایط ساختاری لایه‌های زمین و وجود جریانات حاوی مواد حل‌کننده که از طریق شکستگی‌ها و درزه‌ها عبور می‌کنند، امکان وقوع پدیده‌های توأمان شیمیایی هیدرولیکی مکانیکی دور از انتظار نیست. به همین دلیل بررسی این موضوع چهارچوب این مطالعه

است. مطالعات انجام‌شده نشان داد که درک جامع‌تری از روندهای توأمان هیدرومکانیکی-شیمیایی لازم است. در این میان تأثیر توأمان عوامل شیمیایی بر روی جریان سیال درحالی‌که تنش‌های نرمال و برشی به‌طور هم‌زمان اعمال شده باشد، موردبررسی قرار نگرفته است [۱۸]. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر عوامل شیمیایی بر روی جریان سیال است، درحالی‌که تنش‌های برشی به‌طور هم‌زمان اعمال شده است. با توجه به دشواری‌های اجرای برجای این موضوع، مدل‌سازی با توسعه یک کد محاسباتی به روش عددی صورت گرفته است. در این کد، مدل‌سازی جریان سیال و عوامل مؤثر بر آن همچون تغییرات بازشدگی در اثر اعمال تنش برشی و اثرگذاری اسید بر روی ناهمواری‌های سطح درزه، انجام گرفته است. کد بر مبنای روش المان محدود و در محیط نرم‌افزار متلب توسعه یافته است.

در این مطالعه برای طراحی فرآیندی توأمان از اثرگذاری هم‌زمان پارامترهای هیدرومکانیکی- شیمیایی، تصمیم به استفاده از مدل سازی عددی با اساس یک کد



شکل ۱: دستگاه طراحی شده به منظور انجام فرآیند اسیدکاری در شکستگی [۱۶].

۲-۲- آماده‌سازی و تعیین خصوصیات نمونه

با توجه به این‌که چاه‌های نفت در ایران اغلب در سازندهای کربناتی قرار دارند به همین منظور برای درک بهتر از فرآیند انحلال سطح شکستگی به‌وسیله اسید، بررسی هدایت هیدرولیکی شکستگی اسیدکاری شده و تغییر توزیع بازشدگی در اثر انحلال توسط اسید، آزمایش‌ها در این مطالعه بر روی نمونه آهکی سخت با نفوذپذیری کم از سازند آسماری که جزء سازندهای مخازن نفتی ایران می‌باشد، انجام‌شده است. نمونه‌ها دارای ۹۵ درصد آهک و کمتر از ۵ درصد دولومیت می‌باشند. سطح شکستگی ایجاد شده در فرآیند شکست اسیدی (قبل از انجام اسیدکاری) یک سطح زبر است برای همین شکستگی با سطح صاف شرایط واقعی را در نظر نمی‌گیرد. به همین دلیل در این مطالعه از نمونه شکستگی با سطح زبر برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و مکانیک سنگی نمونه در جدول ۱ واقع در انتهای مقاله آورده شده است.

۲-۳- ارزیابی خصوصیات سطح شکستگی

برای بررسی خصوصیات سطح شکستگی قبل و بعد از تزریق باید هندسه ناصافی سطح شکستگی اندازه‌گیری گردد. در این تحقیق برای اندازه‌گیری ارتفاع زبری سطح شکستگی از یک اسکنر سه‌بعدی نوری با دقت ۰/۰۱۵ میلی‌متر و حد دقت (فاصله نقاط) ۰/۱ میلی‌متر استفاده و سطوح اسکن شده درزه در شکل ۳ نشان داده شده است. مقایسه‌ی هندسه‌ی سطح شکستگی قبل و بعد از اسیدکاری، اطلاعات خوبی درباره هدایت هیدرولیکی شکستگی در اختیار ما قرار می‌دهد.

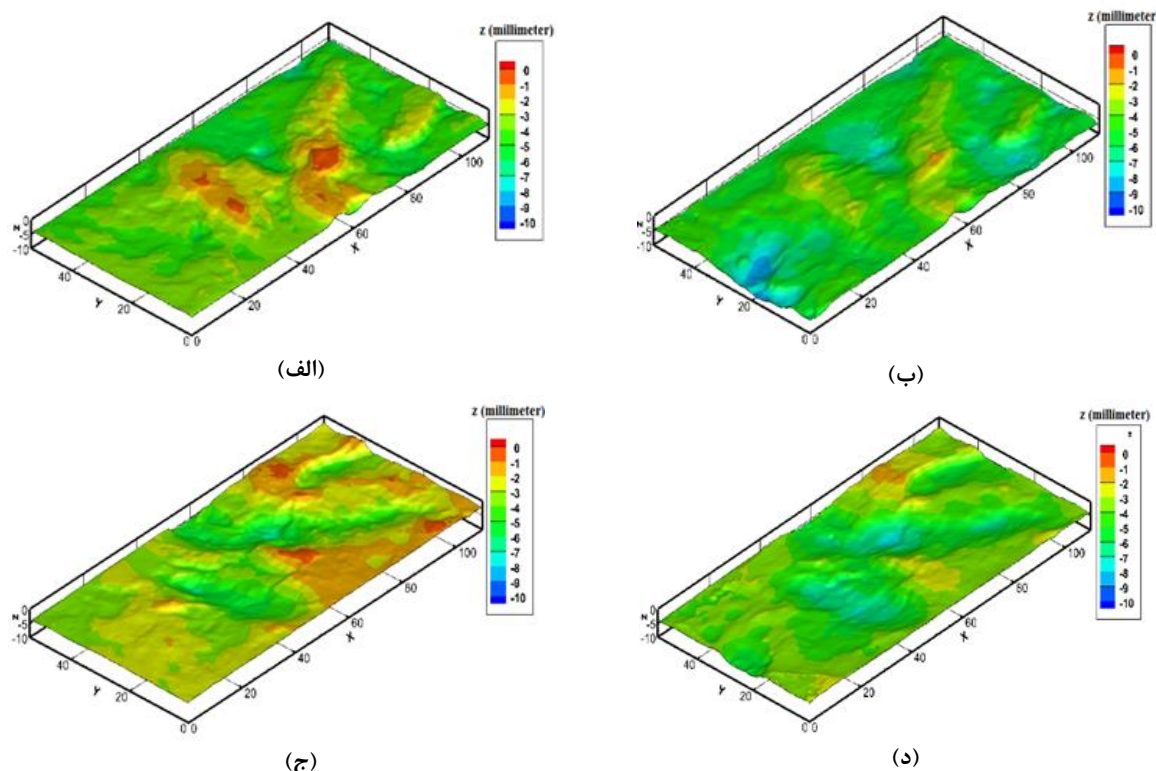
هرچه پارامترهایی که موجب ناهمگنی سطح شکستگی می‌شوند بیشتر باشد، هدایت هیدرولیکی سطح شکستگی هم بیشتر است [۱۵]. برای توصیف سطح، پارامترهای آماری مختلفی وجود دارد، پارامترهای آماری خصوصیات سطوح شکستگی در جدول ۲ واقع در انتهای مقاله نشان داده شده است. با توجه به مقادیر پارامترهای درج‌شده در جدول مذکور، سطوح شکستگی قبل از انجام اسیدکاری تطابق خوبی دارند.

روند انجام آزمایش تزریق اسید به این صورت است:

- (۱) آماده‌سازی نمونه استوانه‌ای با قطر ۵۴ و طول ۱۱۰ میلی‌متر.
- (۲) ایجاد یک شکستگی با سطح زبر در وسط نمونه به کمک روش کشش غیرمستقیم.
- (۳) اندازه‌گیری وزن نمونه پس از خشک شدن.
- (۴) برداشت پروفیل سطوح شکستگی قبل از تزریق اسید به‌وسیله دستگاه اسکن سطح.
- (۵) جداسازی دو سطح شکستگی به‌اندازه ۳ میلی‌متر از یکدیگر و قرارگیری در یک غشای پلاستیکی.
- (۶) قرار دادن یک پلیمر مشبک در دو انتهای سطوح شکستگی و قالب‌گیری با بتن.
- (۷) پوشاندن استوانه بتنی با سیلیکون به‌منظور عدم واکنش با اسید.
- (۸) اشباع نمونه درون آب مقطر با غلظت ۲ درصد KCl.
- (۹) نمونه درون سلول قرار داده شده و با اعمال فشار جانبی در سلول محکم می‌شود. ابتدا آب با فشار ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع با دبی خروجی ۰/۱ لیتر بر دقیقه به درون شکستگی تزریق و سپس اسید بعد از رسیدن به تعادل دمایی مشخص برای مدت معین از شکستگی جریان داده می‌شود. اسید تزریق‌شده شامل اسیدکلریدریک ۱۵ درصد به همراه ضدخوردگی^۳ سورفکتانت^۴ است.
- (۱۰) نمونه از داخل بتن جدا، خشک و وزن می‌شود و سطوح شکستگی بعد از تزریق اسید مجدداً اسکن می‌شوند. نمونه آماده شده برای قرارگیری در سلول تزریق اسید در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: آماده‌سازی نمونه برای قرارگیری در سلول تزریق اسید [۱۷].



شکل ۳: تصاویر اسکن لیزری سطح نمونه درزه مورد آزمایش (نمونه A): (الف) - (ب) به ترتیب اسکن سطح بالایی و پایینی درزه قبل از اسیدکاری، (ج) - (د) به ترتیب اسکن سطح بالایی و پایینی درزه بعد از اسیدکاری [۱۷].

۲-۴- اصول مدل‌سازی عددی جریان در شکستگی

جریان سیال (نیوتونی) در درزه‌سنگ‌ها با استفاده از رابطه‌ی ناویر-استوکس^۵ محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\nabla u)u = F - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u \quad (۱)$$

که در آن:

F : بردار نیروی جسم وارد بر جرم (نیوتون)

∇p : گرادیان فشار (پاسکال)

u : بردار سرعت جریان (متر بر ثانیه)

ρ : چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)

μ : ویسکوزیته دینامیکی (نیوتون ثانیه بر مترمربع)

t : زمان (ثانیه)

ساده‌سازی‌هایی برای کاربردپذیری بیشتر معادله ناویر-استوکس اعمال می‌شود. یکی از رایج‌ترین آنها، فرض جریان ویسکوز تحت گرادیان فشاری یکنواخت بین دو سطح موازی و صاف است که به قانون مکعب معروف است [۲۶، ۲۷]. دبی در این حالت از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$Q = -\frac{b^3}{12\mu} \nabla p \quad (۲)$$

که در آن:

Q : دبی (مترمکعب بر ثانیه)

b : دهانه بازشدگی (میلی‌متر)

μ : ویسکوزیته دینامیکی (نیوتون ثانیه بر مترمربع)

∇p : گرادیان فشار (پاسکال).

قانون مکعب محلی شکلی از معادله رینولدز برای جریان سیال در شکستگی‌ها است. جریان سیال در شکستگی با یک توزیع بازشدگی، در حالت پایدار و آرام به‌وسیله‌ی معادله‌ی رینولدز شبیه‌سازی می‌شود [۲۸-۳۲]. معادله رینولدز در شرایط پایا به فرم رابطه (۳) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y})}{\partial y} = 0 \quad (۳)$$

T_{xx} و T_{yy} به ترتیب قابلیت انتقال شکستگی در راستای x و y است. در این مطالعه قابلیت انتقال در هر نقطه در راستای x و y برابر فرض شده است و طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$T_{xx} = T_{yy} = \frac{\rho g w^3}{12\mu} \quad (4)$$

که در آن:

w: بازشدگی محلی (میلی‌متر)

g: شتاب گرانش (متر بر مجذور ثانیه)

با اعمال روش گالرکین بر رابطه (۳) فرمول المان محدود به فرم رابطه‌ی (۵) درمی‌آید.

$$\sum_{m=1}^N [K^{(m)}] \{h^{(m)}\} = \sum_{m=1}^N \{F^{(m)}\} \quad (5)$$

بردارها و ماتریس‌های به‌کاررفته در کد در پیوست ۲ ارائه شده است. معادلات ارائه شده، به کمک کد المان محدود توسعه داده شده در فضای متلب حل شده و جریان سیال در شکستگی مدل می‌شود.

۲-۵- اندازه‌گیری دبی عبوری سیال به روش عددی

به‌منظور شروع کار کد محاسباتی، ابتدا باید اطلاعات موردنظر برای مشخص کردن بستر محاسبات در اختیار نرم‌افزار متلب قرار داده شود. ازجمله اطلاعات موردنیاز، مشخص کردن وضعیت مش‌بندی سطح درزه است که برای این منظور سطح درزه نمونه به‌صورت ۱۱۰ میلی‌متر در راستای طولی (X) و ۵۴ میلی‌متر در راستای عرضی (Y) مش‌بندی شده، سپس به‌منظور مشخص شدن محدوده تحلیل نرم‌افزار، شرایط مرزی مشخص شده است. در این مدل نرخ جریان عبوری از چپ به راست شکستگی با اعمال واحد فشار هد هیدرولیکی (فشار یک متر آب) در ورودی جریان و فشار صفر در خروجی جریان مدل‌سازی و اندازه‌گیری می‌شود. مرزهای بالایی و پایینی شکستگی نیز بدون جریان است. در مرحله بعد به دلیل اینکه قرار است بررسی جریان عبوری سیال در راستاهای X و Y به‌صورت مجزا صورت گیرد، پس باید در هر مرحله، مجراهای خروجی سیال در راستای موردنظر باز و در راستاهای دیگر بسته شود. برای اعمال اثر جابجایی برشی بر روی دبی عبوری، کُد ثانویه‌ای بر اساس تغییرات المان‌ها در اثر حرکت برشی نوشته شده است و به روند محاسباتی کد توسعه داده شده اولیه اضافه می‌شود. پس از آن داده‌های مربوط به بازشدگی اولیه که پس از اسکن سطح درزه نمونه مورد آزمایش محاسبه شده است، به نرم‌افزار وارد می‌شود. به کمک کد ثانویه که وظیفه محاسبات تغییرات المان‌ها در اثر حرکت برشی را بر عهده دارد و میزان بازشدگی

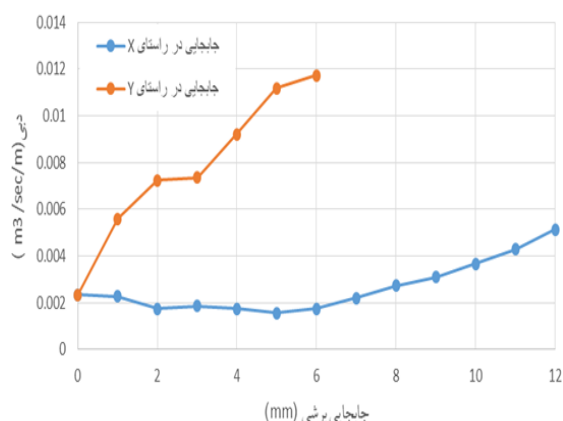
محاسبه شده برای هر یک از المان‌ها در حالت اولیه (بدون جابجایی برشی)، مقادیر بازشدگی در هر مرحله محاسبه شده و مجدداً به کد توسعه داده شده اولیه ارجاع داده شده است تا دبی عبوری را مرحله‌به‌مرحله محاسبه کند. البته با توجه به تغییراتی که در هر مرحله برش در تعداد المان‌های سطح درزه به وجود می‌آید، باید عدد مربوط به مش‌بندی سطح را بر اساس المان‌های باقی‌مانده تغییر داد. برای این تحقیق، هر مرحله برش به‌اندازه ۱ میلی‌متر بوده و در هر مرحله دبی عبوری توسط نرم‌افزار و کد توسعه داده شده مورد محاسبه قرار گرفته است. خروجی‌های این کد برای دبی عبوری سیال به صورت‌های مختلفی است. این کد دبی عبوری سیال را برای هر المان و همچنین برای هر ردیف از المان‌ها در جهات X و Y می‌دهد، البته با توجه به هدف این تحقیق تنها دبی موردنظر، دبی خروجی در راستای X است. روند محاسباتی کد در شکل ۱۱ در انتهای مقاله ارائه شده است. پس از محاسبه دبی‌های خروجی برای هر دو حالت قبل و بعد از اسیدکاری سطح درزه، نیاز به اعتبار سنجی داده‌ها است. برای این منظور در حالت قبل از اسیدکاری درزه و آغاز فرآیند برش، برای یک مرحله جابجایی برشی در راستای X (به‌اندازه ۱ میلی‌متر)، میزان دبی خروجی را یک‌بار توسط فرمول (۲) - با استفاده از قانون مکعب - و یک‌بار توسط نرم‌افزار محاسبه کردیم. مقدار دبی خروجی به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار برای جابجایی برشی ۱ میلی‌متر برابر با 4.87×10^{-5} و دبی خروجی به‌دست‌آمده از رابطه (۱) برابر با 4.77×10^{-5} شده است که مقدار دقت ۹۸ درصد را نشان می‌دهد.

۳- نتایج

تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از کد توسعه داده شده بر مبنای روش المان محدود، در راستای بررسی تأثیر توأمان پارامترهای مکانیکی - شیمیایی بر روند جریان عبوری سیال، در این بخش ارائه شده است.

۳-۱- تغییرات دبی سیال حین برش قبل از اسیدکاری

همان‌طوری که در شکل ۴ مشخص است، با شروع روند جابجایی برشی در هر دو راستای X و Y، میزان دبی عبوری سیال از درزه‌ها افزایش می‌یابد. می‌توان مشاهده



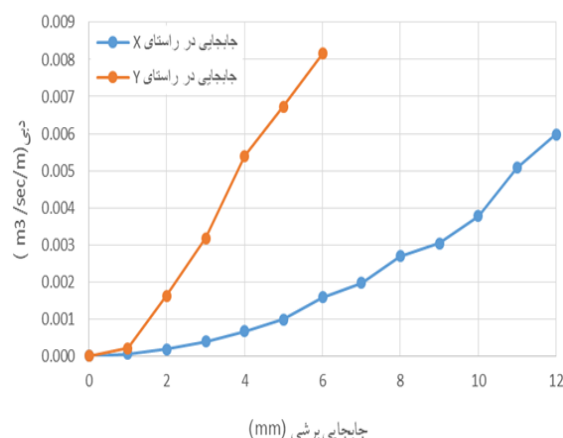
شکل ۵: تغییرات دبی سیال در نمونه A بعد از اسیدکاری.

۳-۳- مقایسه‌ی تغییرات دبی سیال قبل و بعد از اسیدکاری حین برش

در حالت بعد از اسیدکاری سطح درزه‌ها، دبی عبوری در حالت اولیه (قبل از شروع روند جابجایی برشی) دارای مقادیر بیشتری نسبت به حالت قبل از اسیدکاری سطح درزه‌ها است که ناشی از افزایش عدم تطابق سطوح شکستگی به دلیل انحلال سطوح توسط اسید است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که روند تغییرات دبی عبوری سیال در اثر جابجایی برشی در هر دو راستای X و Y، در شرایط بعد از اسیدکاری سطح درزه، دارای شیب کمتری نسبت به زمانی که هنوز اسیدکاری صورت نگرفته است، می‌باشد. از مقایسه‌ی شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان دریافت با اسیدکاری، دبی عبوری سیال در حالت اولیه (قبل از شروع روند جابجایی برشی) دارای مقادیر بیشتری نسبت به حالت قبل از اسیدکاری سطح درزه‌ها است (1.46×10^{-6} m³/sec/m) برای قبل از اسیدکاری و 0.2329×10^{-6} m³/sec/m) برای بعد از اسیدکاری). کانالیزه شدن جریان سیال از میان درزه نمونه نیز نقش بسیاری در این امر دارد و نحوه اثرگذاری اسید روی سطح درزه نمونه A می‌تواند به گونه‌ای بوده باشد که باعث ایجاد بازشدگی‌های پیوسته و منظم شده باشد که می‌تواند سیال را سریع‌تر از میان درزه هدایت کند و با توجه به شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ می‌توان تأثیرگذاری این پارامتر را بهتر مورد بررسی قرار داد.

یکی از پارامترهایی که با بررسی نمودارهای تغییرات دبی عبوری تحت جابجایی برشی توجه را به خود جلب می‌کند، تفاوت در میزان این تغییرات دبی، تحت

کرد که با شروع روند برش در هر دو راستای X و Y، سیال به‌مرور مسیری مشخص را برای حرکت خود از میان درزه پیدا می‌کند که این کانالیزه شدن مسیر حرکت سیال با افزایش میزان برش، رونده خود را تا یک الگوی مشخص ادامه می‌دهد.



شکل ۴: تغییرات دبی سیال در نمونه A قبل از اسیدکاری.

۳-۲- تغییرات دبی سیال حین برش بعد از اسیدکاری

با توجه به شکل ۹ می‌توان دید که با اسیدکاری سطح درزه‌ها برای هر دو نمونه، روند افزایش دبی در اثر جابجایی برشی در هر دو راستای X و Y همچنان پابرجا است. این روند افزایشی در دبی عبوری سیال با توجه به کمتر شدن تعداد المان‌های تماس سطح درزه به دلیل حرکت برشی صفحات به روی هم منطقی و قابل پیش‌بینی می‌تواند باشد. برای جابجایی برشی در راستای Y نیز این اصل پابرجا است. دبی عبوری سیال در حالت اولیه (بدون جابجایی برشی) به‌طور فراوانی افزایش یافته است. با توجه به داده‌های جدول ۲ اسیدکاری موجب افزایش اختلاف ضریب زبری سطوح شکستگی شده است. این اختلاف نشان‌دهنده‌ی تفاوت بین دو سطح شکستگی و افزایش عدم تطابق بین سطوح را در پی دارد و منجر به افزایش هدایت هیدرولیکی اولیه و دبی عبوری سیال می‌شود.

جابجایی‌های برشی در راستاهای X و Y است. همان‌طوری که در شکل‌های ۴ و ۵ مشخص است، این تغییرات دبی برای هر دو شرایط قبل و بعد از اسیدکاری سطح درزه زمانی که تحت جابجایی برشی در راستای Y است، با شیب بیشتری همراه است؛ یعنی جابجایی در راستای Y نسبت به راستای X، روند افزایشی دبی عبوری جریان سیال را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد.

دبی عبوری سیال برای نمونه A در شرایط قبل از اسیدکاری سطح درزه برای جابجایی برشی در راستای X و Y به ترتیب برابر با 4.98×10^{-4} و 1.16×10^{-3} ($\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$) و بعد از اسیدکاری مقادیر 2.34×10^{-4} و 1.67×10^{-3} ($\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$) به ترتیب در راستاهای X و Y است.

۳-۴- تغییرات الگوی جریان سیال تحت جابجایی برشی در حالت‌های قبل و بعد از اسیدکاری

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود با شروع جابجایی برشی در راستای محور X، مسیر حرکتی جریان سیال تغییر کرده و با افزایش میزان برش، سیال با نرخ ملایمی مسیرهای جدیدی را برای عبور خود انتخاب می‌کند. این تغییرات مسیر تا برش ۹ میلی‌متر ادامه دارد و بعدازآن تا جابجایی برشی ۱۲ میلی‌متر این مسیرهای عبوری سیال تقریباً شکل ثابت و پایداری پیدا می‌کنند و فقط بر میزان شدت جریان عبوری سیال افزوده می‌شود. از طرفی با مشاهده روند تغییرات بازشدگی طی جابجایی برشی در هر دو راستای X و Y می‌توان دید که میزان بازشدگی‌ها با نرخ کمی رو به افزایش است. همچنین شاهد گسترده شدن این بازشدگی‌ها در سطح درزه هستیم. با افزایش نرخ برش، بازشدگی زیاد شده و باعث ایجاد مسیرهای مشخصی در سطح درزه شده است. از مقایسه این مسیرهای ایجادشده با شکل‌های الگوی جریان سیال می‌توان مشاهده کرد که سیال نیز بیشتر این مسیرهای کانالیزه شده را برای عبور انتخاب کرده است.

با توجه به شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد که با شروع حرکت برشی در راستای Y، مسیرهای حرکتی جریان سیال با تغییراتی همراه است که این تغییرات با افزایش میزان جابجایی برشی تا اندازه ۵ میلی‌متر در هردو نمونه محسوس است. ولی در برش‌های ۵ و ۶ میلی‌متر تقریباً از یک الگوی حرکتی جریان با شباهت زیادی پیروی می‌کنند، بعدازآن فقط بر شدت جریان عبوری افزوده شده

است. همچنین با شروع حرکت برشی در این راستا، بازشدگی‌ها در سطح درزه دچار تغییر شده و در بعضی نقاط رفته‌رفته گسترده‌تر شده است. این روند تغییرات بازشدگی تا جابجایی برشی ۵ میلی‌متر سرعت بالایی دارد و تقریباً شکل مشخصی به خود گرفته است. در طی روند برش، با مقایسه‌ی روند گسترش بازشدگی سطح درزه و تغییرات الگوی جریان سیال می‌توان مشاهده کرد که سیال تقریباً از مسیرهای مشخصی که توسط بازشدگی‌های اصلی در سطح درزه ایجادشده حرکت خود را ادامه داده است. این مسیرها نشان‌دهنده‌ی یک الگوی کانالیزه شدن مسیر حرکتی سیال به‌واسطه تغییرات بازشدگی در سطح درزه است.

با مشاهده شکل ۸ می‌توان دریافت که در شرایط بعد از اسیدکاری سطح درزه‌ها نیز با شروع روند جابجایی برشی در راستای محور X، مسیر حرکت سیال از میان درزه با تغییراتی همراه است که این تغییرات، خود را تا جابجایی ۶ میلی‌متر برای هر دو نمونه به‌طور مشخص نشان می‌دهند. ولی بعدازآن، این مسیرها تا جابجایی ۱۲ میلی‌متر تقریباً حالت پایدار و مشخصی پیدا می‌کنند و فقط میزان شدت جریان عبوری افزایش می‌یابد. روند تغییرات بازشدگی نیز در شرایط بعد از اسیدکاری سرعت بیشتری به خود گرفته است و از جابجایی برشی ۳ میلی‌متر تقریباً مسیرهای اصلی بازشدگی مشخص شده‌اند. با مقایسه‌ی روند تغییرات بازشدگی، مسیرهای ایجادشده توسط آن طی روند برش و الگوهای حرکتی سیال، می‌توان مشاهده کرد که سیال بیشتر از مسیرهای کانالیزه شده توسط بازشدگی‌های ایجادشده در سطح درزه عبور کرده است.

با توجه به شکل ۹ در شرایط بعد از اسیدکاری با شروع جابجایی برشی در راستای Y، مسیر حرکتی سیال نسبت به حالت اولیه شروع به تغییراتی می‌کند. این تغییرات تا جابجایی برشی ۴ میلی‌متر برای هر دو نمونه محسوس و قابل‌توجه است، ولی از بعدازآن مسیر حرکتی سیال تقریباً شکلی ثابت و پایدار به خود می‌گیرد و فقط میزان شدت جریان عبوری افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط بعد از اسیدکاری، بازشدگی سطح درزه تحت جابجایی برشی در راستای Y نیز شروع به تغییر می‌کند ولی با سرعت بالاتری به شکل مشخصی از نقاط اصلی بازشدگی و ایجاد مسیری مشخص از بازشدگی‌ها می‌رسد.

تغییر در شدت اثرگذاری جابجایی برشی است به دلیل تغییر در مسیر حرکتی جریان سیال در میان بازشدگی‌های درزه است که به خاطر بسته‌شدگی‌های جدید در اثر جابجایی برشی درزه است و سیال را مجبور به پیدا کردن مسیرهای جدید برای عبور می‌کند و این امر باعث ایجاد وقفه و حتی کاهش در میزان دبی عبوری می‌شود. همچنین می‌توان گفت که اثرگذاری جابجایی برشی بر روی میزان دبی عبوری در راستای Y بیشتر راستای X است.

۴- نتیجه‌گیری

توسط یک کد توسعه داده‌شده در نرم‌افزار متلب به‌صورت عددی به بررسی اثر اسیدکاری سطح درزه بر دبی عبوری سیال تحت تنش برشی بر مبنای روش المان محدود (FEM) پرداخته شد. با بررسی و تحلیل شکل‌ها و نمودارهای به‌دست‌آمده از نرم‌افزار نتایج زیر حاصل شده است:

۱- در شرایط قبل از اسیدکاری سطح درزه‌سنگ‌ها با شروع روند جابجایی برشی، میزان دبی عبوری سیال افزایش می‌یابد، همچنین این روند برای حالت بعد از اسیدکاری سطح درزه‌ها نیز پابرجاست. روند افزایشی میزان دبی عبوری سیال برای شرایط بعد از اسیدکاری سطح درزه، دارای شیب کمتری نسبت به شرایط قبل از اسیدکاری است که نشان‌دهنده اثرپذیری کمتر تغییرات دبی عبوری سیال از جابجایی برشی در حالت بعد از اسیدکاری سطح درزه‌ها است و دلیل این امر می‌تواند تجزیه بخشی از زبری‌های سطح درزه در اثر اسیدکاری باشد.

۲- در برخی از موارد شاهد ناسازگاری‌هایی در روندهای صعودی میزان دبی عبوری سیال تحت تنش برشی بودیم که با توجه به تصاویر الگوهای حرکتی سیال بر روی سطح درزه مشخص شد که این ناسازگاری‌ها می‌توانند ناشی از ایجاد بسته‌شدگی‌هایی باشند که در اثر جابجایی برشی در مسیر حرکتی سیال ایجاد شده‌اند و سیال را وادار به تغییر مسیر و پیدا کردن مسیری جدید برای عبور از میان درزه کرده‌اند. این امر باعث ایجاد وقفه یا کاهش در روند صعودی میزان دبی عبوری سیال شده است.

با توجه به الگوهای رفتار حرکتی مشاهده‌شده می‌توان دریافت که با اسیدکاری سطح درزه‌ها، این الگوهای حرکتی جریان سیال در حالت اولیه (قبل از شروع جابجایی برشی) یا تفاوت چندانی با الگوی حرکتی نهایی سیال در جابجایی برشی حداکثر (۱۲ میلی‌متر) ندارند (شکل ۹) یا خیلی زود به شکل نهایی مسیر حرکتی خود در مقایسه با شرایط مشابه جابجایی برشی قبل از اسیدکاری سطح درزه، می‌رسند. در نمونه مورد آزمایش، الگوی رفتاری حرکت سیال در حالت قبل از اسیدکاری سطح درزه پس از جابجایی برشی ۹ میلی‌متر در راستای X و ۵ میلی‌متر در راستای Y تقریباً به شکل نهایی خود رسیده است ولی در حالت بعد از اسیدکاری پس از جابجایی برشی ۶ میلی‌متر در راستای X و ۴ میلی‌متر در راستای Y تقریباً به شکل نهایی خود رسیده‌اند. در کنار این برآوردهای کلی از آنالیز نمودارهای رسم شده و شکل‌های الگوی حرکتی جریان سیال، با تضادهایی نیز مواجه شدیم. با دقت در شکل ۵، می‌توان دید که از جابجایی برشی ۳ میلی‌متر تا ۵ میلی‌متر در راستای X ، کاهش دبی عبوری سیال مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱۰ که روند تغییرات الگوهای جریان سیال را بر روی سطح درزه نمونه A در شرایط بعد از اسیدکاری در بازه جابجایی برشی از ۳ میلی‌متر تا ۶ میلی‌متر نمایش می‌دهد، می‌توان دید که از جابجایی برشی ۳ میلی‌متر، تغییر شدیدی در شدت جریان عبوری سیال از قسمت‌های مرکزی نمونه رخ می‌دهد (شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب)). این کاهش شدت جریان تا برش ۵ میلی‌متر در نواحی مرکزی ادامه دارد (شکل (۱۰-ج)) و در این بازه می‌توان دید که سیال سعی در پیدا کردن مسیرهای عبوری جدیدی در قسمت‌های دیگر نمونه دارد که با توجه به شکل (۱۰-د) مشاهده شد که این مسیرهای جدید در قسمت‌های کناری سطح درزه قرار دارند، از برش ۵ میلی‌متر به بعد با افزایش جریان عبوری از آن قسمت‌ها، این کاهش دبی جبران شده و مجدداً روند صعودی پیدا می‌کند که دلیل اصلی این تغییرات می‌تواند تغییرات در جورشدگی درزه‌ها و بسته شدن بازشدگی‌های قبلی در اثر جابجایی برشی باشد. نمونه دیگر از تغییرات ناگهانی نیز در همین شکل قابل مشاهده است. در روند افزایشی دبی عبوری تحت جابجایی برشی در راستای Y ، یک روند نسبتاً ثابت در بازه جابجایی برشی بین ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر وجود دارد. این تغییرات در روند دبی عبوری که بیان‌گر

- [5] Koyama, Tomofumi, Yuzo Ohnishi, and Lanru Jing. "Numerical modeling for fluid flow and particle transport in rock fractures during shear." (2008).
- [6] Mehranpour, M. H. "Introduction of new roughness parameters to quantify rock joints surface using Fourier analysis." In 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2016.
- [7] Yu, Qifeng. "Computational Simulations of Shear Behaviour of Joints in Brittle Geomaterials." PhD diss., McGill University Libraries, 2001.
- [8] Kulatilake, P. H. S. W., J. Um, and George Pan. "Requirements for accurate estimation of fractal parameters for self-affine roughness profiles using the line scaling method." *Rock mechanics and rock engineering* 30, no. 4 (1997): 181-206.
- [9] Yeo, I. W., M. H. De Freitas, and R. W. Zimmerman. "Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 35, no. 8 (1998): 1051-1070.
- [10] Kim, Hyung-Mok, Junya Inoue, and Hideyuki Horii. "Flow analysis of jointed rock masses based on eX cavation-induced transmissivity change of rough joints." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41, no. 6 (2004): 959-974.
- [11] Neretnieks, Ivars, Tryggve Eriksen, and Päivi Tähtinen. "Tracer movement in a single fissure in granitic rock: Some eX perimental results and their interpretation." *Water resources research* 18, no. 4 (1982): 849-858.
- [12] Crandall, Dustin, Grant Bromhal, and Zuleima T. Karpyn. "Numerical simulations eX amining the relationship between wall-roughness and fluid flow in rock fractures." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47, no. 5 (2010): 784-796.
- [13] Zhao, Zhihong, Lanru Jing, Ivars Neretnieks, and Luis Moreno. "Analytical solution of coupled stress-flow-transport processes in a single rock fracture." *Computers & geosciences* 37, no. 9 (2011): 1437-1449.
- [14] Figueiredo B, Tsang CF, Rutqvist J, Niemi A. A study of changes in deep fractured rock permeability due to coupled hydro-mechanical effects. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015 Oct 31;79:70-85.
- [15] Elsworth, Derek. "Some THMC controls on the evolution of fracture permeability." In Elsevier Geo-Engineering Book Series, vol. 2, pp. 63-71. Elsevier, 2004.
- [16] Mohtarami, E., A. Baghbanan, M. Akbariforouz, H. Hashemolhosseini, and E.

- ۳- با مقایسه میزان تغییرات دبی عبوری سیال تحت تنش برشی در راستاهای X و Y، دیده شد که روند افزایش دبی عبوری سیال تحت جابجایی برشی در راستای Y دارای شیب بیشتری نسبت به همین تغییرات تحت جابجایی برشی در راستای X دارد. به دلیل این که راستای تزریق اسید در راستای X است و موجب صاف‌تر شدن سطح شکستگی، افزایش تماس و تطبیق سطوح شکستگی در این راستا می‌شود به همین دلیل جابجایی برشی در راستای X، ایجاد بسته‌شدگی در مسیر سیال، جلوگیری از کانالیزه شدن جریان و کاهش دبی را در پی دارد.
- ۴- پس از اسیدکاری سطح درزه نمونه‌ها، شاهد تفاوتی در دبی عبوری سیال در حالت اولیه (بدون جابجایی برشی) نسبت به دبی عبوری در همین حالت در شرایط قبل از اسیدکاری بودیم که می‌تواند به دلیل افزایش اختلاف ضریب زبری و زبری خطی دو سطح شکستگی به دلیل تزریق اسید باشد که باعث افزایش مقدار هدایت هیدرولیکی اولیه شکستگی می‌شود. درواقع اختلاف ضریب زبری و زبری خطی دو سطح شکستگی نشان‌دهنده تفاوت بین این دو سطح، درنتیجه افزایش عدم جورشدگی بین دو سطح شکستگی است.

مراجع

- [1] Esaki, T. S. Du, Y. Mitani, K. Ikusada, and Li Jing. "Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36, no. 5 (1999): 641-650.
- [2] Olsson, R., and N. Barton. "An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints." *International journal of rock mechanics and mining sciences* 38, no. 3 (2001): 317-329.
- [3] Lee, H. S., and T. F. Cho. "Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load." *Rock mechanics and rock engineering* 35, no. 4 (2002): 299-318.
- [4] Li, Bo, Yujing Jiang, Tomofumi Koyama, Lanru Jing, and Yoshihiko Tanabashi. "EX perimental study of the hydro-mechanical behavior of rock joints using a parallel-plate model containing contact areas and artificial fractures." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 45, no. 3 (2008): 362-375.

- [26] Javadi, M., Sharifzadeh, M. and Shahriar, K., 2010. A new geometrical model for non-linear fluid flow through rough fractures. *Journal of Hydrology*, 389(1-2), pp.18-30.
- [27] Koyama, T., Li, B., Jiang, Y. and Jing, L., 2008. Coupled shear-flow tests for rock fractures with visualization of the fluid flow and their numerical simulations. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2(3), pp.215-227.
- [28] Watanabe, N., Hirano, N. and Tsuchiya, N., 2008. Determination of aperture structure and fluid flow in a rock fracture by high-resolution numerical modeling on the basis of a flow-through experiment under confining pressure. *Water Resources Research*, 44(6).
- [29] Zimmerman, R.W. and Bodvarsson, G.S., 1996. Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in porous media*, 23(1), pp.1-30.
- [30] Pyrak-Nolte, L.J. and Morris, J.P., 2000. Single fractures under normal stress: The relation between fracture specific stiffness and fluid flow. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(1-2), pp.245-262.
- [31] Watanabe, N., Hirano, N. and Tsuchiya, N., 2009. Diversity of channeling flow in heterogeneous aperture distribution inferred from integrated experimental-numerical analysis on flow through shear fracture in granite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B4).
- [32] Koyama, T., Li, B., Jiang, Y. and Jing, L., 2009. Numerical modelling of fluid flow tests in a rock fracture with a special algorithm for contact areas. *Computers and Geotechnics*, 36(1-2), pp.291-303.
- [33] S. R. J. J. o. G. R. S. E. Brown, "Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 92, no. B2, pp. 1337-1347, 1987.
- Asadollahpour. "Chemically dependent mechanical properties of natural andesite rock fractures." *Canadian Geotechnical Journal* 55, no. 6 (2018): 881-893.
- [17] Asadollahpour E, "Investigating the effect of chemicals on the properties and fluid flow in rock fractures using experimental and Numerical Methods", PhD Thesis, IUT, 2018, (In Persian).
- [18] Asadollahpour, E., A. Baghbanan, H. Hashemolhosseini, and E. Mohtarami. "The etching and hydraulic conductivity of acidized rough fractures." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 166 (2018): 704-717.
- [19] Jia, Cunki, Kamy Sepehrnoori, Zhaoqin Huang, Haiyang Zhang, and Jun Yao. "Numerical studies and analysis on reactive flow in carbonate matriX acidizing." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 201 (2021): 108487.
- [20] Jia, Cunki, Zhaoqin Huang, Kamy Sepehrnoori, and Jun Yao. "Modification of two-scale continuum model and numerical studies for carbonate matriX acidizing." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 197 (2021): 107972.
- [21] Panga, Mohan KR, Murtaza Ziauddin, and Vemuri Balakotaiah. "Two-scale continuum model for simulation of wormholes in carbonate acidization." *AIChE journal* 51, no. 12 (2005): 3231-3248.
- [22] Aljawad, Murtada Saleh, Mateus Palharini Schwalbert, Mohamed Mahmoud, and Abdullah Sultan. "Impacts of natural fractures on acid fracture design: A modeling study." *Energy Reports* 6 (2020): 1073-1082.
- [23] Lu, Cong, Xiang Bai, Yang Luo, and Jianchun Guo. "New study of etching patterns of acid-fracture surfaces and relevant conductivity." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 159 (2017): 135-147.
- [24] Qi, Ning, Guobin Chen, Lin Pan, Mingyue Cui, Tiankui Guo, Jun Yan, and Chong Liang. "Numerical simulation and analysis of fracture etching morphology during acid fracturing of dolomite reservoirs." *Chemical Engineering Science* 229 (2021): 116028.
- [25] Lu, Cong, Li Ma, Jianchun Guo, Senwen Xiao, Yunchuan Zheng, and Congbin Yin. "Effect of acidizing treatment on microstructures and mechanical properties of shale." *Natural Gas Industry B* 7, no. 3 (2020): 254-261.

پیوست ۱ (جدول‌ها و شکل‌ها):

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و مکانیک سنگی نمونه تحت آزمایش [۱۹].

چگالی (gr/cm ³)	تخلخل (%)	نفوذپذیری (md)	ضریب پواسون	مقاومت فشاری تک محوره (Mpa)	مدول یانگ (GPa)
۲٫۶۵	۴-۶	۰٫۵-۱	۰٫۲۸-۰٫۳۱	۸۰-۱۰۰	۳۵-۴۰

جدول ۲: پارامترهای آماری خصوصیات سطوح شکستگی قبل و بعد از اسیدکاری [۱۹].

نمونه	زمان تزریق اسید (min)		سطح بالا و پایین	Sk	Sp	Sv	Sa	Sstd	Average JRC	Slr
A	before	-	A-U	۰٫۲۰	۳٫۸۴۷۸	-۳٫۰۴۵۶	۳٫۱۷۰۸	۱٫۱۲۹۹	۱۲٫۳۵	۱٫۱۲۰۷
			A-D	۰٫۲۸۲	۲٫۹۹۳۳	-۳٫۸۲۱	۳٫۶۹۹	۱٫۱۱۷۹	۱۲٫۳۱	۱٫۱۲۱۲
	after	۲۰	A-U	۰٫۲۵۳۱	۳٫۵۳۳۲	-۳٫۶۰۲	۳٫۶۱۶۳	۱٫۰۹۶	۱۱٫۲۱	۱٫۱۱۷۷
			A-D	۰٫۳۷۲۴	۲٫۵۴۸۶	-۳٫۶۰۹۱	۳٫۴۱۹۳	۱٫۱۲۹۳	۹٫۹۱	۱٫۰۹۴۱

Sku^6 = تیزی نمودار توزیع ارتفاع زبری

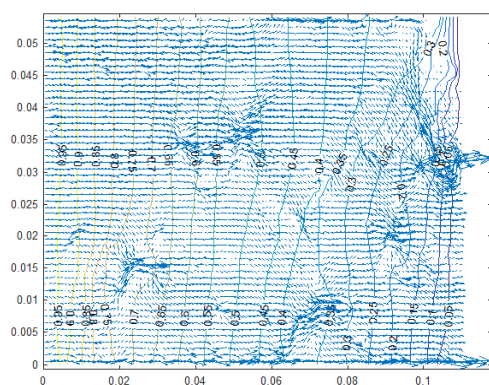
Sp^7 = ارتفاع بزرگترین تیزی زبری

Sv^8 = ارتفاع بزرگترین دره زبری

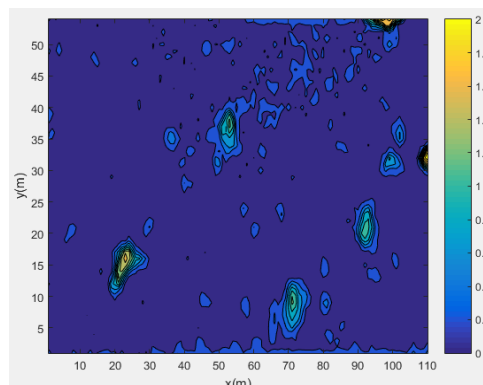
Sa^9 = میانگین حسابی ارتفاع زبری

$Sstd^{10}$ = انحراف استاندارد ارتفاع زبری

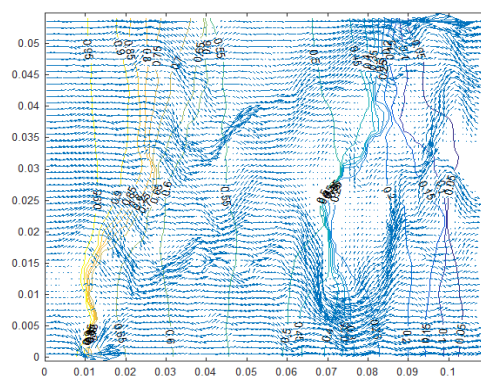
Slr^{11} = زبری خطی (نسبت سطح واقعی به سطح تصویر شده)



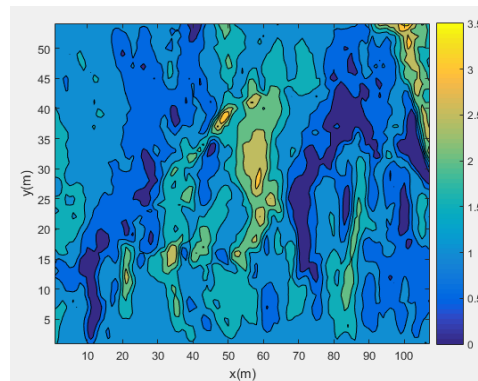
(الف)



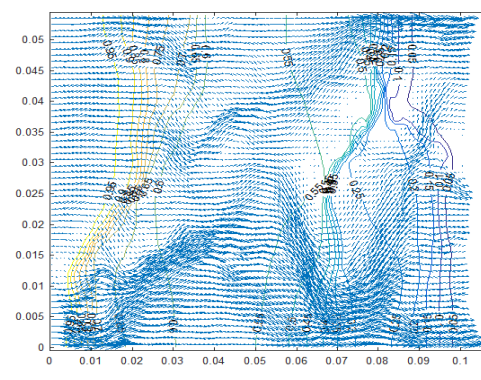
(ب)



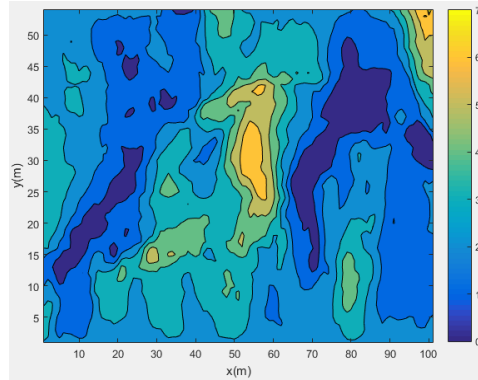
(پ)



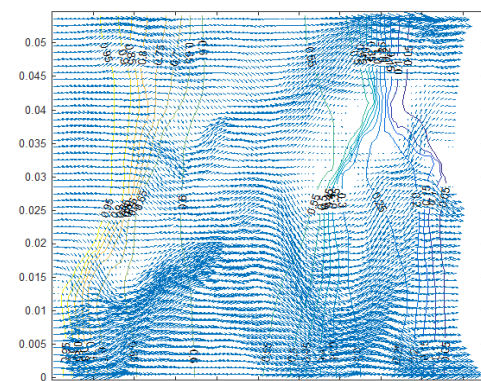
(ت)



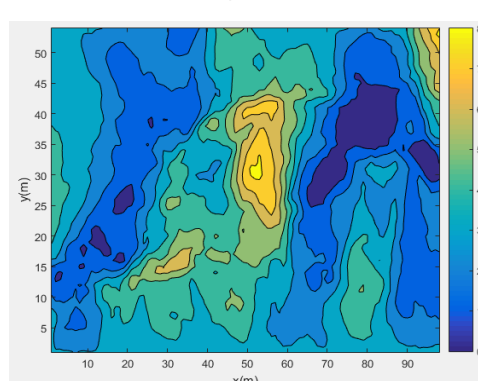
(ث)



(ج)



(چ)

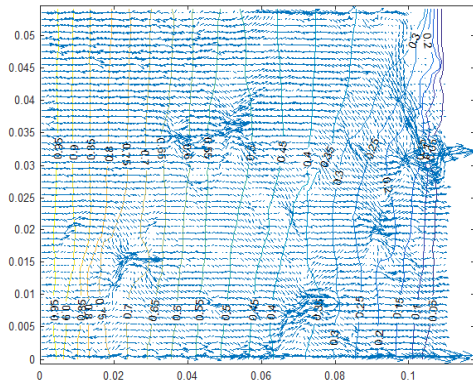


(ح)

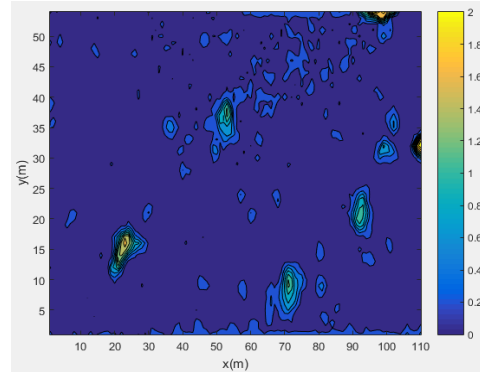
جهت جابجایی برشی و مسیر جریان سیال



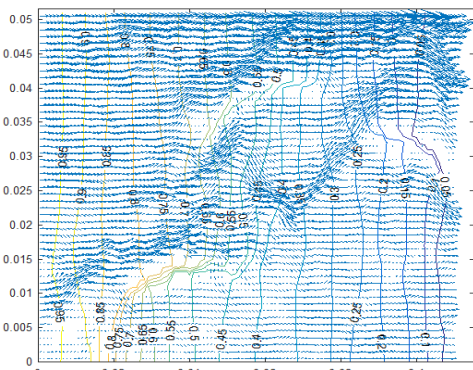
شکل ۶: الگوی جریان سیال از میان درزه نمونه A تحت جابجایی برشی (الف) حالت اولیه، (پ) ۳ میلی‌متر، (ث) ۹ میلی‌متر، (چ) ۱۲ میلی‌متر، در راستای X، قبل از اسیدکاری سطح درزه.



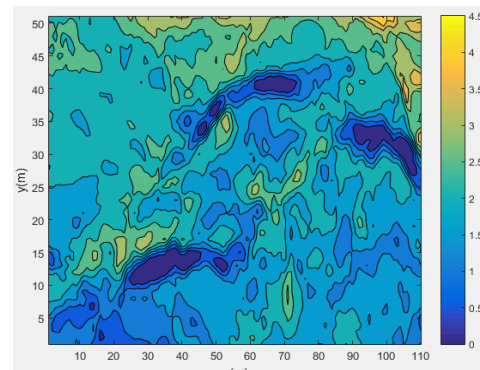
(الف)



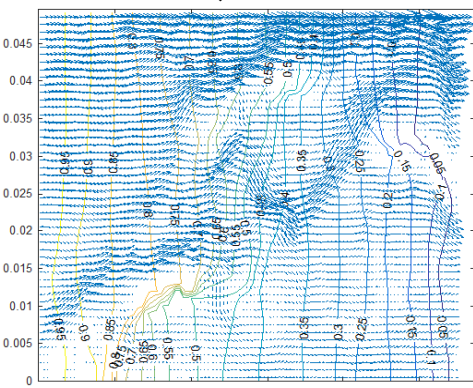
(ب)



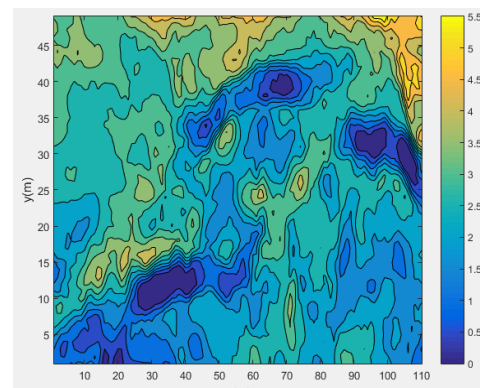
(پ)



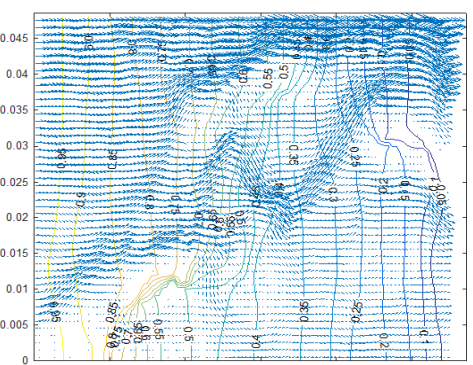
(ت)



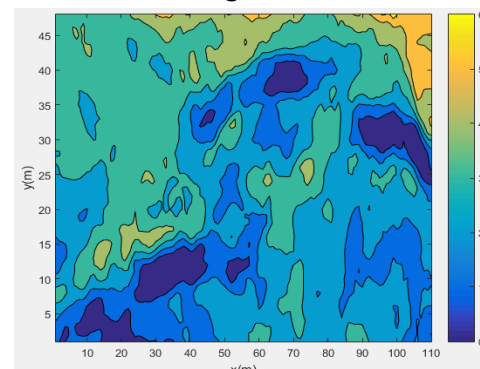
(ث)



(ج)



(چ)

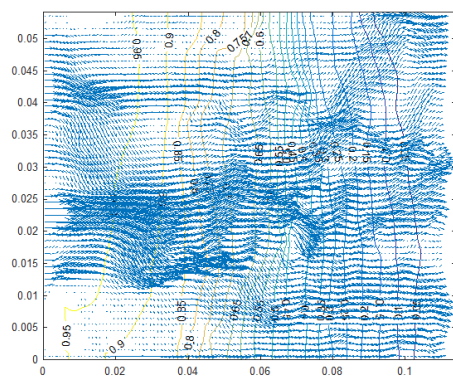


(د)

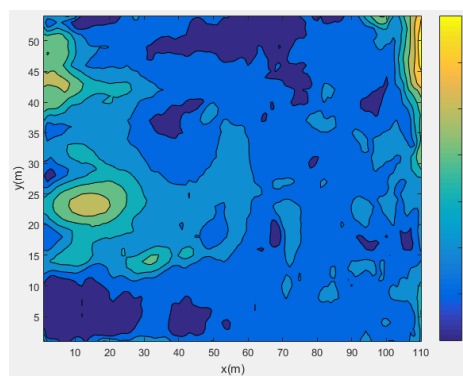
جهت جابجایی برشی

جهت مسیر جریان سیال

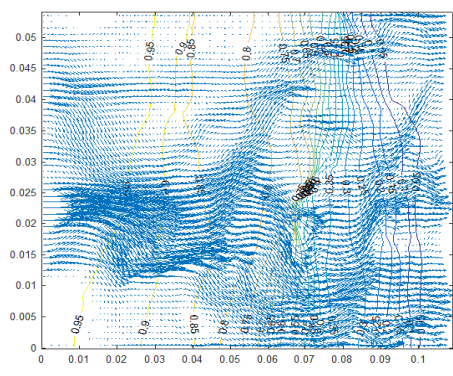
شکل ۷: الگوی جریان سیال از میان درزه نمونه A تحت جابجایی برشی (الف) حالت اولیه، (پ) ۳ میلی‌متر، (ث) ۵ میلی‌متر، (چ) ۶ میلی‌متر، در راستای Y، قبل از اسیدکاری سطح درزه



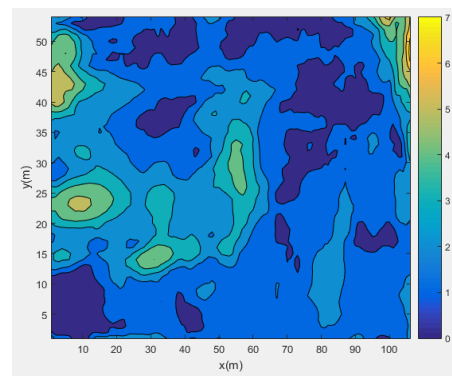
(الف)



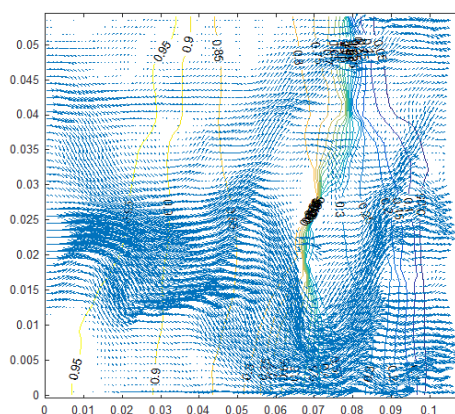
(ب)



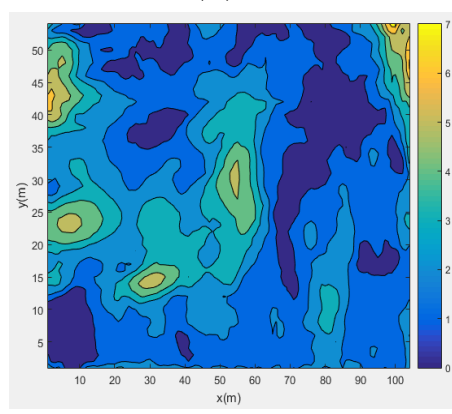
(پ)



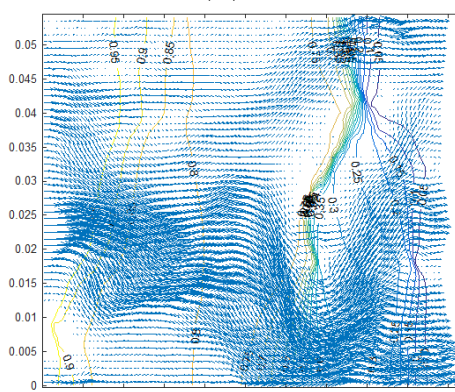
(ت)



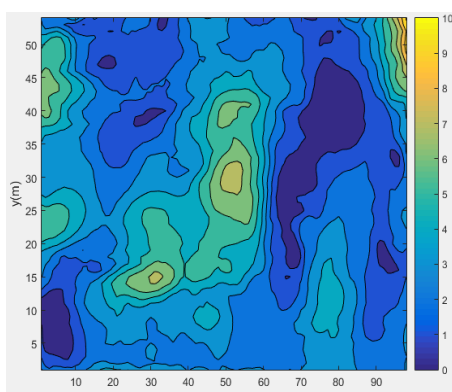
(ث)



(ج)



(چ)

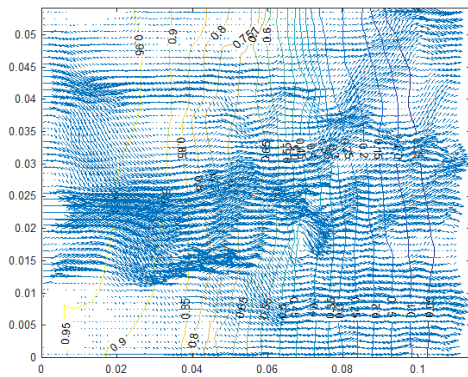


(ح)

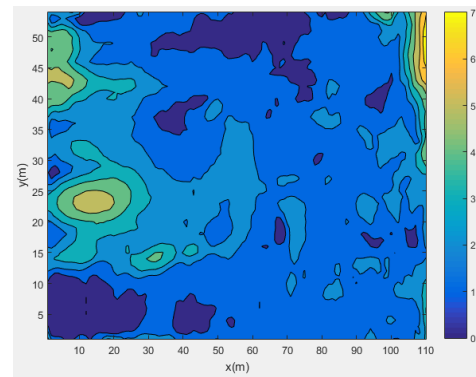
جهت جابجایی برشی و مسیر جریان سیال



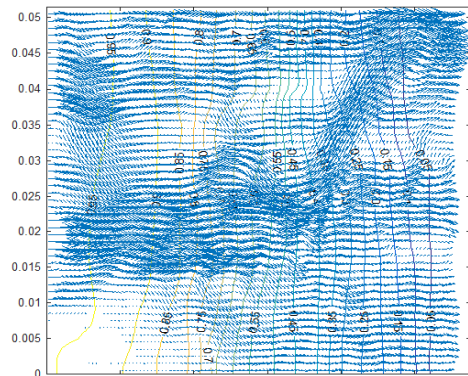
شکل ۸: الگوی جریان سیال از میان درزه نمونه A تحت جابجایی برشی (الف) حالت اولیه، (پ) ۴ میلی‌متر، (ث) ۶ میلی‌متر، (چ) ۱۲ میلی‌متر، در راستای X، بعد از اسیدکاری سطح درزه



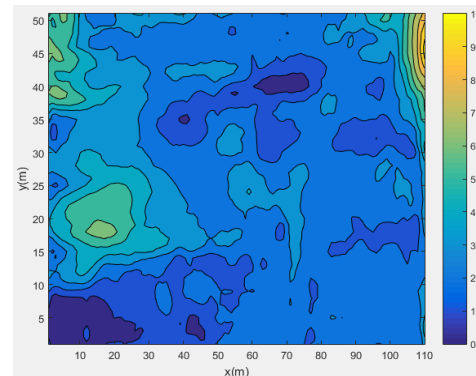
(الف)



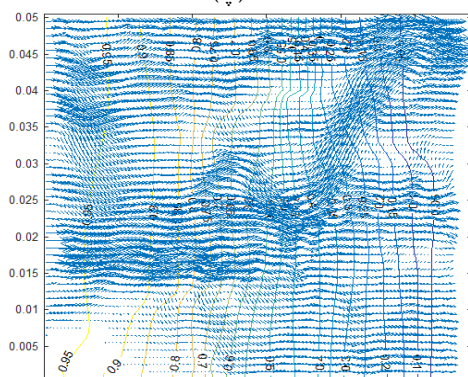
(ب)



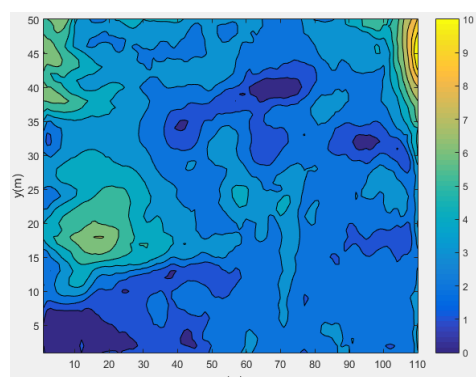
(پ)



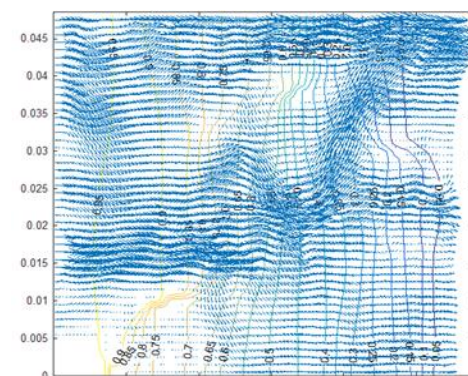
(ت)



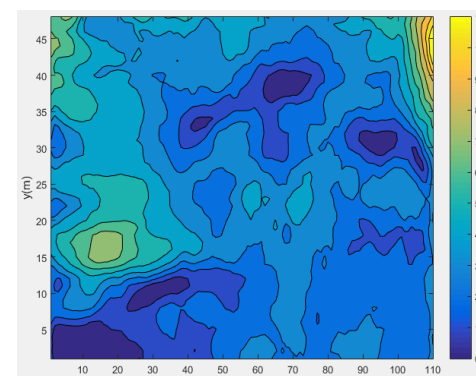
(ث)



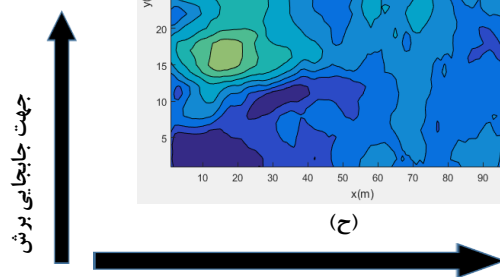
(ج)



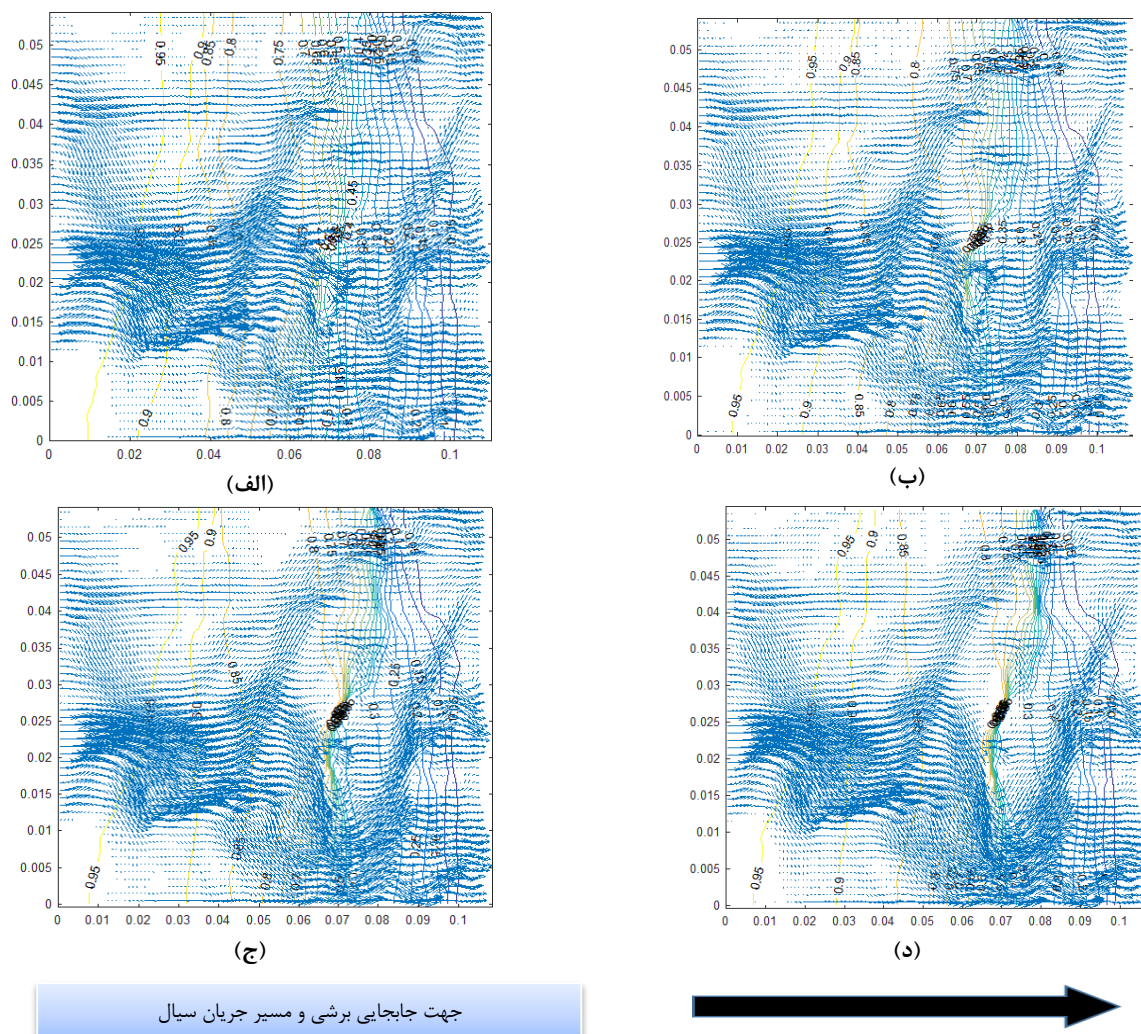
(چ)



(ح)



شکل ۹: الگوی جریان سیال از میان درزه نمونه A تحت جابجایی برشی (الف) حالت اولیه، (پ) ۳ میلی‌متر، (ث) ۴ میلی‌متر، (چ) ۶ میلی‌متر، در راستای Y، بعد از اسیدکاری سطح درزه



شکل ۱۰: الگوهای حرکتی جریان سیال بر روی سطح درزه برای نمونه A تحت جابجایی برش (الف) ۳ میلی‌متر، (ب) ۴ میلی‌متر، (ج) ۵ میلی‌متر، (د) ۶ میلی‌متر در راستای X، بعد از اسیدکاری سطح درزه.

پیوست ۲:

$$[K^{(m)}] = \int_{S^{(m)}} [B^{(m)}]^T [D^{(m)}] [B^{(m)}] ds \quad (6)$$

$$\{F^{(m)}\} = \int_{S^{(m)}} [N^{(m)}]^T Q_{ru}^{(m)} ds - \int_{L^{(m)}} [N^{(m)}]^T \left[T \frac{\partial h}{\partial x} n_x + T \frac{\partial h}{\partial y} n_y \right] dL \quad (7)$$

$S^{(m)}$: مساحت سطح

$L^{(m)}$: مرزهای مدل (دبی سیال در این مرزها برای المان

m شناخته شده است)

n_x و n_y : بردارهای نرمال بر مرزهای مدل در راستای x

و y است. ماتریس‌های $[D^{(m)}]$ و $[B^{(m)}]$ با روابط (۸) و (۹)

ارائه شده اند [۲۷، ۲۸، ۳۳].

N: تعداد کلی المان‌ها

m: عدد المان

$[K^{(m)}]$: ماتریس قابلیت انتقال

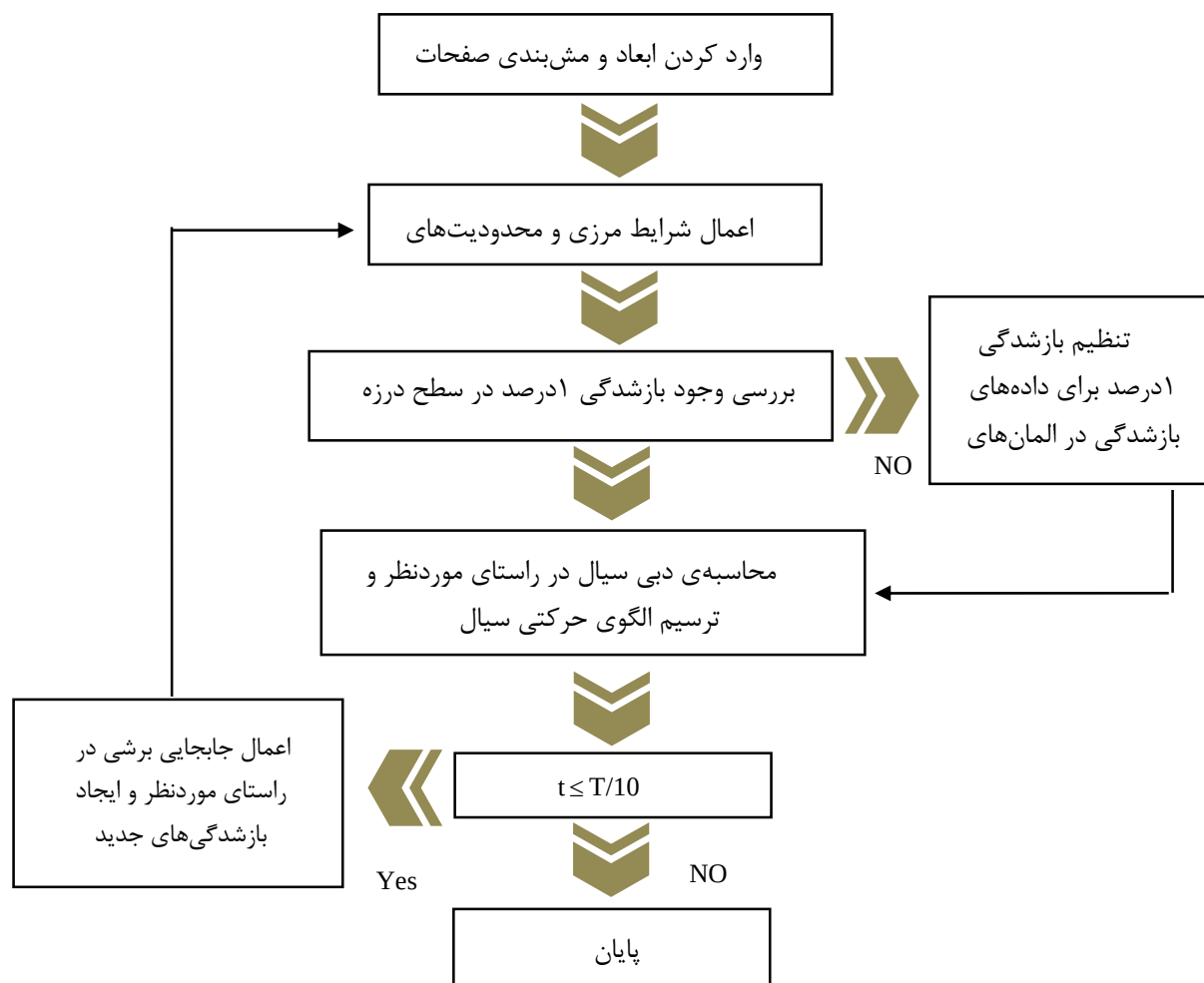
$\{h^{(m)}\}$: بردار هد هیدرولیکی

$\{F^{(m)}\}$: بردار شار

$[N^{(m)}]$: ماتریس تابع شکل

$$[D^{(m)}] = \begin{bmatrix} T & T \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\rho g w^{(m)3}}{12\mu} & 0 \\ 0 & \frac{\rho g w^{(m)3}}{12\mu} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial [N^{(m)}]^T}{\partial x} \\ \frac{\partial [N^{(m)}]^T}{\partial y} \end{Bmatrix} \{h^{(m)}\} = [B^{(m)}][h^{(m)}] \quad (9)$$



شکل ۱۱: روند محاسبه‌ی دبی توسط کد توسعه داده شده. t ، میزان جابجایی برشی بر حسب میلی‌متر، T ، اندازه نمونه در جهت مورد بررسی بر حسب میلی‌متر (X یا Y).

^۱ Saleh Aljawad

^۲ q_i

^۳ Corrosion inhibitor

^۴ Surfactant

^۵ Navier-stocks

^۶ Kurtosis of roughness height distribution function

^۷ Maximum peak height

^۸ Maximum valley height

^۹ Arithmetical mean of roughness height

^{۱۰} Standard deviation of roughness height

^{۱۱} Linear roughness