

بررسی عددی الگوی جریان در محیط دارای نفوذپذیری دوگانه در حضور گسل قطری با استفاده از روش خط جریان

سجاد نامداری^{۱*}؛ علیرضا باغبانان^۲؛ حمید هاشم الحسینی^۳

۱- دانشجوی دوره دکتری، گرایش مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار، گرایش مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار، گرایش ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

چکیده

از پیش‌بینی جریان آب ورودی به درون تونل تا مخازن ژئوترمال و دفینه‌های زباله‌ها، شناسایی الگوی جریان در محیط‌های سنگی دارای اهمیت بسیاری است. برای بررسی الگوی جریان در محیط‌های سنگی، از روش‌های مختلف عددی و آزمایشگاهی استفاده می‌شود. از روش‌های عددی به علت عدم وجود محدودیت در ابعاد محیط مورد شبیه‌سازی، بسیار استفاده شده است. در این پژوهش از توسعه یک برنامه *Matlab* برای مطالعه الگوی جریان در یک محیط دارای نفوذپذیری دوگانه استفاده گردید. ابتدا یک مدل دو بعدی با یک گسل سرتاسری توسعه داده شد. سپس با صرف‌نظر از اثرات جاذبه، مدل گسل قطری سرتاسری از جنوب غرب به شمال شرق روی محیط متخلخل پیاده‌سازی گردید و پس از آن از دو نقطه ابتدایی و انتهایی گسل، تزریق و بهره‌برداری به صورت دو ترم منبع و تخلیه تعریف شد. معادلات فشار به صورت ضمنی حل گردید و پس از آن، درصد اشباع به صورت صریح برای هر سلول مورد محاسبه قرار گرفت. با در دست داشتن فشار و درصد اشباع، میدان سرعت برای کل مدل به دست آورده شد. پس از آن، خطوط جریان شناسایی شده و در کنار پارامتر زمان انتقال، برای تفسیر رفتار سیال در محیط مورد استفاده قرار گرفت.

واژگان کلیدی

روش خط جریان، نفوذپذیری دوگانه، المان مجزا، شبیه‌سازی عددی، محیط بزرگ‌مقیاس

۱- مقدمه

مدیریت آب‌های زیرزمینی و همچنین سایت‌های دفن زباله‌های خطرناک حائز اهمیت بسیاری می‌باشد [۱۸]. برای حل معادلات جریان سیال در محیط‌های دارای شکستگی، از روش‌های متعدد تحلیلی و عددی و روش‌های معادل‌سازی استفاده می‌شود. به صورت معمول، استفاده از روش‌های تحلیلی دارای محدودیت‌های زیادی است، چرا که کاربرد این روش‌ها به مسایل بسیار ساده با تعداد بسیار کم شکستگی و الگوی شکستگی‌های منظم محدود شده است. بر این مبنا، روش‌های عددی به صورت گسترده‌ای در این

انواع ناپیوستگی‌ها مانند درزه‌ها، گسل‌ها و صفحات لایه بندی در تمامی نقاط پوسته زمین حاضر هستند. این گونه ناپیوستگی‌های طبیعی در توده سنگ‌های زیرزمینی باعث به وجود آمدن شبکه‌های پیچیده‌ای از ناپیوستگی‌ها می‌شوند که تمامی خصوصیات هیدرولیکی توده سنگ‌ها را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. فهم و درک تاثیرات این شبکه‌های پیچیده در بسیاری از زمینه‌های مهندسی زمین مانند ساخت و سازهای زیرزمینی، چرخه‌های زمین‌گرمایی،

* نویسنده مسئول: s.namdari@mi.iut.ac.ir

زمینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه جریان در محیط‌های متخلخل دارای شکستگی

نام نویسنده	زمینه پژوهش	سال
سامیر و همکاران [۱۶]	بررسی جریان در مخازن نفتی	۲۰۰۲
دی دوناتو و همکاران [۶]	روش خط جریان در توده سنگ با تخلخل دوگانه	۲۰۰۳
داناگوپتا و همکاران [۵]	شبیه‌سازی خط جریان	۲۰۰۷
جینگ و استفانسون [۹]	برآورد روش DFN برای حل معادلات جریان	۲۰۰۷
نامداری و همکاران [۱۳]	مقایسه محیط دارای نفوذپذیری ساده و دوگانه	۲۰۱۲
پرست [۱۵]	بررسی نقش شکستگی در جریان درون توده سنگ	۲۰۱۲
نامداری و همکاران [۱۲]	تأثیر نفوذپذیری ماتریکس و دانسیته شکستگی در الگوی جریان	۲۰۱۶
لی و همکاران [۱۰]	بررسی تزریق آب به درون مخزن با نفوذپذیری کم دارای شکستگی بسیار بزرگ	۲۰۱۸
آتکولوف و همکاران [۱]	بررسی تزریق در الگوی ربع پنج نقطه‌ای	۲۰۱۹
وانگ و همکاران [۲۰]	شبیه‌سازی جریان در مخزن ژئوترمال تبّ	۲۰۲۰
سان و همکاران [۱۸]	بررسی نقش شکستگی در جریان و هدایت گرمایی مخزن	۲۰۲۰

در میان روش‌های عددی، روش‌های حجم محدود FVM و تفاضل محدود FDM ^۲ از اقبال گسترده‌تری

برخوردار بوده‌اند [۹]. در جدول ۱ تعدادی از مطالعات انجام گرفته در این زمینه آورده شده است.

مشکل اساسی در استفاده از روش‌هایی مانند المان محدود و تفاضل محدود و المان مرزی، این است که اساس این روش‌ها بر مبنای محیط پیوسته تعریف شده‌اند. این محدودیت، کاربرد این روش‌ها را برای سیستم‌های غیرپیوسته دارای شکستگی با مشکل مواجه می‌نماید. بدین منظور از روش‌های غیرپیوسته مانند شبکه شکستگی مجزا^۳ استفاده می‌شود. ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که روش شبکه شکستگی مجزا را نمی‌توان برای محیط‌های بزرگ دارای نفوذپذیری دوگانه به صورت بهینه به کار برد. استفاده از این روش برای محیط‌های بزرگ، بسیار وقت‌گیر و زمان‌بر می‌باشد و کاربر را با مشکلات عدیده‌ای روبه‌رو می‌نماید [۱۲] و [۱۳]. از این رو، برای شبیه‌سازی جریان سیال در مقیاس‌های بزرگ‌تر از مدل‌های آزمایشگاهی نیاز به استفاده از روشی است که علاوه بر سرعت، دارای دقت مناسبی نیز باشد. تاکنون کاربرد روش‌های عددی مختلفی برای حل مسایل جریان در محیط‌های سنگی دارای ناپیوستگی بررسی شده‌است [۳] و [۱۵]. برخی از روش‌های عددی با نیم‌نگاهی به مدل‌سازی مسایل بزرگ مقیاس توسعه یافته‌اند [۲] و [۴]. در گذشته بسیاری از این روش‌های عددی به دلیل نیاز به توان محاسباتی بالا، کمتر مورد استفاده قرار می‌گرفتند [۵]. یکی از این روش‌ها، روش خط جریان می‌باشد که در حوزه‌های مهندسی مخزن بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۰]، [۱۷] و [۲۱].

در این روش، مینا بر حل یک گزاره در راستای خطوطی است که خطوط جریان نامیده می‌شوند [۵]، [۶]، [۱۶] و [۲۱]. در این روش، یک معادله برای حل جریان در سه‌بعد با تعدادی معادله برای حل جریان در یک‌بعد جایگزین می‌گردد و در واقع یک حل سه‌بعدی وقت‌گیر با تعدادی حل یک‌بعدی سریع‌تر جایگزین می‌گردد [۱۹]. از مزایای استفاده از این روش، سرعت بالای این روش نسبت به روش‌های المان محدود می‌باشد که سرعت حل جریان را در تحقیقات مختلف برای محیط بزرگ مقیاس بین ۱۰ تا ۱۰۰ برابر بهبود بخشیده است [۲۰].

^۱ Finite Element Method

^۲ Finite Difference Method

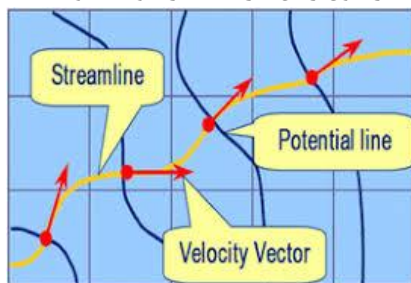
^۳ Discrete fracture network

۲- مفاهیم کلی و تعاریفات

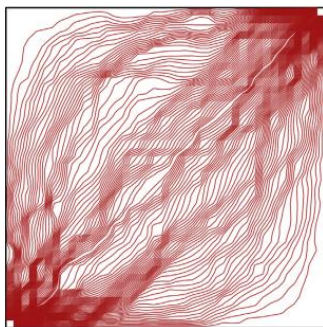
در این بخش، ابتدا به مبانی نظری مورد استفاده در این پژوهش پرداخته می‌شود. سپس در بخش بعدی، روش تحقیق مورد استفاده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۱- خطوط جریان و زمان پرواز

یک راهکار بسیار کارا برای نظارت بر میدان جریان سیال، استفاده از خطوط جریان می‌باشد. در واقع، خطوط جریان یک تصویر لحظه‌ای از میدان جریان سیال می‌باشد. در صورتی که جریان پایا باشد، این خطوط در طول زمان ثابت می‌باشند. در غیر این صورت و با تغییر میدان جریان، این خطوط در طول زمان دارای تغییر خواهند بود [۲].



(الف)



(ب)

شکل ۱- الف: بردارهای سرعت جریان سیال، خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان (قسمت الف) که بر این خطوط هم‌پتانسیل عمود و بر بردارهای سرعت مماس می‌باشند و ب: خطوط جریان حاصل از این فرآیند.

برای به دست آوردن خطوط جریان، می‌بایست در ابتدا میدان سرعت سیال در محیط به دست آید. منحنی‌هایی که در همه نقاط محیط مورد مطالعه، مماس بر میدان سرعت و عمود بر خطوط هم‌پتانسیل باشند، با نام خطوط جریان شناخته می‌گردند (شکل ۱).

تئوری روش خطوط جریان بر مبنای اصل ساده فیزیکی حرکت سیال از ناحیه پر فشار به ناحیه کم فشار می‌باشد که همان حرکت طبیعی سیال در امتداد خطوط جریان در نواحی مختلف از جمله نواحی متخلخل است. تاثیرات عبارت نفوذ پذیری در ناحیه متخلخل و شرایطی که چاه‌های تولید و یا تزریق اعمال می‌کند، مسیر خطوط جریان را در حالت سه‌بعدی مشخص می‌نماید، در حالی که فیزیک جابجائی توسط حل گزاره یک بعدی در امتداد خط جریان اعمال می‌شود. حل معادلات برای این مکانیزم‌ها هم از طریق عددی و هم تحلیلی صورت می‌گیرد. انتقال سیال در امتداد خطوط جریان روشی است که برای هر مقدار مراحل زمانی موجب همگرایی مساله می‌شود یعنی روش همواره همگراست [۵]. در روش خطوط جریان ابتدا معادله فشار در سه بعد و به صورت غیر صریح حل می‌شود و سپس گزاره یک بعدی اشباع-جریان جزئی در راستای خطوط جریان به صورت صریح حل می‌شود که باعث افزایش سرعت همگرایی (به علت نزدیک بودن خواص و شرایط در راستای خطوط جریان) می‌گردد. باید به این نکته اشاره نمود که خطوط جریان در واقع خطوط لحظه‌ای هستند که بر میدان سرعت مماس می‌باشند. نیازی نیست که میدان سرعت نشان دهنده حالات پایا باشد. همچنین هیچ لزومی ندارد که سیال مورد نظر، غیرقابل تراکم باشد. می‌توان میدان سرعت را برای ماده چند فاز به صورت جداگانه تفسیر نمود. در هر صورت، هیچ محدودیتی برای اعمال این قانون برای رسم خطوط جریان وجود ندارد [۵].

اما کاربرد این روش به این مورد محدود نمی‌شود. در بسیاری از زمینه‌های مهندسی سنگ، مانند مخازن ژئوترمال، پیش‌بینی حجم آب ورودی به درون تونل، معادن روباز و شیب‌های سنگی، سایت‌های دفن زباله‌های خطرناک در محیط‌های سنگی (که بر خلاف حالت مطلوب، همیشه دارای شکستگی و سطوح ناپیوستگی می‌باشند)، علاقه مهندسی به سمت این موضوع است که شکل کلی شبکه جریان در محیط مورد نظر به چه شکلی است و دقت به جزئیات شبکه جریان در مقیاس‌های کوچک‌تر در درجه دوم اهمیت قرار دارد [۳].

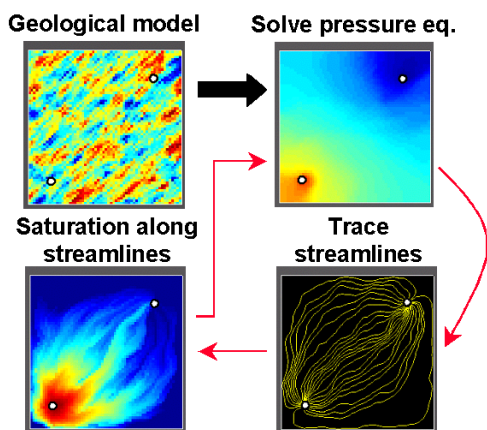
$$\left(\frac{\vec{v}}{|\vec{v}|}\right) \cdot \nabla \tau = \frac{d}{dr} \tau = \frac{\phi}{|\vec{v}|} \quad (4)$$

از گزاره (۴) این گونه استخراج می شود که می توان این پارامتر را به صورت دیفرانسیلی زیر نیز به دست آورد [۱۱]:

$$\vec{v} \cdot \nabla \tau = \phi \quad (5)$$

گزاره (۵) با نام گزاره زمان پرواز نیز شناخته می شود.

شکل ۲ نشان دهنده الگوریتم کلی حل معادلات برای روش خط جریان می باشد. ابتدا مدل زمین شناسی از روی محیط مورد نظر ساخته می شود و خواص هیدرولیکی محیط مانند تخلخل مؤثر و نفوذپذیری، بر روی آن تعریف می گردد. سپس مشخصات سیال مورد نظر مانند ویسکوزیته به برنامه توسعه داده شده اعمال می گردد. در این مرحله، بایستی شرایط اولیه و مرزی به برنامه داده شود. برای سپس معادلات فشار به روش ضمنی حل می گردد. پس از آن درصد اشباع برای هر مؤلفه توسط حل صریح معادلات جریان، محاسبه می گردد و خطوط جریان به روش نیمه تحلیلی پولاک، رسم می گردند [۱۶]. خطوط جریان نشان دهنده تصویری لحظه ای از میدان جریان سیال در محیط مورد مطالعه است. پس از آن دوباره فشارهای جدید برای مرحله بعدی محاسبه گردیده و دوباره به حل معادلات اشباع پرداخته می شود. این روند تا جایی ادامه پیدا می کند که شرایط مورد نظر برای پایان شبیه سازی شامل همگرا شدن معادلات و پایا شدن جریان، ادامه پیدا کند [۲۱]



شکل ۲- روند حل معادلات روش خط جریان شامل ساخت مدل زمین شناسی، حل معادلات فشار، اشباع و شناسایی خطوط جریان [۷]

اگر $\vec{x}(r)$ نماینده پارامتریک یک خط جریان در زمان t و نشان دهنده سرعت باشد، آن گاه [۶]

$$\frac{d\vec{x}}{dr} * \vec{v}(\vec{x}, t) = 0 \quad (1)$$

یا به عبارت دیگر [۶]

$$\frac{d\vec{x}}{dr} = \frac{\vec{v}(t)}{|\vec{v}(t)|} \quad (2)$$

گزاره (۱) و (۲) نشان دهنده این مسأله می باشند که

دو خط جریان نمی توانند در یک لحظه از زمان همدیگر را قطع نمایند. بنابراین اگر امتداد هر یک از خطوط جریان را به صورت یک مؤلفه مختصاتی در نظر بگیریم، جریان در هر یک از این مؤلفه ها، تک بعدی خواهد بود.

به جای استفاده از پارامتر r برای پارامترسازی خط جریان، می توان از پارامتری به نام زمان پرواز استفاده کرد که کاهش حجم قابل استفاده برای جریان در محیط (مانند تخلخل) را نیز در نظر می گیرد. زمان پرواز، پارامتری است که در تحلیل شبکه جریان، بسیار کاربرد دارد. این پارامتر به صورت مدت زمان لازم برای رسیدن یک ذره خنثی از محل منبع به هر نقطه در درون محیط مورد مطالعه تعریف می شود. بنابراین، هرچه مقدار این پارامتر بزرگ تر باشد، به این معنی است که برای یک ذره فرضی، مدت زمان بیشتری طول خواهد کشید تا از محل منبع یا محل تزریق به آن نقطه از مدل برسد. این امر به آن معنی است این ذره دارای سرعت پایینی است و جریان در آن محل، سرعت کمی دارد. این پارامتر، در نرم افزارهای مکانیک سنگی به دست نمی آید و در نتیجه در هنگام استفاده از این نرم افزارها، نمی توان تحلیلی بر مبنای سرعت جریان انجام داد.

برای به دست آوردن زمان پرواز، از گزاره انتگرالی زیر استفاده می نماییم [۱۱]:

$$\tau(r) = \int_0^r \frac{\phi(\vec{x}(s))}{|\vec{v}(\vec{x}(s))|} ds \quad (3)$$

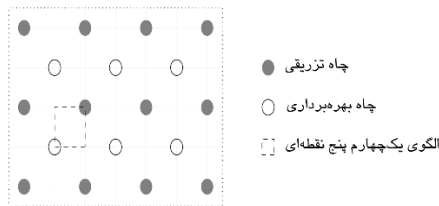
که در گزاره (۳)، τ نشان دهنده زمانی است که یک ذره در امتداد یک خط جریان مسافت r را طی می کند. این پارامتر با نام زمان پرواز شناسایی می گردد. می توان به صورت دیگری نیز این پارامتر را محاسبه نمود. محاسبه مشتق سوئی در امتداد یک خط جریان و سپس اعمال قضیه اساسی حسابان استفاده، نتیجه زیر را به دست می دهد [۱۱]:

$$v_{i,k} \approx A_{i,k} \mathbf{K}_i \frac{(p_i - \pi_{i,k}) \vec{c}_{i,k}}{|\vec{c}_{i,k}|^2} \cdot \vec{n}_{i,k} \quad (10)$$

$$= T_{i,k} (p_i - \pi_{i,k})$$

۳-۱- هندسه و پارامترهای مدل

به این علت که ساخت مدل در مقیاس آزمایشگاهی به صورت شفاف نشان دهنده خصوصیات یک مدل بزرگ مقیاس نیست، در مطالعه این مدل‌ها، یک سری الگوهای استاندارد، دارای کاربرد فراوانی در پژوهش‌ها می‌باشند. یکی از پرکاربردترین الگوها برای چاه‌های تزریقی و بهره‌برداری، الگوی ۵ نقطه‌ای می‌باشد. در این الگو که در بسیاری از پژوهش‌ها در زمینه مخازن ژئوترمال، مهندسی تزریق، تحلیل جریان آب زیرزمینی و مهندسی مخازن نفتی مورد استفاده قرار گرفته است، سیال به صورت یک منبع نقطه‌ای از گوشه مدل مربعی تزریق می‌گردد و از نقطه مقابل قطری آن نیز برداشت صورت می‌گیرد. تقارن موجود در هندسه مدل مربعی و همچنین محل ترم‌های منبع (تزریق و برداشت)، باعث می‌گردد که کانتورهای فشار و زمان پرواز و همچنین خطوط جریان دارای تقارن باشند که از تقارن تمامی این پارامترها، می‌توان به عنوان فاکتورهای کنترلی برای راستی‌آزمایی روش حل استفاده نمود. علاوه بر تقارن، استفاده از این مدل، باعث کاهش حجم محاسبات به ۲۵ درصد مقدار اولیه می‌گردد که کاربرد این مدل را با صرفه‌جویی محاسباتی ۷۵ درصدی، قابل توجیه می‌سازد [۱]. شکل ۴ به صورت شماتیک، نشان دهنده الگوی مورد استفاده از این پژوهش می‌باشد.



شکل ۴- الگوی ۵ نقطه‌ای برای تزریق که برای کوتاهی در محاسبات، از یک‌چهارم آن استفاده می‌شود.

مدل دارای نفوذپذیری دوگانه به صورت مربعی دو بعدی با ابعاد ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر می‌باشد که توسط ۳۶۰۰ سلول جداگانه مشخص می‌شود. محل تزریق سیال در سمت جنوب غرب مدل و محل برداشت، در سمت شمال شرق مدل قرار گرفته است. در این مدل، گسلی

به منظور حل معادلات فشار و جریان، از روش حجم محدود استفاده می‌گردد. یکی از محبوب‌ترین حل‌کننده‌ها بر مبنای این روش، روش تقریب جریان دو نقطه‌ای می‌باشد. این روش دارای سیستم معادلاتی مناسبی برای معکوس‌سازی می‌باشد و فشار یکنواختی را تخمین می‌زند.

۲-۱- روش حل عددی

برای سادگی فرمولبندی، فرض می‌گردد که جریان تک‌فازی در محیط وجود دارد. بنابراین:

$$\nabla \cdot \vec{v} = q \quad \vec{v} = -K \nabla p \quad \Omega \subset \mathbb{R}^d \quad (6)$$

در روش حجم محدود، از مفهوم پایه‌ای فیزیکی قانون بقای جرم (و قانون بقای حجم برای یک سیال غیرقابل فشرده‌گی) استفاده می‌گردد. بازنویسی گزاره بالا به شکل انتگرالی، نتیجه زیر را به دست خواهد داد [۸]:

$$\int_{\partial \Omega_i} \vec{v} \cdot \vec{n} ds = \int_{\Omega_i} q d\vec{x} \quad (7)$$

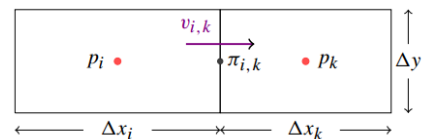
سیس از قانون داری برای محاسبه جریان در هر ضلع سلول المان‌بندی شده، استفاده می‌گردد [۸]:

$$v_{i,k} = \int_{\Gamma_{i,k}} \vec{v} \cdot \vec{n} ds \quad \Gamma_{i,k} = \partial \Omega_i \cap \partial \Omega_k \quad (8)$$

قانون نقطه مرکزی برای محاسبه انتگرال گزاره بالا به کار گرفته می‌شود [۸]:

$$v_{i,k} \approx A_{i,k} \vec{v}(\vec{x}_{i,k}) \vec{n}_{i,k} = -A_{i,k} (K \nabla p)(\vec{x}_{i,k}) \cdot \vec{n}_{i,k} \quad (9)$$

که در آن $\vec{x}_{i,k}$ نشان‌دهنده مرکز سطح روی مرز $\Gamma_{i,k}$ می‌باشد. شکل ۳، دو سلول مجاور در یک دستگاه کارتزین را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- روش حل تخمین دونقطه‌ای برای ۲ سلول مجاور [۱۱]

در این روش، فشار متوسط در کل سلول بر روی نقطه مرکزی سلول در نظر گرفته می‌شود. اگر فرض شود که فشار در طول سلول خطی (و یا ثابت) است، گزاره (۹) به فرم زیر تبدیل می‌گردد [۸].

شکل زیر تعریف شده است:

$$K_{ratio} = \frac{k_f}{k_m} \quad (11)$$

که در گزاره (۱۱)، K_{ratio} نشان دهنده نسبت نفوذپذیری و k_f و k_m به ترتیب نماینده نفوذپذیری گسل و ماتریکس سنگ زمینه می‌باشند.

با در نظر گرفتن این حقیقت که نفوذپذیری ماتریکس ثابت می‌باشد، واضح است که با افزایش این نسبت در واقع نفوذپذیری گسل افزایش می‌یابد. به منظور آنالیز حساسیت در این مطالعه از نسبت‌های ۵، ۵۰، ۵۰۰ و ۵۰۰۰ برای نسبت میزان نفوذپذیری گسل به ماتریکس، که از این پس نسبت نفوذپذیری نامیده می‌شود، استفاده شده است. بنابراین نقاط روی گسل بر مبنای نسبت نفوذپذیری استفاده شده، دارای نفوذپذیری‌های متفاوتی خواهند بود.

برای مقایسه بهتر تصاویر، کانتورها فشار، خطوط جریان، زمان پرواز و مناطق راکد برای حالتی که گسلی وجود نداشته باشد نیز آورده شده است. در این حالات، از نسبت نفوذپذیری ۱ ($K_{ratio} = 1$) استفاده شده است.

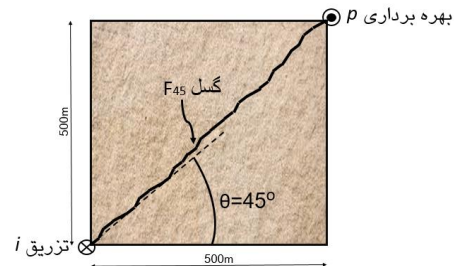
۴-۱- نتایج مورد استفاده

نتایج خروجی از شبیه‌سازی عددی برای این مدل شامل فشار، خطوط جریان، زمان پرواز و مناطق راکد می‌باشد. بنابراین این مدل می‌تواند اطلاعاتی افزون بر نرم‌افزارهای متداول در زمینه شبیه‌سازی جریان سیال در توده سنگ دارای شکستگی را تولید نماید. در خصوص تعریف خطوط جریان و زمان پرواز در قسمت‌های قبلی توضیح داده شد.

مناطق راکد شامل مناطقی است که سرعت جریان در آن‌ها بسیار پایین و در مواردی حتی نزدیک به صفر می‌باشد. درک این مناطق از این جهت حائز اهمیت می‌باشد که در برخی موارد مانند مخازن ژئوترمال، تزریق جهت مقاوم سازی زمین و یا مهندسی مخزن، نیاز مبرم به این نکته وجود دارد که جریان در کدام مناطق راکد مانده است. شناسایی این مناطق می‌تواند راندمان را برای منابع زمین‌گرمایی بالاتر ببرد و الگوی مورد استفاده در تزریق و بهره‌برداری را برای افزایش راندمان بهره‌برداری مخزن نفتی را دستخوش تغییر نماید.

در زمینه تونل‌ها و مشکلاتی که ورود آب به فضاهای زیرزمینی ایجاد می‌کند، در صورتی که علاوه بر فشار،

سرتاسری به شکل قطری آورده شده است که تحت نام F_{45} با زاویه ۴۵ درجه (همراستا با خط واصل ترم‌های منبع) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این مدل به صورت شماتیک در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵- شماتیکی از مدل همراه با گسل F_{45} به همراه ابعاد و نحوه قرارگیری این گسل در این آرایش

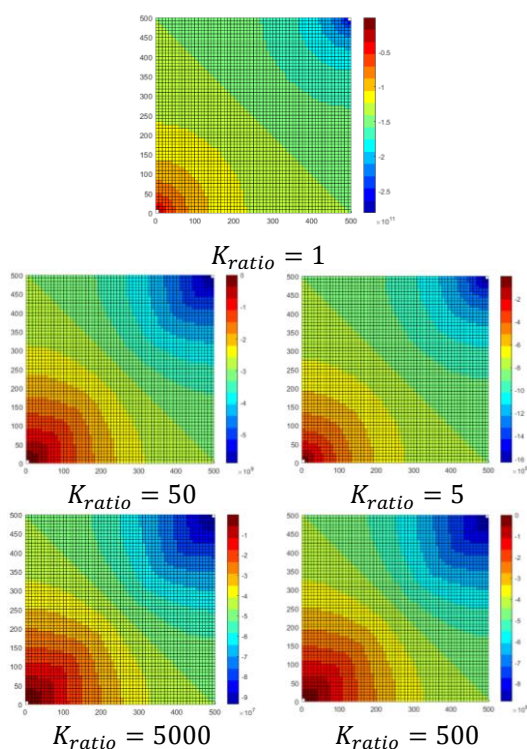
همانطور که گفته شد، مرزهای این مدل به علت تقارن در مدل اصلی به صورت نفوذناپذیر تعریف شده‌اند. بنابراین فرض بر این است که جریان سیال از نقطه i وارد شده و از نقطه p خارج گشته است.

برای مدل جریان سیال، از مدل جریان غیرقابل فشردگی برای یک سیال در حالت پایا استفاده شده است. با توجه به این مسأله که اشباع برای حالت جریان پایا برای تمامی سلول‌ها برابر با ۱۰۰ درصد انتخاب شده است، کل میزان سیال تزریق شده حاضر در مدل برابر با مجموع میزان تخلخل مؤثر تمامی سلول‌ها خواهد بود. تزریق به حالت، نرخ ثابت^۴ استفاده شده است.

برای ساخت مدل، از ماتریکسی با میزان تخلخل ۱۰ درصد و میزان نفوذپذیری ۱۰ میلی داریسی استفاده شده است. این مقادیر متوسط از میانگین‌گیری مقادیر نفوذپذیری و تخلخل برای سنگ‌های مختلف رسوبی، از مقالات مختلفی استخراج شده است [۱۴].

به منظور آنالیز حساسیت، مقدار نفوذپذیری گسل در بازه وسیعی تغییر داده شده است. همچنین برای گسل، مقادیر متفاوتی برای نفوذپذیری تعیین گردیده است. این مقادیر انتخابی به صورت مطلق نبوده و به صورت نسبی در تناسب با مقدار نفوذپذیری ماتریکس سنگ تعریف می‌گردند. به این معنا که نسبتی به نام نسبت نفوذپذیری به

^۴ Controlled rate injection



شکل ۶- کانتورهای فشار در نسبت‌های نفوذپذیری گسل به ماتریکس مختلف. شکل و روند کانتورهای فشار بدون تغییر می‌باشد اما مقدار فشار برای مدل با افزایش نفوذپذیری گسل، کاهش یافته است.

بنابراین شکل کانتورهای فشار به تنهایی، عامل تعیین کننده نخواهد بود. علاوه بر این شکل کانتورها، مقدار فشار برای هر سلول و پیکسل دارای اهمیت حیاتی است. هنگامی که نیاز به تزریق سیال در توده سنگ دارای شکستگی وجود دارد و یا در هنگام رفتارنگاری گمانه‌های پیرومتریک و کنترل فشار و ستون آب در این گمانه‌ها در زمان زهکشی، این مسؤله اهمیت خود را نمایان می‌سازد. کانتور فشار، نشان دهنده جهت کلی حرکت سیال است که جریان به صورت طبیعی از منطقه پرفشار به منطقه کم‌فشار و در جهت عمود بر خطوط جریان برقرار است. اما مقدار فشار، سنج‌های برای صحت طراحی محل تزریق سیال می‌باشد، چرا که افزایش بیش از حد فشار هم به تأسیسات تزریق آسیب وارد می‌کند و هم نشان‌دهنده جانمایی اشتباه برای نقاط تزریق و برداشت می‌باشد. این یک اصل پذیرفته شده است که در مطالعات دیگر نیز به چشم می‌خورد [۵]، [۶] و [۷].

دسترسی به اطلاعاتی مانند زون‌های راکد وجود داشته باشد، می‌توان از الگوهای مختلف چاه‌های زهکش استفاده کرد و آب را از نقاط مختلف فضای زیرمینی پیش از حفاری تخلیه نمود. برای شناسایی مناطق راکد، از این ایده استفاده می‌شود: اگر برای هر نقطه از مدل، مدت زمان پرواز اندازه‌گیری شود و با مدت زمانی که لازم است تا ذره از این نقطه به محل خروج از مدل برسد جمع شود و کانتور این زمان‌ها برای تمامی نقاط مدل ترسیم گردد، می‌توان مناطق راکد را شناسایی نمود.

۱- ارائه نتایج

در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی مربوط به کانتور فشار، خطوط جریان، زمان پرواز و مناطق راکد به ترتیب آورده شده است. برای آسانی در مطالعه، بررسی نتایج برای هر پارامتر و شکل در همان بخش آورده شده است.

۱-۲- تغییرات کانتورهای فشار

در برنامه توسعه داده شده، به علت تقارن فرض بر این است که مرزها نفوذناپذیر می‌باشند. بنابراین تمامی جریان از دو محل منبع و تخلیه، به درون مدل انتشار یافته و سپس خارج می‌گردد. پس از اعمال شرایط مرزی (نفوذناپذیر بودن مرزها) و اولیه، مقدار فشار برای هر سلول به دست آمده است. کانتورهای فشار در شکل ۶ آورده شده است. به لحاظ شکلی، کانتورهای فشار تفاوت زیادی با کانتورهای فشار برای محیط بدون حضور گسل ندارد، به این معنی که وجود گسل به تنهایی نتوانسته است تغییر شدیدی در شکل ظاهری کانتورهای فشار پدید آورد، اما باعث تغییر مقدار فشار برای هر نقطه از محیط شده است. هرچقدر مقدار نفوذپذیری گسل، به میزان نفوذپذیری ماتریکس کمتر باشد (یعنی K_{ratio} کوچک‌تر باشد)، مقدار فشار در محیط مورد مطالعه افزایش یافته است. اما هرچقدر میزان نسبت نفوذپذیری گسل به نفوذپذیری ماتریکس افزایش می‌یابد، فشار در تمامی نقاط محیط کاهش می‌یابد. واضح است که هرچقدر نفوذپذیری بالاتر رود، محیط مقاومت کمتر را در مقابل جریان سیال از خود نشان می‌دهد و فشار کمتری برای انتشار سیال در مدل مورد نیاز است.

توجه به این که در کد توسعه داده شده، از درصد اشباع آب ۱۰۰٪ استفاده شده است، میزان دانسیته خطوط جریان علاوه بر فشار تزریق و فشار بهره‌برداری، بیشتر وابسته به طراحی الگوی ورود سیال به مدل خواهد بود.

گرچه پس از افزایش نسبت نفوذپذیری از ۵ به ۵۰، می‌توان در الگوی خطوط جریان تغییراتی را شاهد بود، اما پس از افزایش نسبت نفوذپذیری از ۵۰ به ۵۰۰ و در نهایت ۵۰۰۰، تغییرات زیادی در الگو و شکل این خطوط رخ نمی‌دهد. همانطور که در قسمت‌های قبلی توضیح داده شد، خطوط جریان بر میدان سرعت سیال مماس می‌باشند. علاوه بر این، چگالی این خطوط در محل امتداد گسل نشان می‌دهد که قسمت عمده‌ای از جریان از محل این گسل عبور می‌نماید. برای درک بهتر، شکل خطوط جریان در غیاب گسل برای همین محیط آورده شده است تا مقایسه بهتری انجام شود.

۲-۳- تغییرات کانتور زمان پرواز

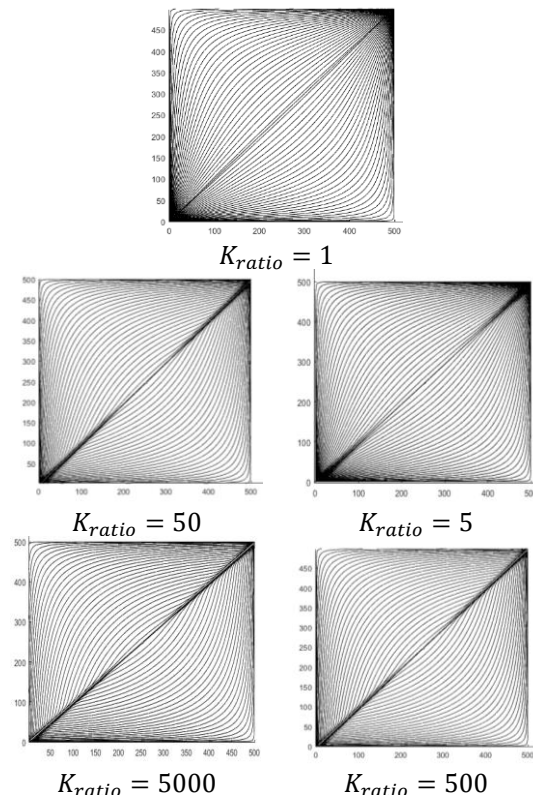
پارامتر زمان پرواز برای هر چهار مدل با نسبت‌های مختلف نفوذپذیری K_{ratio} آورده شده است. در تمامی حالات، تاثیر وجود ناپیوستگی بر مقدار پارامتر زمان انتقال کاملاً مشخص می‌باشد. با افزایش مقدار این نسبت، میزان عبور جریان از گسل نیز بیشتر می‌شود تا جایی که در نسبت نفوذپذیری برابر با ۵۰۰۰، جریان به سرعت از گسل انتقال می‌یابد و عبور جریان از ماتریکس، زمان بسیار زیادتری را نیاز دارد. در شکل‌ها، کانتورها نشان دهنده میزان زمان انتقال می‌باشند. رنگ قرمز نشان‌دهنده بالاترین زمان انتقال لازم در مدل و رنگ آبی پررنگ نشان‌دهنده زمان انتقال نزدیک به صفر (انتقال سیال به صورت تقریباً آبی) می‌باشد. ستون رنگی در شکل کانتور زمان انتقال آورده شده است.

با توجه به کانتورها، می‌توان پدیده انتشار را نیز مورد تحلیل قرار داد. در زمانی که گسل وجود ندارد (قسمت بالای شکل ۸)، کانتورها به صورت تقریبی دارای شکل یکنواختی می‌باشند. انتشار با افزایش نسبت نفوذپذیری، این یکنواختی تا حد زیادی تحت تأثیر حضور گسل قرار می‌گیرد. پدیده انتشار از گسل به ماتریکس نیز با افزایش این نسبت، کاهش چشم‌گیری را نشان می‌دهد. در قسمت‌های پایین شکل ۸ این مسأله به خوبی مشخص شده است.

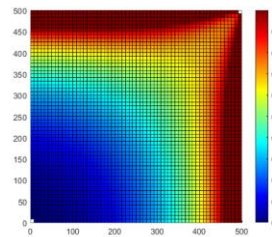
واضح است که میزان فشار در هر نقطه علاوه بر میزان نفوذپذیری، به مقادیر دیگری مانند نرخ ورود و خروج سیال از محیط (ترم‌های منبع)، و همچنین سطح تنش در منطقه نیز بستگی دارد که به منظور مطالعات توأمان هیدرومکانیکی، توجه به این مسایل توصیه می‌گردد.

۲-۲- تغییرات الگوهای خط جریان

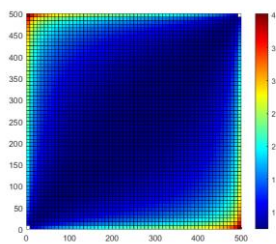
در شکل ۷ الگوی خط جریان برای نسبت‌های مختلف نفوذپذیری آورده شده است. مشخص است که در همسایگی و محدوده گسل F_{45} ، خطوط جریان به یکدیگر نزدیک شده‌اند و این نشان‌دهنده این موضوع است که جریان، شدت بیشتری در این نقاط داشته است.



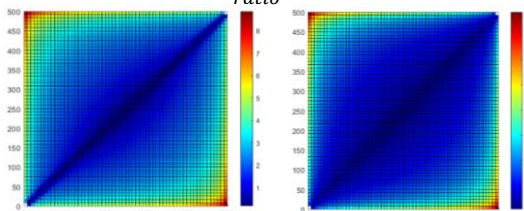
در منطق راکد بیشتر می‌شود. با افزایش شدید این مقدار تا ۵۰۰۰ برابر، شکل مناطق راکد دچار تغییر عمده‌ای می‌شود. مساحت این مناطق راکد با افزایش نفوذپذیری گسل به سرعت افزایش می‌یابد، چرا که تقریباً تمامی جریان سیال از درون گسل می‌گذرد و مناطق راکد بزرگی در سنگ زمینه و ماتریکس شکل می‌گیرد.



$K_{ratio} = 1$

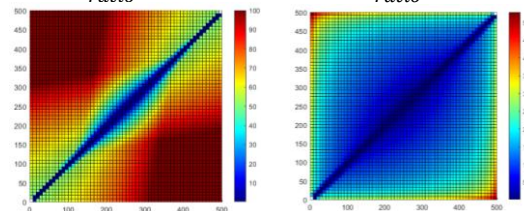


$K_{ratio} = 1$



$K_{ratio} = 50$

$K_{ratio} = 5$

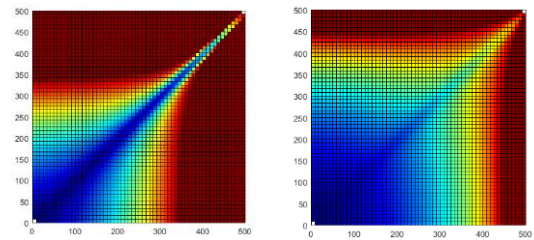


$K_{ratio} = 5000$

$K_{ratio} = 500$

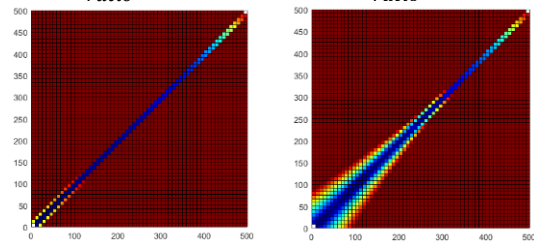
شکل ۹- مناطق راکد و دارای جریان زیاد در نسبت‌های نفوذپذیری گسل به ماتریکس مختلف. با افزایش نفوذپذیری گسل نسبت به ماتریکس، مناطق راکد دارای گسترش بیشتری می‌گردند.

در ابتدا و انتهای گسل، منطقه پر جریان منحصر به خود گسل است ولی در منطقه میانی، به علت تجمع سیال و افزایش پدیده انتشار به درون ماتریکس و مجدداً از درون ماتریکس به درون گسل، فاصله مناطق راکد از خط گسل فاصله قابل توجهی گرفته است. در شکل ۹، نتایج قابل مشاهده می‌باشد.



$K_{ratio} = 50$

$K_{ratio} = 5$



$K_{ratio} = 5000$

$K_{ratio} = 500$

شکل ۸- زمان انتقال در نسبت‌های نفوذپذیری گسل به ماتریکس مختلف. با افزایش نسبت نفوذپذیری، زمان انتقال روی گسل بسیار کاهش می‌یابد.

با توجه به سرعت بالاتر این روش، به نظر می‌رسد که بتوان در مواقعی که نیاز به مدل‌سازی در یک محیط بزرگ وجود دارد، از این روش استفاده کرد و در موقعیت‌های مناسب نیز به عنوان جایگزین روش المای مجزا از آن سود برد. مشخص است که بحث برتری یک روش عددی بر روش دیگر نیست، چرا که تمامی این روش‌ها به صورت مکمل با یکدیگر، بهترین نتایج را به دست می‌دهند. به خصوص در زمان‌هایی که نیاز به محاسبه پارامترهای مهمی مانند زمان پرواز وجود دارد، استفاده از این روش دارای توجه بسیار بالایی خواهد بود. نتایج حاصله از این مطالعه نشان می‌دهد که این راهبرد، دارای روندی منطقی است و نتایج با تجربیات مقالات گذشته در توافق خوبی است.

۴-۲- شناسایی مناطق راکد در مدل

با افزایش مقدار نسبت نفوذپذیری، تعداد سلول‌های موجود

۳- نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از آرایش نقطه‌ای قطری در الگوی ربع چهارنقطه‌ای، مطالعه بر روی تأثیر حضور ناپیوستگی بزرگ مقیاس در روی الگوی جریان انجام گرفت. حساسیت مدل به نفوذپذیری گسل، توسط پارامتری با نام نسبت نفوذپذیری $K_{ratio} = k_f/k_m$ کنترل گردید.

با افزایش نسبت نفوذپذیری از بین مقادیر ۱ (عدم حضور گسل)، ۵، ۵۰، ۵۰۰ و ۵۰۰۰، مشاهده می‌شود که شکل کانتورهای فشار در مدل تغییری نمی‌کند. اما مقدار فشار در هر نقطه از مدل با افزایش نسبت نفوذپذیری، کاهش یافته است. به بیان دیگر، روند کلی کانتورهای فشار حفظ شده در حالی که با افزایش این نسبت، کاهش فشار در مدل اتفاق افتاده است.

خطوط جریان به هنگام افزایش نفوذپذیری سطح گسل، در منطقه حضور گسل به یکدیگر نزدیک می‌شوند. با افزایش نسبت نفوذپذیری به مقادیر بالاتر، مشاهده می‌شود که تغییر شدیدی در شکل خطوط جریان اتفاق نمی‌افتد. با افزایش نفوذپذیری گسل، کانتورهای زمان پرواز هم به لحاظ مقداری و هم از نظر شکلی دستخوش تغییر می‌گردند. با افزایش نفوذپذیری گسل، نفوذ سیال از خط گسل بسیار سریع‌تر از نقاط دیگر مدل (ماتریکس سنگ زمینه) اتفاق می‌افتد. به بیان دیگر، سرعت جریان و انتقال مواد روی خط گسل بسیار بالاتر می‌باشد.

با افزایش نسبت نفوذپذیری K_{ratio} ، مناطق راکد بیشتری در محیط تشکیل می‌شوند و این نشان دهنده این موضوع است که برای طراحی الگوی تزریق و بهره‌برداری، نیاز به چاه‌های بهره‌برداری بیشتری وجود دارد که فشار تزریق بین این چاه‌های بهره‌برداری تقسیم گردد. کاربرد روش خط جریان با استفاده از پارامترهای دیگر

مانند زمان انتقال تکمیل می‌شود. مشاهده می‌شود که الگوی خط جریان، جز در مواقعی که فاصله بین نفوذپذیری ناپیوستگی و ماتریکس بسیار زیاد باشد، تغییرات چشمگیری را نسبت به حالت تخلخل یگانه نشان نمی‌دهد. بنابراین برای درک بهتر رفتار سیال در یک محیط، بهتر است این پارامترها در کنار یکدیگر مطالعه شوند. مزیت استفاده از این روش، در مقیاس‌های بزرگ است و برای استفاده از این روش در مقیاس‌های کوچک، مزیت‌های این روش کم‌رنگ‌تر می‌شوند.

پیشنهاد می‌گردد که این روش برای شبکه‌های پیچیده‌تر شکستگی‌های مجزا نیز پیاده‌سازی گردد. همچنین پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات آینده، سرعت و دقت این روش در مقایسه با روش‌های دیگر تحلیل جریان مورد بررسی قرار گیرد.

پیشنهاد می‌گردد اثر تنش بر روی این فرآیندها نیز کنترل و تحلیل گردد.

۳- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
\bar{x}	m	محورخط جریان
r	m	فاصله
v	m/sec	سرعت
t	sec	زمان
τ	sec	زمان پرواز
ϕ	-	تخلخل
q	m^3/sec	نرخ جریان
K	m^2	ضریب نفوذپذیری
K_{ratio}	-	نسبت نفوذپذیری

& Datta-Gupta, A. (2020). Streamline tracing and applications in embedded discrete fracture models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 106865.

[3] Cundall, P. A., & Hart, R. D. (2014). Numerical modeling of discontinua. *Comprehensive Rock Engineering*, 2, 231–243.

۴- منابع

- [1] Aitkulov, A., & Mohanty, K. K. (2019). Investigation of alkaline-surfactant-polymer flooding in a quarter five-spot sandpack for viscous oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 175, 706–718.
- [2] Chen, H., Onishi, T., Olalotiti-Lawal, F.,

- porosity and dual porosity medium using DFN and Dual fracture method (DFM). *Eurock 2012*. Sweden.
- [14] Olu-Ojo, T. (2020). *Permeability Evolution in Sandstone and Carbonate after Fracture Induced by CO2 Injection*. Curtin University.
- [15] Priest, S. D. (2012). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer Science & Business Media.
- [16] Samier, P., Quettier, L., & Thiele, M. (2002). Applications of streamline simulations to reservoir studies. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 5(04), 324–332.
- [17] Siavashi, M., Blunt, M. J., Raisee, M., & Pourafshary, P. (2014). Three-dimensional streamline-based simulation of non-isothermal two-phase flow in heterogeneous porous media. *Computers & Fluids*, 103, 116–131.
- [18] Sun, Z., Jiang, C., Wang, X., Lei, Q., & Jourde, H. (2020). Joint influence of in-situ stress and fracture network geometry on heat transfer in fractured geothermal reservoirs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 149, 119216.
- [19] Tanaka, S., Onishi, T., Kam, D., Dehghani, K., & Wen, X.-H. (2020). Application of Combined Streamline Based Reduced-Physics Surrogate and Response Surface Method for Field Development Optimization. *International Petroleum Technology Conference*. International Petroleum Technology Conference.
- [20] Wang, L., Zuo, L., & Zhu, C. (2020). Tracer Test and Streamline Simulation for Geothermal Resources in Cuona of Tibet. *Fluids*, 5(3), 128.
- [21] Zhao, P., He, S., Cai, M., Tao, Z., Zhao, M., Wu, X., ... Wang, Q. (2020). Streamline Simulation Based Vector Flow Field Characterization and Reconstruction Method for High Water Cut Reservoir. *International Petroleum Technology Conference*. International Petroleum Technology Conference.
- [4] Dailami, K., Nasriani, H. R., Sajjadi, S. A., Rafiee, M. R., Whitty, J., & Francis, J. (2020). Optimizing the ultimate recovery by infill drilling using streamline simulation. *Acta Scientiarum Technology*, 42.
- [5] Datta-Gupta, A., & King, M. J. (2007). *Streamline simulation: Theory and practice* (Vol. 11). Society of Petroleum Engineers Richardson.
- [6] Di Donato, G., Huang, W., & Blunt, M. (2003). Streamline-based dual porosity simulation of fractured reservoirs. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [7] Guo, Y., Zhang, Q., Xiao, F., Liu, R., Wang, Z., & Liu, Y. (2020). Grouting rock fractures under condition of flowing water. *Carbonates and Evaporites*, 35(3), 1–15.
- [8] Jonsthoel, T., & Stone, T. W. (2019, July 11). *Enhanced Two Point Flux Approximation Scheme for Reservoir Simulation*. Google Patents.
- [9] LANRU, J., & STEPHANSSON, O. (2007). *Fundamentals of discrete element methods for rock engineering*. Theory and Applications. Elsevier.
- [10] Lei, Z., Zhu, Z., Liu, S., Yu, T., Yuan, J., Li, J., ... Zhao, H. (2018). Waterflooding Optimization Using Improved Streamline Simulation for the Biggest Fractured Low-Permeability Reservoir in China. *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [11] Lie, K.-A. (2019). *An introduction to reservoir simulation using MATLAB/GNU Octave: User guide for the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST)*. Cambridge University Press.
- [12] Namdari, S., Baghbanan, A., & Habibi, M. J. (2016). Effects of matrix permeability and fracture density on flow pattern in dual porous rock masses. *ISRM International Symposium-EUROCK 2016*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [13] Namdari S., M. J. H. & B. A. (2012). A comparison between permeability of single