

# تأثیر زبری سطح روی الگوی توزیع سرعت سیال درون شکستگی سنگی

مرتضی جوادی اصطهباناتی (دانشجوی دکتری)

مصطفی شریفزاده (دانشیار)

کوروش شهریار (استاد)

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

مجتبی مهرجویی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اهریکبر

شکستگی‌ها در توده سنگ مسیرهای اصلی جریان‌اند و به عنوان عارضه‌ی مهم در رفتار هیدرولیکی توده سنگ مطرح می‌شوند. خواص هیدرولیکی توده سنگ در فعالیت‌های عمرانی، معدنی و محیط زیستی - نظیر دفن زباله‌های خطرناک و باطله فعالیت‌های هسته‌ی، نفت و انرژی زمین‌دما (ژئوترمال) - اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش جریان آشفته‌ی سیال یک‌فازی درون یک شکستگی سه‌بعدی با استفاده از روش حجم محدود و برای بازه وسیعی از سرعت ورودی جریان شبیه‌سازی شده است. تعدادی مقاطع قائم و افقی در دامنه‌ی هندسی شکستگی در نظر گرفته شده و مقادیر سرعت بی‌بعد شده روی هر یک از مقاطع و برای سرعت‌های ورودی مختلف محاسبه شده‌اند. این مقادیر، پس از مقایسه، برای ارزیابی تأثیر زبری دیواره‌ی شکستگی روی دامنه‌ی سرعت متوسط مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت ورودی، پروفیل (نیم‌رخ) سرعت نامتقارن‌تر شده و به سمت دیواره با زبری کم‌تر چوله می‌شود. همچنین با افزایش سرعت ورودی جریان، آرایش جدیدی از جریان هدایت شده (کانالیزه) مشاهده می‌شود و از نواحی با دهانه‌ی کوچک‌تر دبی جریان (بی‌بعد شده) بیشتری نسبت به نواحی با دهانه‌ی بزرگ‌تر عبور می‌کند.

واژگان کلیدی: جریان آشفته، شبیه‌سازی جریان، شکستگی سنگی، زبری، الگوی توزیع سرعت.

## ۱. مقدمه

در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی، نفوذپذیری ماتریکس (زمینه) سنگی در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی‌های موجود در توده سنگ بسیار ناچیز است. در این حالت رفتار هیدرولیک توده سنگ به وسیله‌ی شکستگی‌ها کنترل می‌شود؛ برآورد این رفتار نیازمند فهم مناسبی از رفتار هیدرولیک شکستگی و شبکه‌ی شکستگی‌ها است. رفتار جریان سیال درون شکستگی به دلیل افزایش کارایی مطالعات طراحی، اجرا و ایمنی سازه‌های زیرزمینی و روباز به عنوان یک موضوع مهم تحقیقاتی مطرح می‌شود.

برای بررسی رفتار جریان در شکستگی از رابطه‌ی مکعب استفاده‌ی گسترده‌ی شده است. به دلیل شرایط هندسی ایده‌آل مورد استفاده در این رابطه، محققین مختلف از نیم‌رخ‌های هندسی با دیواره‌های موازی غیرصفحه‌ی مثل دندان‌اره‌ی [۱]، سینوسی [۱] و پله‌ی [۲-۷] استفاده کرده‌اند که در این حالت رفتار هیدرولیک شکستگی

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۱۱/۲۹، اصلاحیه ۱۳۸۸/۸/۲۰، پذیرش ۱۳۸۸/۱۱/۱۲.

ttsco@aut.ac.ir  
sharifzadeh@aut.ac.ir  
k.shahriar@aut.ac.ir

با استفاده از مفهوم «دهانه‌ی مؤثر» بیان می‌شود. دهانه‌ی مؤثر فقط برای شکستگی با دیواره‌های موازی غیرصفحه‌ی برقرار است که تأثیر انحنای جریان را لحاظ نمی‌کند و در نتیجه مفهوم دهانه‌ی هیدرولیک برای شکستگی‌ها با سطوح زبر مطرح شد. [۸-۱۰]

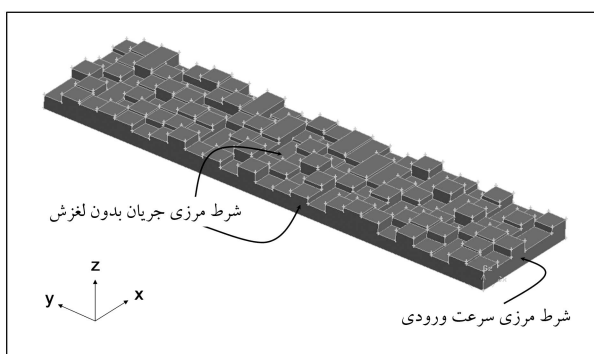
با پیشرفت توان محاسباتی، روش‌های عددی حل معادلات جریان برای بررسی رفتار هیدرولیک شکستگی مطرح شد و در بین آنها، از معادله‌ی رینولدز به‌طور گسترده برای بیان رفتار هیدرولیک شکستگی با دیواره‌های زبر استفاده شده است. [۸-۱۳] این معادله که محققین مختلفی اعتبار آن را بررسی کرده‌اند [۱۴-۱۷] فقط برای جریان آرام در شکستگی معتبر است و نیازمند شرایط خاص هندسی و سینماتیکی از شکستگی و جریان سیال است. [۱۸، ۱۷] معادله‌ی رینولدز برای مقادیر بزرگ عدد رینولدز، و نیز برای شکستگی با دیواره‌های خیلی زبر و تغییرات ناگهانی دهانه مناسب نیست. به همین علت در مطالعات اخیر برای بررسی جریان سیال در شکستگی، از حل

### ۳. شبیه‌سازی عددی

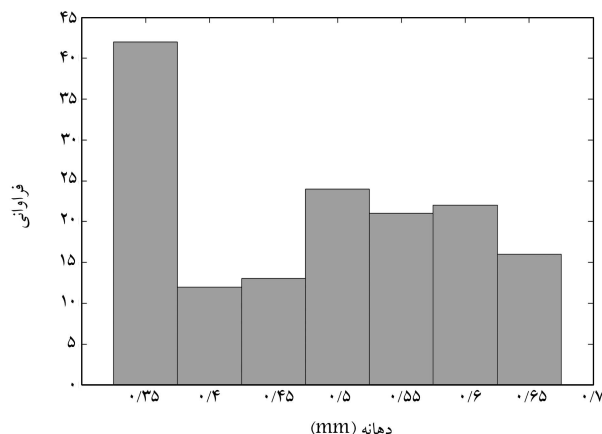
برای شبیه‌سازی جریان در شکستگی سه‌بعدی، از حل عددی حجم محدود معادلات ناویر-استوکس و معادله پیوستگی استفاده شده است. حل عددی معادلات ناویر-استوکس برای جریان آشفته بسیار مشکل است و به دلیل ساختارهای بسیار کوچک موجود در جریان آشفته، برای رسیدن به حل معادله باید از المان‌بندی بسیار ریز استفاده شود که این موضوع باعث افزایش شدید زمان محاسبات می‌شود. برای رفع این مشکل، از روش معادلات میانگین‌گیری شده در زمان (در این مطالعه از روش RANS<sup>۲</sup>) به همراه مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  استفاده شده است.

### ۱.۳. هندسه‌ی مدل و شرایط مرزی

یک دامنه‌ی هندسی سه‌بعدی از یک شکستگی مصنوعی با عرض ۳ mm و طول ۱۲٫۵ mm (به ترتیب در راستای  $x$  و  $y$ ) برای شبیه‌سازی جریان سیال مورد استفاده قرار گرفته است. برای ارزیابی تأثیر دهانه و زبری سطح روی جریان سیال در داخل فضای خالی، دیواره‌ی پایین شکستگی را صاف و دیواره‌ی بالایی را خیلی زبر (شکل الف) در نظر گرفته‌ایم. فضای خالی سه‌بعدی به صورت مجموعه‌ی از المان‌های حجمی روی صفحه‌ی  $z = y - x$  با فواصل یکنواخت  $\Delta x$  و  $\Delta y$  (برابر با ۰٫۵ mm) و دهانه‌ی متغیر ( $z$ ) ساخته شده است. دامنه‌ی هندسی شکستگی از ۱۵° عدد المان حجمی (۶ ردیف و ۲۵ ستون) تشکیل شده است



الف) پروفیل سه بعدی به همراه شرایط مرزی؛



ب) فراوانی دهانه‌ی دامنه‌ی هندسی.

شکل ۱. دامنه‌ی هندسی استفاده شده برای شبیه‌سازی جریان.

عددی معادله‌ی ناویر-استوکس استفاده شده است.<sup>[۱۹-۲۲]</sup> با افزایش عدد رینولدز، تأثیر جریان غیرخطی مشهودتر می‌شود، به گونه‌ی که عدد رینولدز بحرانی ۱۰° برای شروع جریان غیرخطی در شکستگی‌های سنگی پیشنهاد شده است.<sup>[۲۰]</sup> با این وجود تاکنون حل عددی معادله‌ی ناویر-استوکس برای جریان آشفته در شکستگی‌های سنگی چندان مورد مطالعه قرار نگرفته است.

رفتار جریان سیال درون شکستگی‌ها و در مقیاس میکروسکوپی با استفاده از معادلات مشتقات جزئی غیرخطی ناویر-استوکس بیان می‌شود.<sup>[۱۸]</sup> در حالت کلی حل این معادلات بسیار مشکل است و پیچیدگی هندسه‌ی شکستگی بر مشکلات کار با این روابط می‌افزاید.<sup>[۱۹]</sup> برای مدل‌سازی رفتار جریان در مقیاس ماکروسکوپی، لازم است که مدل‌های ماکروسکوپی برای جریان ارائه شوند. در مدل‌های با مقیاس ماکروسکوپی معمولاً از مقادیر متوسط برای پارامترهای جریان استفاده می‌شود که می‌توان این مقادیر را با استفاده از میانگین‌گیری مقادیر در مقیاس میکروسکوپی به دست آورد.<sup>[۲۳]</sup> این موضوع در جریان آشفتگی شکستگی‌های سه‌بعدی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته، اما در نوشتار حاضر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

در این مطالعه، ابتدا یک دامنه‌ی هندسی سه‌بعدی از یک شکستگی مصنوعی با دهانه‌ی متغیر ساخته شده است. دامنه‌ی محاسباتی برای این شکستگی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار GAMBIT<sup>TM</sup> تولید شده و برای شبیه‌سازی جریان سیال مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه‌سازی جریان آشفتگی سیال در داخل شکستگی به صورت سه‌بعدی با روش حجم محدود برای بازه وسیعی از دبی جریان حجمی و با استفاده از نرم‌افزار FLUENT<sup>TM</sup> انجام شده است. مقاطع مختلف افقی و قائم در دامنه‌ی هندسی شکستگی در نظر گرفته شده و مقادیر متوسط فشار و سرعت جریان روی این مقاطع محاسبه شده است. با استفاده از این مقادیر تأثیر زبری بر جریان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### ۲. معادلات حاکم بر جریان

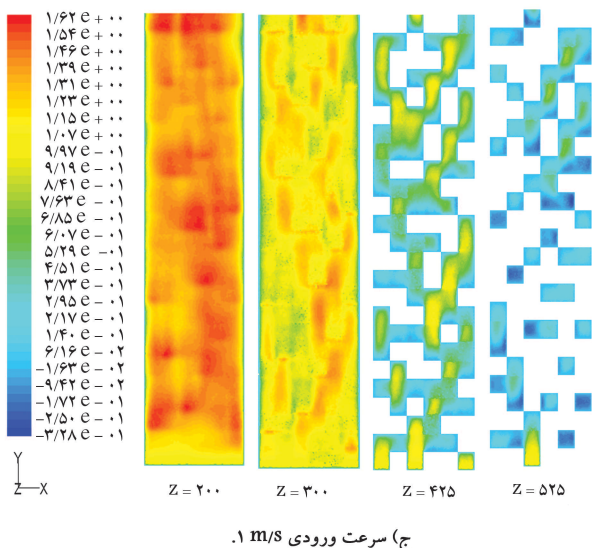
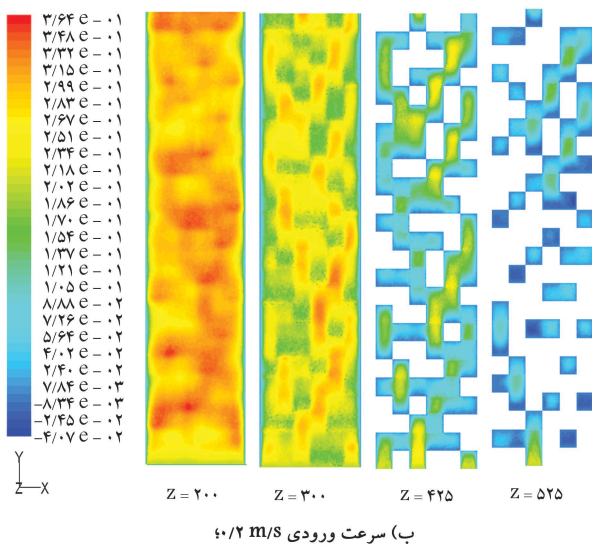
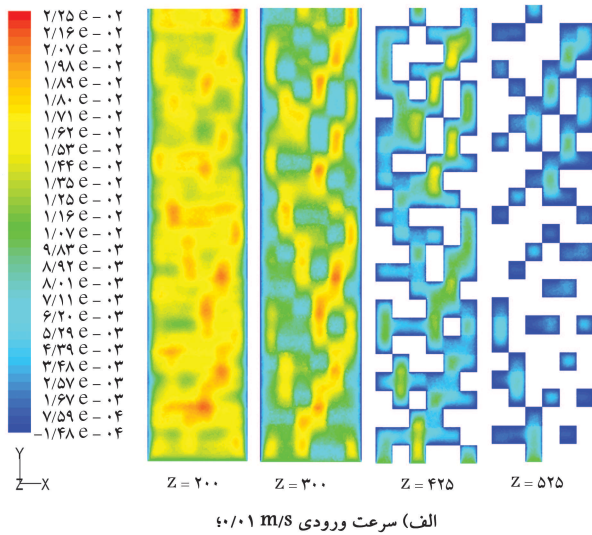
توصیف کلی جریان سیال درون یک شکستگی با استفاده از روابط ناویر-استوکس ارائه می‌شود که بیان‌گر تعادل اندازه حرکت و نیرو در درون فضای خالی شکستگی است. با در نظر گرفتن جریان آرام و پایا و یک سیال نیوتنی با چگالی و گرانروی ثابت در داخل شکستگی با دیواره‌های نفوذناپذیر، معادلات ناویر-استوکس چنین بیان می‌شود:<sup>[۲۰]</sup>

$$\rho(u \cdot \nabla) u = \mu \nabla^2 u - \nabla p \quad (۱)$$

که در آن  $\rho$  چگالی سیال،  $\mu$  گرانروی سیال،  $u$  بردار سرعت جریان و  $p$  فشار هیدرودینامیک است. رابطه‌ی ۱ از یک مجموعه معادلات مشتقات جزئی غیرخطی با درجه‌های مختلف تشکیل شده است. برای در اختیار داشتن سیستم بستگی از معادلات، لازم است این معادلات را با معادله‌ی پیوستگی (که بیان‌گر تعادل جرم است) ترکیب شوند.<sup>[۱۸]</sup> برای یک سیال غیرقابل تراکم، معادله‌ی تعادل جرم با معادله‌ی تعادل حجم معادل است و به رابطه‌ی ۲ بدل می‌شود:<sup>[۲۱]</sup>

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (۲)$$

شرایط مرزی متناسب با معادلات ناویر-استوکس شامل شرایط مرزی جریان بدون لغزش<sup>۱</sup> است که بردار سرعت سیال روی مرز جامد باید با بردار سرعت مرز جامد برابر باشد.<sup>[۲۲]</sup>



که ارتفاع هریک از این المان‌های حجمی (در راستای  $z$ ) نشان‌گر مقدار دهانه است. دهانه‌ی شکستگی از حداقل  $0.35$  mm تا حداکثر  $0.65$  mm تغییر می‌کند و مقدار متوسط و انحراف استاندارد آن به ترتیب  $0.485$  mm و  $0.106$  mm است. در شکل ۱ ب فراوانی آماری دهانه‌ی شکستگی نشان داده شده است. شبکه‌ی المان‌های محاسباتی با  $890000$  شبکه‌ی چهاروجهی با استفاده از نرم‌افزار GAMBIT<sup>TM</sup> ایجاد شده است؛ شبیه‌سازی‌ها برای سیال آب با چگالی  $998.2$  kg/m<sup>3</sup> و گرانروی  $0.701$  kg/ms بدون در نظر گرفتن تأثیرگرانش انجام شده است. از شرط مرزی سرعت ورودی<sup>۲</sup> برای ناحیه‌ی ورودی دامنه استفاده شده است. سرعت ورودی به صورت یکنواخت و در راستای  $y$  در نظر گرفته شده، و برای همه‌ی شبیه‌سازی‌های جریان آشفته «شدت آشفتگی<sup>۳</sup>» بسیار اندک و برابر ۱ درصد فرض شده است. برای ناحیه‌ی خروجی جریان در دامنه‌ی هندسی شکستگی، از شرط مرزی جریان خروجی<sup>۴</sup> استفاده شده است. بقیه‌ی سطوح جامد دامنه (مرزهای شکستگی) به صورت دیواره‌های نفوذناپذیر با شرط مرزی بدون جریان تعریف شده‌اند. شبیه‌سازی جریان در داخل شکستگی سه بعدی برای یک بازه سرعت ورودی از  $0.1$  m/s تا  $1$  m/s انجام شده است.

#### ۴. نتایج

در مباحث هیدرولیک، حد بین جریان آرام و آشفته با استفاده از عدد بدون بعد رینولدز تعیین می‌شود که بیان‌کننده‌ی ارتباط بین نیروهای اینرسی با نیروهای گران‌رو به صورت کثی است. در این نوشتار برای محاسبه‌ی عدد رینولدز از رابطه‌ی ۳ استفاده شده است:<sup>[۱۹]</sup>

$$Re = \frac{\rho Q}{\mu w} \quad (3)$$

که در آن  $Q$  دبی حجمی جریان عبوری از شکستگی و  $w$  عرض شکستگی است. مقادیر رینولدز برای سرعت‌های ورودی مختلف با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه شده و همراه با مقادیر افت فشار استاتیک ناشی از جریان سیال درون شکستگی، در جدول ۱ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود مقدار رینولدز برای شبیه‌سازی‌های انجام شده بین  $4.5$  تا  $450$  است.

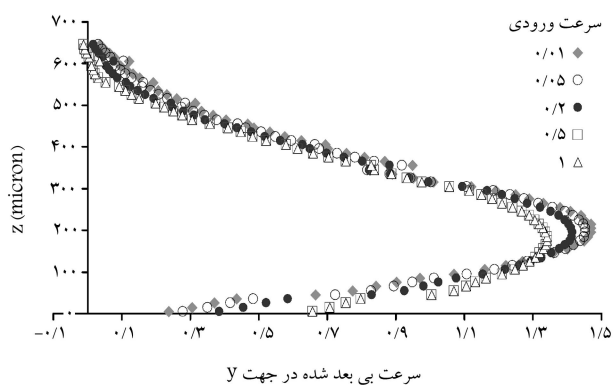
برای بررسی تأثیر زبری شکستگی و سرعت ورودی بر دامنه‌ی سرعت، کانتورهای مؤلفه‌ی  $y$  بردار سرعت به دست آمده از حل عددی جریان آشفته برای چهار مقطع افقی با ارتفاع  $200$ ،  $300$ ،  $425$ ،  $525$   $\mu\text{m}$  و برای سرعت‌های ورودی  $0.1$  m/s،  $0.2$  m/s،  $1$  m/s در شکل ۲ نشان داده شده است. مقاطع افقی  $200$   $\mu\text{m}$  و  $300$   $\mu\text{m}$  دیواره‌ی بالایی شکستگی را قطع نمی‌کنند و سیال در کل این مقاطع حضور دارد، ولی در مقاطع افقی با ارتفاع  $425$   $\mu\text{m}$  و  $525$   $\mu\text{m}$  در بعضی از نواحی، که با چهارگوش‌های سفیدرنگ نشان داده شده، سیال وجود ندارد. کانتورهای مؤلفه‌ی  $y$  بردار سرعت برای سه سرعت ورودی  $0.1$ ،  $0.2$ ،  $1$  m/s به ترتیب در شکل‌های ۲الف، ۲ب و ۲ج نشان داده شده‌اند.

برای سرعت ورودی  $0.1$  m/s (شکل ۲الف) جریان هدایت شده در همه‌ی مقاطع افقی مشاهده می‌شود ولی جریان هدایت شده در مقطع افقی با ارتفاع  $200$   $\mu\text{m}$  مشهودتر است. مسیرهای جریان به‌گونه‌ی هستند که اندازه‌ی دهانه‌ی آن بیشترین و تغییرات دهانه کم‌ترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین تعداد زیادی نواحی با اندازه دهانه‌ی  $600$   $\mu\text{m}$  و  $650$   $\mu\text{m}$  در مقاطع افقی وجود

شکل ۲. کانتورهای مؤلفه‌ی بردار سرعت جریان در جهت  $y$  روی مقاطع افقی با ارتفاع‌های  $200$ ،  $300$ ،  $425$ ،  $525$  و  $600$  میکرومتر.

جدول ۱. عدد رینولدز به همراه افت فشار استاتیکی ناشی از جریان سیال برای سرعت‌های مختلف ورودی جریان.

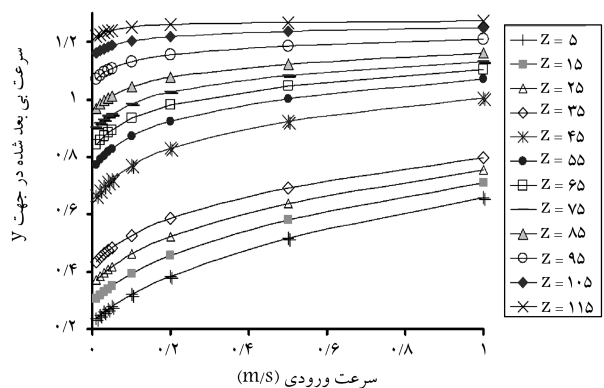
سرعت ورودی (m/s)	عدد رینولدز	افت فشار استاتیکی (Pa)
۰٫۱	۴٫۵	۱۲٫۱
۰٫۲	۹	۲۵٫۶
۰٫۳	۱۳٫۵	۴۰٫۵
۰٫۴	۱۸	۵۶٫۵
۰٫۵	۲۲٫۵	۷۳٫۵
۰٫۱	۴۵	۱۷۴٫۳
۰٫۱۵	۶۷٫۶	۳۰۲٫۷
۰٫۲	۹۰	۴۴۸٫۶
۰٫۵	۲۲۵	۱۶۰۹٫۰
۱	۴۵۰	۴۴۸۰٫۵



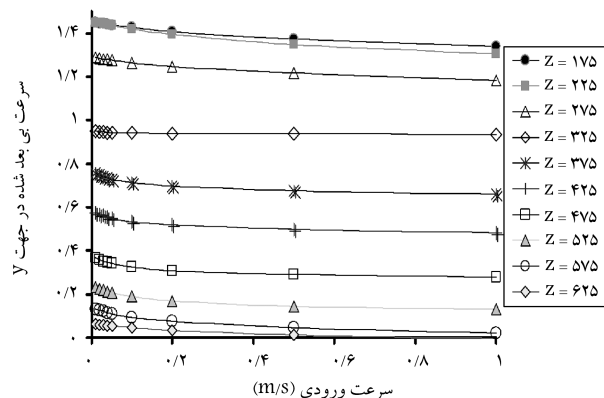
شکل ۳. تأثیر سرعت ورودی جریان و دیواره‌های شکستگی روی سرعت بی‌بعد شده‌ی مقاطع افقی در دامنه‌ی هندسی شکستگی.

بعد از ارتفاع‌های  $350 \mu\text{m}$  و  $400 \mu\text{m}$  و  $650 \mu\text{m}$  پیک کوچک مقیاسی در مقادیر سرعت بی‌بعد شده مشاهده می‌شود.

با افزایش سرعت ورودی جریان، بیشینه‌ی سرعت بی‌بعد شده کاهش می‌یابد به‌گونه‌ی که بیشینه‌ی سرعت بی‌بعد شده از مقدار  $1/47$  برای سرعت ورودی  $1 \text{ m/s}$  به  $1/34$  برای سرعت ورودی  $1 \text{ m/s}$  می‌رسد. همچنین ارتفاع مقطع مربوط به بیشترین سرعت بی‌بعد شده با افزایش سرعت ورودی کاهش یافته است به طوری که این ارتفاع از  $205 \mu\text{m}$  برای سرعت ورودی  $1 \text{ m/s}$  به ارتفاع



الف) نزدیک به دیواره صاف؛

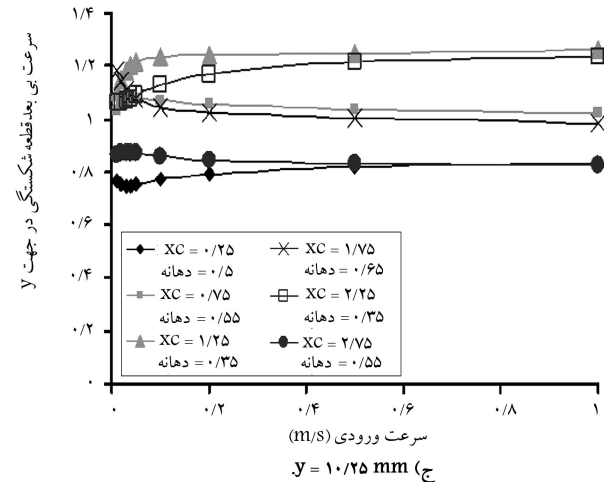
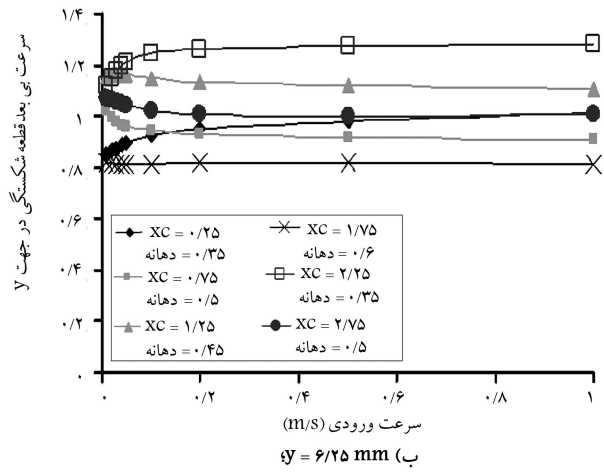
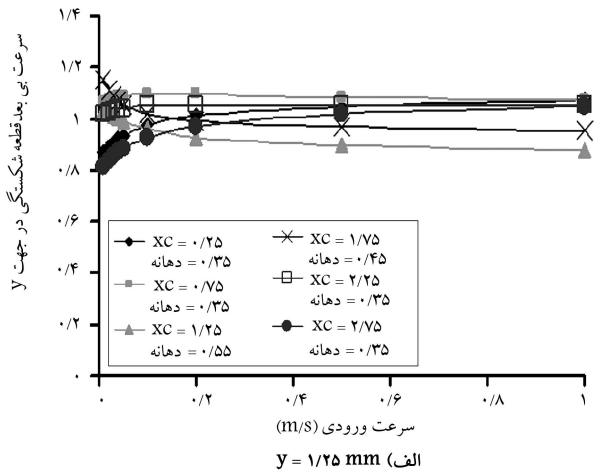


ب) نزدیک به دیواره ی زبر.

شکل ۴. روند تغییرات سرعت بی‌بعد شده برای مقاطع افقی.

دارد که سرعت آنها نسبت به نواحی با دهانه‌ی کوچک‌تر خیلی کم‌تر است (تقریباً سرعت این نواحی نصف سرعت در مسیر جریان است). این موضوع نشان می‌دهد که الزاماً در نواحی با دهانه‌ی بزرگ‌تر سرعت جریان بیشتر نیست، زیرا ممکن است این نواحی توسط نواحی بی‌دهانه‌ی کوچکی دارند محدود شده باشند. همچنین با افزایش سرعت ورودی جریان، اختلاف بین مقادیر بیشینه و کمینه‌ی سرعت در مقاطع افقی کاهش می‌یابد به طوری که قدر مطلق نسبت بین بیشینه و کمینه‌ی سرعت از  $15/2$  برای سرعت ورودی  $1 \text{ m/s}$  به مقدار  $4/83$  برای سرعت ورودی  $1 \text{ m/s}$  افزایش می‌یابد؛ در حقیقت با افزایش سرعت ورودی جریان از شدت جریان هدایت شده کاسته شده است. در شکل ۲ و در مقاطع افقی با ارتفاع  $525 \mu\text{m}$  در بعضی از نواحی، مقدار سرعت جریان منفی است که نشان‌گر هم‌راستا نبودن جهت جریان با جهت گرادیان فشار در این نواحی است. این موضوع نشان می‌دهد که در این نواحی جریان به صورت پیش‌پیشی است. با افزایش سرعت ورودی جریان بر شدت جریان‌های پیش‌پیشی افزوده می‌شود، به‌گونه‌ی که قدر مطلق نسبت کم‌ترین سرعت جریان در شکستگی به سرعت ورودی، از مقدار  $1/48$  برای سرعت ورودی  $1 \text{ m/s}$  به مقدار  $3/28$  برای سرعت ورودی  $1 \text{ m/s}$  می‌رسد. برای بررسی تأثیر دیواره‌های شکستگی بر مؤلفه‌ی  $y$  بردار سرعت، تعداد  $64$  مقطع افقی با فاصله‌ی  $10 \mu\text{m}$  در داخل دامنه‌ی هندسی شکستگی در نظر گرفته شده است. در هر مقطع افقی مقدار متوسط مؤلفه‌ی  $y$  بردار سرعت برای هر یک از سرعت‌های ورودی جریان محاسبه شده است. این مقادیر نسبت به سرعت ورودی بی‌بعد شده‌اند و نسبت به ارتفاع مقطع در شکل ۳ رسم شده‌اند. برای سرعت ورودی  $1 \text{ m/s}$  بیشترین سرعت بی‌بعد شده تقریباً در ارتفاع  $205 \mu\text{m}$  مشاهده می‌شود که مقدار آن تقریباً  $1/47$  است. سرعت بی‌بعد شده‌ی  $1/47$  برای این سرعت ورودی با بیشینه‌ی سرعت برآوردی با قانون مکعب (قانون مکعب بیشترین سرعت در مقطع افقی شکستگی را  $1/5$  برابر سرعت متوسط برآورد می‌کند) تقریباً برابر است.

مقادیر دهانه‌ی توزیع شده در شکستگی به صورت مضارب صحیحی از  $50 \mu\text{m}$  و از  $350 \mu\text{m}$  تا  $650 \mu\text{m}$  هستند، و در نتیجه بین مقاطع افقی متوالی قبل و



شکل ۵. روند تغییرات مقادیر سرعت بی بعد شده نسبت به سرعت ورودی جریان برای مقاطع قائم با فاصله از ورودی جریان.

نظر گرفته شده و مقادیر سرعت بی بعد شده ی قطعات شکستگی موجود در هر مقطع قائم نسبت به سرعت ورودی جریان در شکل ۵ (به ترتیب از الف تا ج) نشان داده شده اند. در مقطع قائم با فاصله  $1/25$  mm از ورودی جریان، با افزایش سرعت ورودی اختلاف بین مقادیر سرعت بی بعد شده برای قطعات شکستگی با دهانه  $350 \mu\text{m}$  کاهش می یابد و سرعت بی بعد شده این قطعات به سمت ۱ میل می کند.

$180 \mu\text{m}$  برای سرعت ورودی  $1 \text{ m/s}$  رسیده است. این موضوع نشان می دهد که با افزایش سرعت ورودی، بیشترین سرعت بی بعد شده به دیواره با زبری کم تر نزدیک تر شده و از دیواره با زبری بیشتر دور تر می شود؛ در نتیجه پروفیل (نیم رخ) سرعت نامتقارن تر شده و به سمت دیواره با زبری کم تر چوله می شود. در شکل الف و ب روند تغییرات سرعت بی بعد شده برای مقاطع افقی به طور دقیق تر بیان شده است. شکل الف تغییرات سرعت بی بعد شده روی مقاطع افقی نزدیک به دیواری صاف شکستگی را نسبت به تغییرات سرعت ورودی جریان و افزایش فاصله از دیواری شکستگی نشان می دهد. در مقاطع افقی نزدیک به دیواری پایینی شکستگی (دیواری صاف)، بر اثر افزایش سرعت ورودی جریان، مقادیر سرعت بی بعد شده روی مقاطع افقی به طور غیر خطی افزایش می یابد که با افزایش سرعت ورودی نرخ افزایش سرعت بی بعد شده روی مقاطع افقی کاهش می یابد.

در مقاطع افقی واقع شده در ارتفاع  $5 \mu\text{m}$  تا  $35 \mu\text{m}$ ، با افزایش فاصله از دیواری پایینی شکستگی، مقادیر سرعت بی بعد شده تقریباً به صورت خطی افزایش می یابد، و بنابراین نمودارهای مربوط به این مقاطع در شکل الف تقریباً با هم موازی اند. در بین مقاطع افقی با ارتفاع  $35 \mu\text{m}$  تا  $45 \mu\text{m}$  مقادیر سرعت بی بعد شده به طور ناگهانی افزایش یافته و نمودار سرعت بی بعد شده به طور ناگهانی به سمت بالا منتقل می شود که این تغییرات ناگهانی در سرعت بی بعد شده، برای تمامی شبیه سازی های انجام شده با سرعت های مختلف مشاهده می شود. این تغییرات ناگهانی در مقادیر سرعت بی بعد شده مربوط به ناحیه ی مرزی تشکیل شده روی دیواری پایینی شکستگی است که ناحیه ی مرزی در ارتفاع بین  $35 \mu\text{m}$  تا  $45 \mu\text{m}$  از بین رفته و در نتیجه سرعت بی بعد شده روی مقاطع افقی به طور ناگهانی افزایش می یابد.

شکل ب تغییرات سرعت بی بعد شده روی مقاطع افقی نزدیک به دیواری زبر شکستگی را نسبت به تغییرات سرعت ورودی جریان و افزایش فاصله از دیواری شکستگی نشان می دهد. با افزایش ارتفاع مقاطع افقی این مقاطع به دیواری بالایی شکستگی نزدیک تر می شوند و در این حالت، مقادیر سرعت بی بعد شده شدیداً کاهش می یابد. همچنین با افزایش سرعت ورودی جریان، سرعت بی بعد شده ی مقاطع افقی نزدیک به دیواری زبر شکستگی به صورت نزولی کاهش می یابد به گونه یی که مقدار سرعت بی بعد شده برای مقطع افقی  $625 \mu\text{m}$  در سرعت ورودی  $1 \text{ m/s}$  منفی است و سیال در این نواحی کاملاً در جهت مخالف گرادیان فشار حرکت می کند. این موضوع نشان می دهد که با افزایش سرعت ورودی جریان، بر شدت جریان های پیشی در شکستگی های زبر افزوده می شود. همچنین با افزایش سرعت ورودی جریان، دامنه ی جریان های پیشی افزایش می یابد و گردابه های جریان تا فاصله بیشتری از دیواره های شکستگی گسترده می شوند.

برای بررسی تأثیر دهانه روی دامنه ی سرعت، تعداد ۱۱ مقطع قائم با فاصله  $1 \text{ mm}$  از هم، در داخل دامنه ی هندسی شکستگی، و در فاصله  $1/25, 2/25, 3/25, 4/25, 5/25, 6/25, 7/25, 8/25, 9/25, 10/25, 11/25$  mm از مقطع ورودی جریان در نظر گرفته شده است. هر مقطع قائم از  $6$  مقدار متوسط مؤلفه  $y$  بردار سرعت برای هر یک از قطعات شکستگی موجود در مقطع قائم و برای سرعت های ورودی مختلف محاسبه شده است. مقدار متوسط مؤلفه ی بردار سرعت برای هر یک از قطعات شکستگی نسبت به سرعت متوسط جریان عبوری از مقطع قائم (کل دبی جریان عبوری تقسیم بر مساحت مقطع قائم) بی بعد شده اند. مقادیر سرعت بی بعد شده برای هر یک از قطعات شکستگی موجود در مقطع قائم و برای هر یک از سرعت های ورودی جریان محاسبه شده است. سه مقطع قائم با فاصله  $1/25, 2/25, 3/25$  mm از ورودی جریان در

بیشترین سرعت بی‌بعد شده در هر مقطع مربوط به قطعه‌ی شکستگی با دهانه‌ی  $45^\circ$  است و کم‌ترین سرعت بی‌بعد شده مربوط به قطعه‌ی شکستگی با بزرگ‌ترین دهانه‌ی موجود در مقطع قائم است.

برای بررسی تأثیر دهانه‌ی شکستگی بر دامنه‌ی سرعت جریان، اندازه‌ی دهانه‌ی هر قطعه‌ی شکستگی نسبت به متوسط مقادیر دهانه در هر مقطع قائم بی‌بعد شده است. پراکندگی مقادیر سرعت بی‌بعد شده‌ی قطعات شکستگی مربوط به تمامی ۱۱ مقطع قائم نسبت به اندازه‌ی دهانه‌ی بی‌بعد شده‌ی قطعه‌ی شکستگی و برای سرعت‌های ورودی  $1\text{ m/s}$ ،  $0.7\text{ m/s}$ ،  $0.5\text{ m/s}$  در شکل ۶ (به ترتیب الف تا ج) رسم شده‌اند. برای سرعت ورودی  $1\text{ m/s}$  مقادیر سرعت بی‌بعد شده پراکندگی زیادی دارند و از دست‌کم  $0.54$  تا  $1.42$  توزیع شده‌اند. با افزایش سرعت ورودی جریان مقادیر بیشینه و کمینه‌ی سرعت بی‌بعد شده به سمت ۱ نزدیک می‌شوند به‌گونه‌ی که کمینه و بیشینه‌ی مقادیر سرعت بی‌بعد شده برای سرعت ورودی  $1\text{ m/s}$  به ترتیب به  $0.58$  و  $1.37$  می‌رسد. همچنین مقایسه‌ی شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت ورودی جریان، علاوه بر کاهش پراکندگی مقادیر سرعت بی‌بعد شده، نوع پراکندگی از «نامنظم» به «منظم» تبدیل می‌شود. در مقادیر بزرگ سرعت ورودی جریان، با افزایش دهانه مقدار سرعت بی‌بعد شده کاهش می‌یابد که این موضوع در شکل ۶ ج قابل مشاهده است.

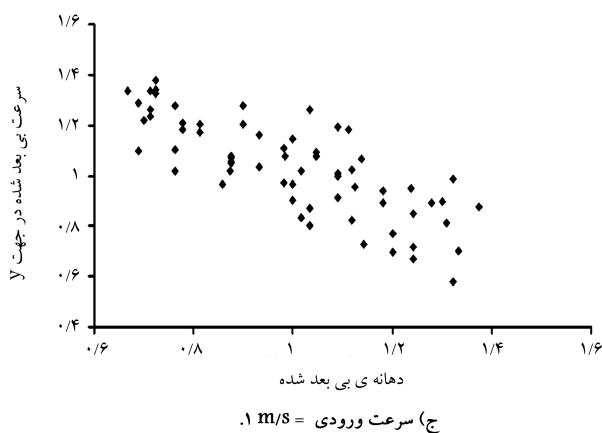
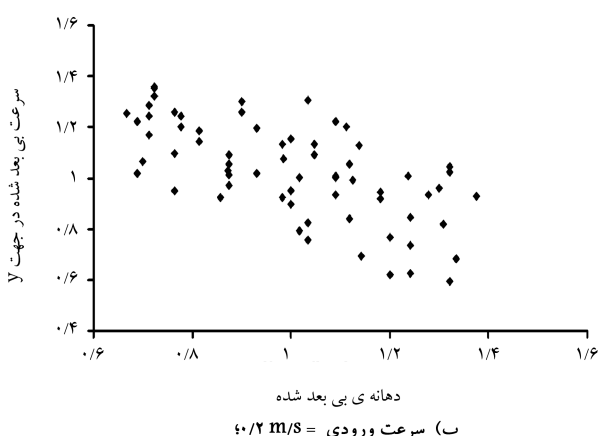
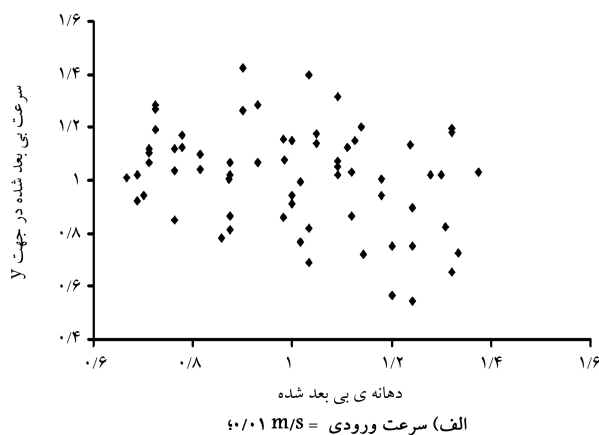
## ۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رفتار جریان آشفته‌ی سیال درون شکستگی سه‌بعدی با یک دیواره‌ی زبر، به روش حجم محدود برای محدوده‌ی وسیعی از دبی جریان حجمی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر زبری دیواره روی رفتار جریان سیال درون شکستگی در مقیاس ماکرو، با استفاده از میانگین‌گیری مقادیر سرعت جریان در مقیاس میکرو روی مقاطع مختلف افقی و قائم در دامنه‌ی هندسی شکستگی ارزیابی شده است.

دامنه‌ی هندسی استفاده شده برای شبیه‌سازی جریان به صورت یک سطح صاف ایده‌آل و سطحی با زبری زیاد است. استفاده از یک سطح صاف این امکان را فراهم می‌کند که بتوان تأثیر زبری شکستگی روی رفتار جریان را با مشکلات کم‌تری نسبت به شکستگی با دو سطح زبر بررسی و تحلیل کرد. البته باید توجه کرد که شکستگی‌های واقعی از دو سطح زبر تشکیل شده‌اند و بنابراین برای تحلیل‌های دقیق‌تر رفتار جریان در شکستگی‌ها، باید هر دو سطح شکستگی به صورت زبر لحاظ شوند. همچنین به دلیل محدودیت در قدرت محاسبات، ابعاد شکستگی مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان نسبت به ابعاد شکستگی‌های واقعی بسیار کوچک‌تر است و تأثیر عوامل مختلفی مثل تأثیر مقیاس شکستگی و انحنا شکستگی در نظر گرفته نشده است.

نتایج مطالعات انجام شده پیرامون رفتار جریان درون شکستگی‌های سنگی توسط محققین مختلف [۱۷، ۱۹، ۲۰] نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز یا دبی جریان عبوری از شکستگی، تأثیر رفتار غیرخطی جریان مشهودتر می‌شود و عدد رینولدز بحرانی در بسیاری از مطالعات در محدوده‌ی  $10$  تا  $15$  پیشنهاد شده است. [۱۷، ۲۰] در نتیجه با توجه به مقادیر عدد رینولدز محاسبه شده در این مطالعه روش شبیه‌سازی جریان آشفته انتخاب شده است.

در مقادیر بزرگ عدد رینولدز شتاب‌های فضایی ناشی از انقباض و انبساط جریان درون شکستگی به دلیل تغییرات سطح مقطع شکستگی در دامنه‌ی جریان



شکل ۶. پراکندگی مقادیر سرعت بی‌بعد شده‌ی قطعات شکستگی مربوط به تمامی ۱۱ مقطع قائم نسبت به اندازه‌ی دهانه‌ی بی‌بعد شده‌ی قطعه‌ی شکستگی.

همچنین برای قطعات شکستگی با دهانه‌ی  $55^\circ$  و  $45^\circ$  روند تغییرات سرعت بی‌بعد شده با افزایش سرعت ورودی جریان به صورت نزولی است. در این مقطع کم‌ترین سرعت بی‌بعد شده، در قطعه‌ی با دهانه‌ی  $55^\circ$  با مقدار سرعت بی‌بعد شده‌ی  $0.87$  برای سرعت ورودی  $1\text{ m/s}$  مشاهده می‌شود. در هر سه مقطع قائم (شکل ۵) به غیر از دو قطعه‌ی جانبی (قطعات مربوط به  $xc = 0.25\text{ mm}$  و  $xc = 2.75\text{ mm}$ ) در سرعت‌های ورودی بزرگ‌تر از  $0.2\text{ m/s}$ ، با افزایش دهانه‌ی قطعه‌ی شکستگی، مقادیر سرعت بی‌بعد شده کاهش می‌یابد به‌گونه‌ی که

پیچشی در شکستگی‌های زبر افزوده می‌شود. همچنین با افزایش سرعت ورودی جریان، دامنه‌ی جریان‌های پیچشی افزایش یافته و گردابه‌های جریان تا فاصله‌ی بیشتری از دیواره‌های شکستگی گسترش می‌یابند. با توسعه‌ی گردابه‌های جریان در دامنه‌ی هندسی شکستگی به دلیل افزایش سرعت ورودی جریان، آرایش جدیدی از جریان هدایت‌شده درون شکستگی مشاهده می‌شود. در مقادیر اندک سرعت ورودی جریان، مقادیر سرعت بی‌بعدشده‌ی قطعات شکستگی دارای پراکندگی است؛ با افزایش سرعت ورودی جریان، علاوه بر کاهش پراکندگی مقادیر سرعت بی‌بعدشده‌ی قطعات شکستگی، نوع پراکندگی از حالت «نامنظم» به «منظم» تبدیل می‌شود. به طوری که در مقادیر بزرگ سرعت ورودی جریان، با افزایش دهانه از مقدار سرعت بی‌بعدشده کاسته می‌شود.

ظاهرشده و تأثیر اینرسی در رفتار جریان مشهود می‌شود. در این حالت جریان‌های پیچشی و گردابه‌ها قابل توجه و مهم می‌شوند و انتقال انرژی در جهت مخالف با گرادبان فشار ظاهر می‌شود. با نزدیک شدن مقاطع افقی به دیواره‌ی زبر شکستگی، مقادیر سرعت بی‌بعد شده شدیداً کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت ورودی جریان، بیشترین سرعت بی‌بعدشده به دیواره با زبری کم‌تر نزدیک‌تر و از دیواره‌ی با زبری بیشتر دور می‌شود؛ در نتیجه پروفیل سرعت نامتقارن‌تر شده و به سمت دیواره‌ی با زبری کم‌تر چوله می‌شود. همچنین با افزایش سرعت ورودی جریان، سرعت بی‌بعدشده مقاطع افقی نزدیک به دیواره‌ی زبر شکستگی به صورت نزولی کاهش می‌یابد و سیال در این نواحی کاملاً در جهت مخالف گرادبان فشار حرکت می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش سرعت ورودی جریان، بر شدت جریان‌های

## پانویس

1. no-slip
2. Reynolds-averaged navier-stokes
3. inlet velocity boundary condition
4. turbulence intensity
5. out flow
6. normalized

## منابع

1. Elsworth, D. and Goodman, R.E. "Characterization of rock fissure hydraulic conductivity using idealized wall roughness profiles", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **23**, pp. 233-243 (1986).
2. Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A. "Steady state flow in rigid networks of fractures", *Water Res. Res.*, **10**, pp. 328-335 (1974).
3. Neuzil, C.E. and Tracy, J.V. "Flow through fractures", *Water Res. Res.*, **17**(1), pp. 191-199 (1981).
4. Moreno, L.; Neretnieks, I. and Eriksen, T. "Analysis of some laboratory tracer runs in natural fissures", *Water Res. Res.*, **2**(7), pp. 951-958 (1985).
5. Silliman, S.E. "An interpretation of the difference between aperture estimates derived from hydraulic and tracer tests in a single fracture", *Water Res. Res.*, **25**, pp. 2275-2283 (1989).
6. Walsh, J.B.; Brown, S.R. and Durham, W.B. "Effective media theory with spatial correlation for flow in a fracture", *Journal of Geophysical Research*, **102**(22), pp. 587-594 (1997).
7. Tsang, Y.W. and Witherspoon, P.A. "Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress", *Journal of Geophysical Research*, **86**, pp. 9287-9298 (1981).
8. Renshaw, C.E. "On the relationship between mechanical and hydraulic apertures in rough-walled fractures", *Journal of Geophysical Research*, **100**(B12), pp. 629-636 (1995).
9. Brown, S.R. "Fluid flow through rock joints: The effect of surface roughness", *Journal of Geophysical Research*, **92**(B2), pp. 1337-1347 (1987).
10. Zimmerman, R.W.; Kumar, S. and Bodvarsson, G.S. "Lubrication theory analysis of the permeability of rough-walled fractures", *J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **28**, pp. 325-331 (1991).
11. Thompson, M.E. and Brown, S.R. "The effect of anisotropic surface roughness on flow and transport in fracture", *Journal of Geophysical Research*, **96**(B13), pp. 923-932 (1991).
12. Ge, S. "A governing equation for fluid flow in rough fractures", *Water Res. Res.*, **33**(1), pp. 53-61 (1997).
13. Koyama, T.; Li, B.; Jiang, Y. and Jing, L. "Numerical simulations for the effects of normal loading on particle transport in rock fractures during shear", *J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Article in press.
14. Brown, S.R.; Stockman, H.W. and Reeves, S.J. "Applicability of the Reynolds equation for modeling fluid flow between rough surfaces", *Geophys. Res. Lett.*, **22**(18), pp. 2537-2540 (1995).
15. Nicholl, M.; Rajaram, J.H.; Glass, R. and Detwiler, R. "Saturated flow in a single fracture: Evaluation of the Reynolds equation in measured aperture field", *Water Res. Res.*, **35**(11), pp. 3361-3373 (1999).
16. Yeo, I.W. and Ge, S. "Applicable range of the Reynolds equation for fluid flow in a rock Fracture", *Geosciences Journal*, **9**(4), pp. 347-352, (2005).
17. Oron, A.P. and Berkowitz, B. "Flow in rock fractures: The local cubic law assumption reexamined", *Water Res. Res.*, **34**(28), pp. 11-24 (1998).
18. Zimmerman, R.W. and Bodvarsson, G.S. "Hydraulic conductivity of rock fractures", *Transport Porous Media*, **23**, pp. 1-30 (1996).
19. Koyama, T.; Neretnieks, I. and Jing, L. "A numerical study on differences in using Navier-stokes and Reynolds

- equations for modeling the fluid flow and particle transport in single rock fractures with shear”, *J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **45**, pp. 1082-1101 (2008).
20. Zimmerman, R.W.; Al-Yaarubi, A.H.; Pain, C.C. and Grattoni, C.A. “Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures”, *J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **41**(3), pp. 163-169 (2004).
  21. Nazridoust, K.; Ahmadi, G. and Smith, D.H. “A new friction factor correlation for laminar, single-phase flows through rock fractures”, *Journal of Hydrology*, pp. 315-329 (2006).
  22. Brush, D. and Thomson, N.R. “Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-stokes, stokes, and local cubic law simulations”, *Water Res. Res.*, **39**(4), pp. 1085-1099 (2003).
  23. Bear, J.; Tsang, C.F. and De Marsily, G., *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*, Academic Press: San Diego (1993).