

## اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی جریان سیال عبوری از شکستگی‌های سنگی زبر با استفاده از مدلسازی فیزیکی مبتنی بر چاپ سه‌بعدی

احمد رحمانی شهرکی<sup>۱</sup>؛ علیرضا باغبانان<sup>۲\*</sup>؛ امین ازهری<sup>۳</sup>؛ علی عسکریور کبیر<sup>۴</sup>؛ امیرحسین واحدی<sup>۴</sup>؛ سینا میرزاییگی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترای مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۴- کارشناسی‌ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

([bagh110@iut.ac.ir](mailto:bagh110@iut.ac.ir)) \*نویسنده مسئول

### چکیده

اعتبارسنجی مدل‌های عددی، ابزاری کلیدی برای استفاده در تحلیل‌های پیشرفته مانند جریان‌های غیرخطی و شبکه‌های پیچیده شکستگی محسوب می‌شود. مدل‌سازی‌های عددی مبتنی بر قانون مکعب، در شبیه‌سازی اثرات زبری سطح و تغییرات فشار هیدرولیکی دقت کافی را ندارند. فلذا تدقیق و تطبیق آنها با نتایج آزمایشگاهی دقیق و داده‌های تجربی ضروری است. در این زمینه تکرارپذیری نمونه‌های مورد آزمایش و تطبیق کامل نمونه‌های آزمایش عددی و تجربی در شرایط مرزی مختلف نیازمند چاپ و کپی‌سازی با دقت بالا است. در این مطالعه، نمونه‌های شکستگی با زبری‌های کنترل‌شده ( $JRC=0$ )،  $JRC=20$ ،  $JRC=10$ ) به‌وسیله چاپ سه‌بعدی تولید شدند. آزمایش‌ها تحت فشارهای هیدرولیکی مختلف انجام شد و نرخ جریان و توزیع فشار ثبت گردید. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار  $STAR-CCM+$  و روش حجم محدود برای حل معادلات ناویر-استوکس انجام شد. نتایج نشان داد داده‌های عددی و آزمایشگاهی با خطای کمتر از ۵٪ مطابقت دارند. افزایش زبری سطح موجب کاهش نرخ جریان شد؛ به‌عنوان نمونه، در فشار ۱۹۵ پاسکال، دبی از ۵۲۳/۵۱ میلی‌لیتر بر دقیقه ( $JRC=0$ ) به ۴۱۸/۸۰۸ میلی‌لیتر بر دقیقه ( $JRC=20$ ) کاهش یافت. همچنین، افزایش فشار هیدرولیکی به‌طور خطی نرخ جریان را افزایش داد؛ برای  $JRC=10$ ، دبی از ۴۸۱/۶۲۹ میلی‌لیتر بر دقیقه در ۱۹۵ پاسکال به ۱۰۶۲/۸۳۹۲ میلی‌لیتر بر دقیقه در ۴۸۹ پاسکال رسید. این پژوهش نشان داد که چیدمان آزمایشگاهی طراحی‌شده قادر به اعتبارسنجی دقیق مدل‌های عددی است و این مدل‌های عددی و ستاپ آزمایشگاهی را برای تحلیل‌های پیشرفته‌تر، نظیر جریان‌های غیرخطی و شکستگی‌های متقاطع می‌توان استفاده کرد.

واژگان کلیدی: شکستگی زبر، چاپ سه‌بعدی، حل عددی جریان سیال، نفوذپذیری آزمایشگاهی، معادلات ناویر-استوکس

۱- مقدمه

مطالعه جریان سیال در محیط‌های با شکستگی‌های سنگی یکی از موضوعات اساسی در علوم زمین، مهندسی ژئومکانیک و هیدرولوژی است. شکستگی‌های سنگی، به دلیل نقش مهمی که در انتقال و توزیع سیالات در محیط‌های سنگی ایفا می‌کنند، به‌عنوان مسیرهای اصلی جریان شناخته می‌شوند. این شکستگی‌ها نه تنها در مدیریت منابع طبیعی مانند آب‌های زیرزمینی و نفت و گاز اهمیت دارند، بلکه در پروژه‌های زیست‌محیطی و صنعتی نظیر ذخیره‌سازی زباله‌های هسته‌ای، سیستم‌های ژئوترمال، و دفن دی‌اکسیدکربن نیز نقش کلیدی دارند [۱-۴]. با این حال، ویژگی‌های پیچیده شکستگی‌ها نظیر زبری سطوح، بازشدگی سطوح و هندسه شکستگی‌ها، مدل‌سازی دقیق جریان سیال را به یک چالش تبدیل کرده است.

مدل‌سازی عددی جریان سیال در شکستگی‌های سنگی یکی از ابزارهای رایج برای تحلیل و پیش‌بینی رفتار سیال است. این مدل‌ها معمولاً بر اساس روش‌هایی مانند قانون مکعب یا معادلات ناویر-استوکس بنا شده‌اند که رفتار هیدرولیکی جریان در شکستگی‌ها را شبیه‌سازی می‌کنند. با این حال، روشی همچون قانون مکعب با فرض سطوح صاف و موازی نمی‌تواند رفتار جریان را در شکستگی‌های زبر و پیچیده به‌درستی پیش‌بینی کند. اثرات غیرخطی ناشی از زبری سطوح و تغییرات فشار در مدلی مانند داریسی نادیده گرفته می‌شوند، درحالی‌که این عوامل نقش مهمی در تعیین مسیرهای جریان و نرخ انتقال سیال دارند [۵-۷]. در نتیجه پژوهش‌های اخیر بر روش عددی مبتنی بر معادلات ناویر-استوکس متمرکز شده‌اند [۸-۱۰]. به دلیل پیچیدگی‌های مدل‌سازی معادلات ناویر-استوکس و اهمیت شرایط اولیه و مرزی در نتایج، نیاز به اعتبارسنجی در شرایط واقعی و آزمایشگاهی است. بنابراین، برای افزایش دقت مدل‌سازی‌ها، اعتبارسنجی مدل‌های عددی با داده‌های آزمایشگاهی ضروری است.

یکی از عوامل کلیدی که بر رفتار هیدرولیکی شکستگی‌ها تأثیر می‌گذارد، زبری سطح است. مطالعات نشان داده‌اند که زبری سطح می‌تواند الگوهای جریان را تغییر داده و باعث ایجاد انحراف از رفتار داریسی و ایجاد جریان غیرخطی شود [۷، ۱۱-۱۳]. همچنین، پژوهش‌های متعددی به بررسی رابطه

بین بازشدگی هیدرولیکی و بازشدگی فیزیکی پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که تغییرات در بازشدگی می‌تواند بر نرخ جریان و مسیرهای ترجیحی جریان تأثیرگذار باشد [۱۴-۱۶].

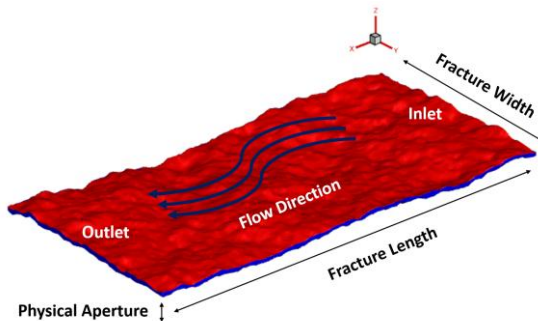
باتوجه به نیاز به اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی، دسترسی به داده‌های آزمایشگاهی دقیق و تکرارپذیر ضروری است. فناوری چاپ سه‌بعدی به‌عنوان یک ابزار نوآورانه در مطالعه جریان سیال در شکستگی‌های سنگی، پیشرفت‌های قابل توجهی را ایجاد کرده است. این فناوری امکان بازتولید دقیق هندسه پیچیده شکستگی‌های طبیعی را فراهم کرده و ابزارهای جدیدی برای بررسی تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی ارائه داده است. مدل‌های چاپ سه‌بعدی با استفاده از روش‌هایی مانند فتوگرامتری اعتبارسنجی می‌شوند تا دقت بالایی در بازنمایی هندسه شکستگی‌ها تضمین شود [۱۷-۲۰]. این رویکرد نه تنها محدودیت‌های نمونه‌سازی سنتی را رفع کرده، بلکه امکان مطالعه دقیق‌تر ویژگی‌هایی مانند تراوش، نفوذپذیری و انتقال حرارت در شکستگی‌ها را نیز فراهم آورده است [۲۱، ۲۲].

تحقیقات نشان می‌دهد که با استفاده از مدل‌های چاپ سه‌بعدی، تأثیر زبری سطوح شکستگی بر جریان سیال به شکل کمی‌تری قابل بررسی است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که افزایش زبری و تعداد شکستگی‌ها باعث پیچیدگی مسیر جریان و رفتار غیرخطی آن، مطابق قانون فورچهایمر، می‌شود [۱۸، ۲۳]. همچنین، این فناوری در شبیه‌سازی انتقال حرارت، به‌ویژه در کاربردهای انرژی زمین‌گرمایی، نشان داده که سطوح زبر می‌توانند بهبود قابل توجهی در کارایی انتقال حرارت ایجاد کنند [۲۴، ۲۵].

نتایج بسیاری از پژوهش‌ها به دلیل عدم وجود چیدمان آزمایشگاهی مناسب و دقیق و ناتوانی در تولید شکستگی‌هایی با سطوح زبر قابل کنترل، عدم قطعیت بالایی دارند. هدف از کنترل سطوح زبر، تولید سطوح به گونه‌ای است که میزان ناهمواری و زبری سطح توسط مؤلفه‌هایی همچون ابعاد فراکتال قابل کنترل باشد و به‌صورت هم‌زمان در تحلیل عددی و آزمایشگاهی استفاده شوند.

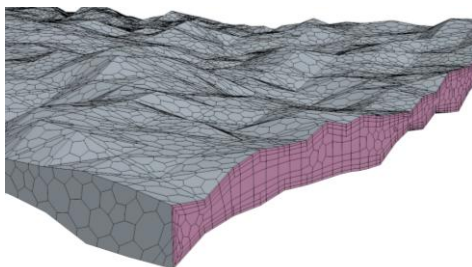
طراحی و اجرای آزمایش‌های فیزیکی با امکان جریان سیال و هندسه شکستگی، راهکار مورد نیاز برای اعتبارسنجی می‌باشد. در این پژوهش، با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی، نمونه‌هایی با هندسه دقیق و زبری کنترل‌شده برای

میلی‌متر در نظر گرفته شد. این مقدار به عنوان میانگین بازشدگی فیزیکی شکستگی تعریف شده و نه به عنوان بازشدگی هیدرولیکی. با توجه به وجود زبری سطحی و توزیع ناهمگن نقاط تماس بین دیواره‌های شکستگی، گشودگی موضعی در امتداد صفحه شکستگی متغیر بوده و مقادیر محلی ممکن است به‌طور قابل توجهی از این مقدار میانگین انحراف داشته باشند. با این حال، انتخاب مقدار میانگین برای بازشدگی فیزیکی به عنوان یک پارامتر ورودی پایه در شبیه‌سازی‌ها، امکان مقایسه و تفسیر بهتر نتایج را فراهم می‌سازد. دامنه با استفاده از مش‌های شش‌وجهی (*Hexahedral*) مش‌بندی شد و در نواحی حساس به تغییرات جریان، مانند مناطقی با تغییرات شدید بازشدگی، تراکم مش افزایش یافت تا اثرات جزئی زبری به‌خوبی مدل‌سازی شود. علاوه بر این، به‌منظور بهبود دقت شبیه‌سازی در نزدیکی سطوح زبر دیواره‌ها، از مش لایه مرزی بهره گرفته شد (شکل ۲). استفاده از این نوع مش امکان مدل‌سازی دقیق‌تر گرادیان‌های سرعت و اثرات لزجت در مجاورت دیواره‌های ناهموار را فراهم کرده و موجب ارتقاء کیفیت تحلیل جریان در نواحی نزدیک به سطح شکستگی‌ها می‌شود.



شکل ۱: هندسه شکستگی زبر و مولفه‌های هندسی و

#### مدلسازی جریان



شکل ۲: نمونه مش اعمال شده جهت مدل‌سازی دقیق تر

#### سطوح زبر و دیواره‌ها

شبیه‌سازی شکستگی‌های سنگی تولید شده‌اند. این روش، امکان بررسی تأثیر پارامترهایی مانند زبری سطح، بازشدگی هیدرولیکی، فشار جانبی و تغییرات تنش بر رفتار جریان سیال در شکستگی‌ها را برای مطالعات آینده فراهم می‌کند. نمونه‌ها با تمرکز بر قابلیت کنترل زبری سطوح چاپ و تولید میشوند. داده‌های آزمایشگاهی حاصل، شامل نرخ جریان و توزیع فشار، به‌عنوان مرجعی برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی استفاده شده‌اند. این ترکیب داده‌های تجربی و مدل‌سازی عددی، دیدگاهی جامع‌تر از عوامل مؤثر بر رفتار هیدرولیکی شکستگی‌ها ارائه داده و به بهبود مدل‌ها و توسعه ابزارهای پیشرفته برای تحلیل این ساختارها کمک می‌کند.

#### ۲- حل عددی

در این مطالعه، رفتار جریان سیال آرام در شکستگی‌های زبر سنگی با استفاده از روش‌های عددی و نرم‌افزار *STAR-CCM+* شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی بر مبنای حل معادلات ناویر-استوکس، که توصیف‌کننده بقای جرم و مومنتوم هستند، انجام شده است. معادله بقای جرم برای سیال تراکم‌ناپذیر به صورت  $\nabla \cdot u = 0$  بیان می‌شود که در آن  $u$  بردار سرعت است. معادله بقای مومنتوم نیز به شکل رابطه ۱ است.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + f \quad (1)$$

که در آن  $\rho$  چگالی،  $P$  فشار،  $\mu$  لزجت دینامیکی و  $f$  نیروهای حجمی هستند. این معادلات برای جریان آرام و لایه‌ای، با فرض نیوتنی بودن سیال و عدم تراکم‌پذیری، استفاده شده‌اند. برای حل این معادلات در هندسه پیچیده شکستگی‌های زبر، از روش حجم محدود (*FVM*) بهره گرفته شد. در این روش، دامنه محاسباتی به حجم‌های کنترل تقسیم شد و معادلات به صورت انتگرالی برای هر حجم کنترل نوشته شدند. گسسته‌سازی مکانی با استفاده از طرح عددی مرکزی (*Central Differencing*) و گسسته‌سازی زمانی با یک طرح ضمنی مرتبه اول انجام گرفت. این روش، به دلیل پایداری بالا و توانایی حفظ مقادیر بقای جرم و مومنتوم، به‌طور گسترده در دینامیک سیالات محاسباتی (*CFD*) به کار گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی هندسه، ابتدا شکستگی با استفاده از نرم‌افزار *CAD* طراحی شد. این هندسه شامل دهانه بازشدگی (*AP*)، عرض (*W*)، طول (*L*) و متوسط زبری سطح (*JRC*) بود (شکل ۱). در این مطالعه، مقدار دهانه بازشدگی شکستگی برابر با ۱

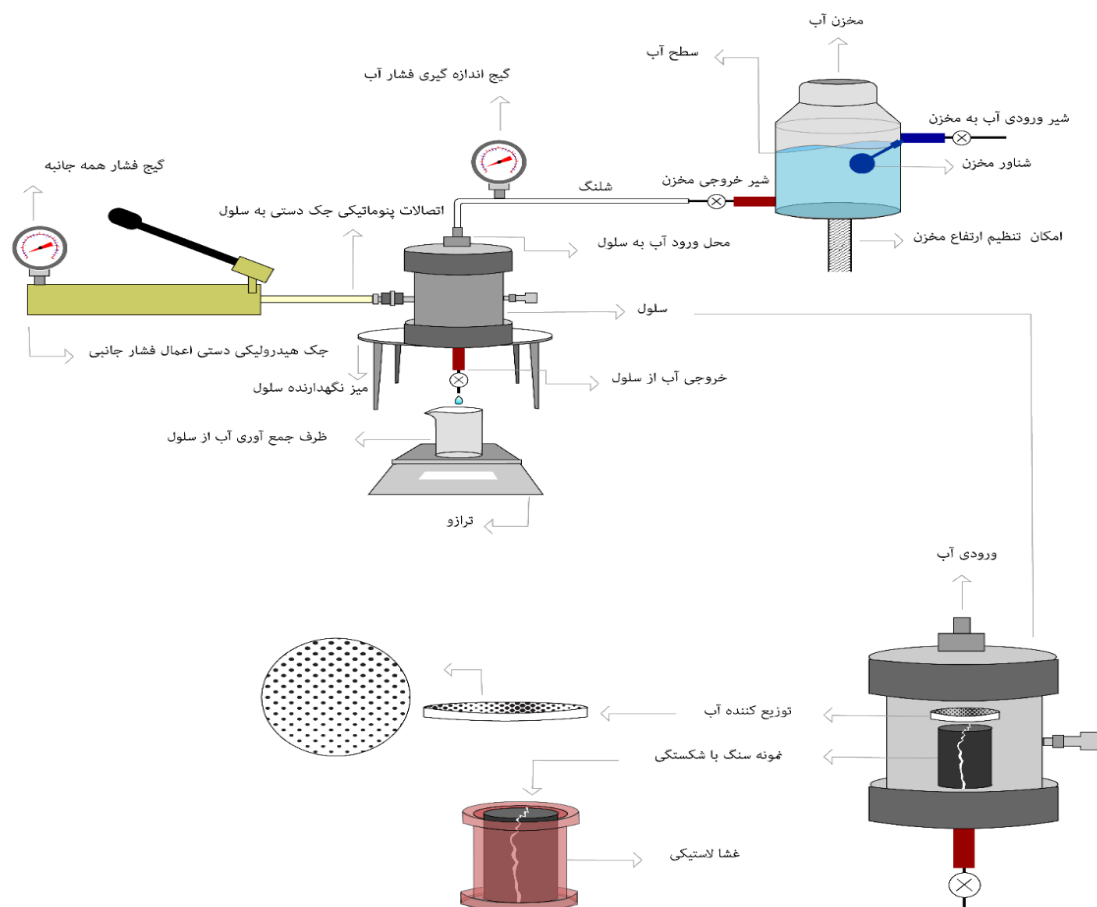
و اثرات زبری سطح و تغییرات هندسی شکستگی بر رفتار جریان بررسی گردید. همچنین، تأثیر فشار ورودی بر سایر پارامترهای دینامیکی تحلیل شد. این رویکرد عددی، بدون نیاز به ساده‌سازی‌هایی مانند قانون مکعب، امکان بررسی دقیق رفتار جریان در شکستگی‌های زبر و پیچیده را فراهم آورد و به بهبود درک رفتار دینامیک سیالات در این هندسه‌ها کمک کرد.

چیدمان عملیات آزمایشگاهی جهت اعتبارسنجی جهت اعتبارسنجی حل عددی، تجهیزات آزمایشگاهی متناسب با امکانات موجود طراحی و حل عددی مشابه با شرایط مرزی موجود در نمونه آزمایشگاهی حل شد. چیدمان آزمایشگاهی در این بخش به صورت گرافیکی در شکل ۳ نمایش داده شده که به تفکیک و با جزئیات نیز در زیر شرح داده شده است.

شرایط مرزی نیز به گونه‌ای تعریف شدند که بازتاب‌دهنده شرایط واقعی جریان باشند. مرز ورودی به صورت "Inlet Pressure" با فشار ورودی مشخص ( $P_{in}$ ) و مرز خروجی به صورت "Pressure Outlet" با فشار خروجی ( $P_{out}=0$ ) تعریف شد. همچنین، شرط بدون لغزش ( $u=0$ ) برای دیوارها اعمال گردید.

برای حل معادلات گسسته شده، از روش جفت سازی ( $Coupled$ ) برای جفت‌سازی فشار و سرعت استفاده گردید. این روش با تکرارهای متوالی، اصلاحات لازم را برای میدان‌های فشار و سرعت اعمال می‌کند تا همگرایی به دقت مطلوب برسد. حل گر عددی از تکنیک گرادینان مزدوج ( $Conjugate Gradient$ ) و پیش‌شرط‌گذاری ( $Preconditioning$ ) برای حل سیستم‌های خطی بزرگ بهره برد.

پس از همگرایی، توزیع سرعت و فشار در دامنه استخراج شد



شکل ۳: فرآیند آزمایشگاهی تعیین نفوذپذیری در نمونه حاوی شکستگی به صورت گرافیکی

هندسه صاف و موازی دقیقاً همین مقدار است و برای هندسه های زبر، برابر با بازشدگی فیزیکی شکستگی است.

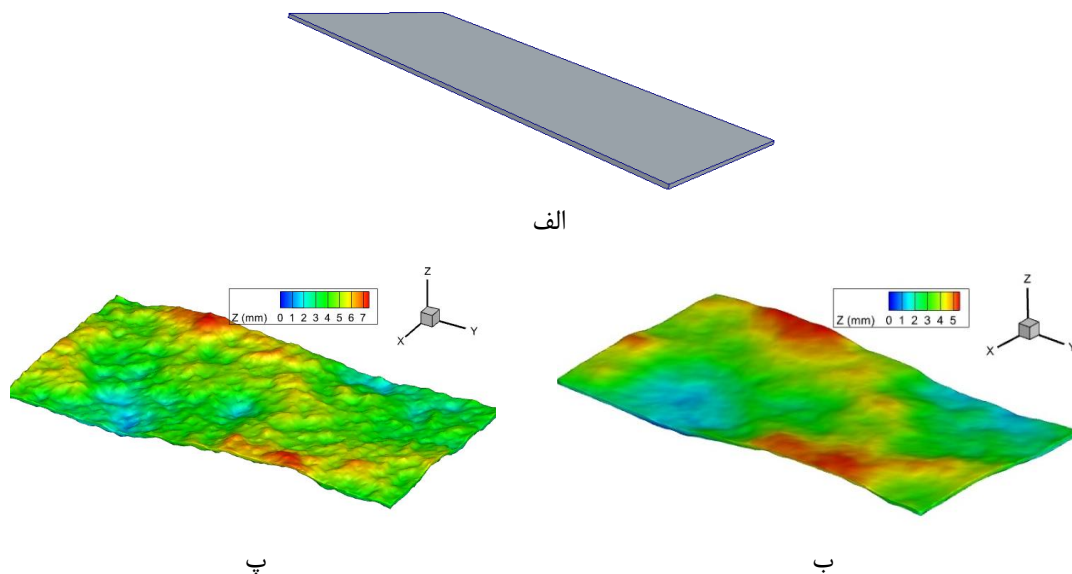
ب- چاپ سه بعدی هندسه ها با استفاده چاپگر سه بعدی (شکل ۵). فرایند چاپ سه بعدی مطابق با مطالعه رحمانی شهرکی و همکاران (۲۰۲۵) [۲۰] صورت گرفت. فایل STL به نرم‌افزار PrusaSlicer وارد شد و سپس با استفاده از دستگاه "SIZA 5 Eco" که از فناوری چاپ فیوژن انتخابی لایه (FFF) و اکستروژن مستقیم فیلامنت پلی لاکتیک اسید (PLA) با قطر نازل ۲۰۰ میکرون و دقت لایه‌گذاری ۶۰ میکرون بهره می‌برد، چاپ صورت گرفت. تنظیمات چاپ به گونه‌ای تنظیم شد که بهترین سطوح زبر با دقت بالا حاصل شود. جهت حرکت نازل و محور حرکت صفحه چاپگر از عوامل کلیدی در دقت هندسه چاپ‌شده بودند. برای دستیابی به هندسه شکستگی مطلوب، یکی از وجوه هندسه به‌عنوان جهت چاپ در راستای z انتخاب شد. پس از اسلایس‌بندی فایل STL، اطلاعات مربوط به زمان و میزان فیلامنت مورد نیاز برای چاپ استخراج شده و به‌صورت فایل G-code به چاپگر ارسال گردید.

الف- طراحی و سه بعدی سازی سه هندسه با درجات زبری مختلف شامل سطوح هموار و صاف معادل زبری ۰، سطح با زبری متوسط معادل زبری ۱۰ و سطح کاملاً زبر و ناهموار معادل زبری ۲۰ مطابق با شکل ۴. از نرم‌افزار SynFrac برای تولید سطوح شکست سه بعدی بر اساس مدل‌های فراکتالی و روش AUPG برای شبیه‌سازی زبری استفاده شد. اعداد تصادفی با روش L'ecuyer تولید و پروفایل‌هایی با ابعاد فراکتالی مختلف اجرا گردید. شاخص‌های زبری  $Z_2$  و JRC با استفاده از روابط رایج محاسبه شدند.

$$Z_2 = \left[ \frac{1}{L} \int_0^L \left( \frac{dz}{dx} \right)^2 dx \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$JRC = (64.22 \cdot Z_2) - 2.31 \quad (3)$$

ابرنقاط سطوح ایجادشده توسط نرم افزار Rhino به حجم های سه بعدی تبدیل شدند. ابعاد طول و عرض هندسه متناسب با ابعاد سلول هوک موجود در آزمایشگاه است. ۵۴ میلی‌متر به‌عنوان قطر نمونه که در اینجا معادل عرض شکستگی است و ۱۱۰ میلی‌متر به‌عنوان ارتفاع نمونه استوانه‌ای که در اینجا معادل طول شکستگی است. همانطور که قبلاً اشاره شد مقدار بازشدگی شکستگی ها ۱ میلی متر در نظر گرفته شد که برای

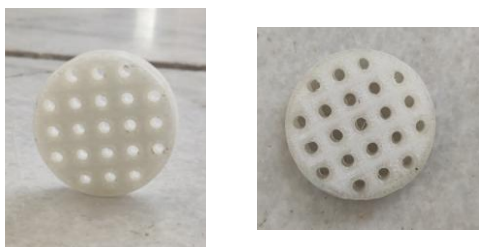


شکل ۴: سطوح سه‌بعدی با درجات زبری متفاوت. الف) سطوح موازی و هموار، ب) زبری متوسط معادل  $JRC=10$ ، پ) زبری بالا معادل  $JRC=20$ .

سلول می‌شود (شکل ۷). با توجه به ساختار هندسی نمونه‌های ما که صفحه شکستگی با بازشدگی نسبتاً بالایی بر روی سطح تماس نمونه با مجرای ورودی آب است، به جهت توزیع بهتر آب در کانال شکستگی، از یک تقسیم‌کننده و توزیع‌کننده سیال مطابق با شکل ۸ استفاده کردیم. تقسیم‌کننده به صورت مشبک و استوانه‌ای با قطر مشابه به نمونه و ضخامت ۵ میلی‌متری طراحی و توسط چاپگر سه‌بعدی چاپ شد. جریان ورودی توسط این تقسیم‌کننده مشبک در کل سطح تماس بالایی نمونه پخش می‌شود و منجر به کانالیزه شدن در بخش خاصی از شکستگی نمی‌شود و سیال به صورت یکسان وارد کانال شکستگی می‌شود.



شکل ۷: غشا لاستیکی سلول هوک جهت اعمال فشار جانبی به نمونه



شکل ۸: قطعه چاپ شده توسط چاپگر سه‌بعدی به‌عنوان تقسیم‌کننده و پخش‌کننده آب بر روی همه سطح نمونه و شکستگی جهت جلوگیری از ایجاد کانالیزه شدن پیش از توزیع سیال در شکستگی.



شکل ۵: نمونه قطعات چاپ شده برای سطوح زبری متفاوت

پ- قالب‌گیری و ساخت نمونه‌ها (شکل ۶). هندسه‌های سه‌بعدی چاپ شده در مرکز یک قالب قرار گرفتند و سپس قالب با مخلوط سیمان پر شد. پس از ۲۴ ساعت، نمونه از قالب خارج شده و قطعه چاپ شده جدا گردید.



شکل ۶: نمونه‌های تولید شده جهت اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی و عددی

ت- اشباع‌سازی نمونه‌ها. به منظور اطمینان از تفکیک نفوذپذیری شکستگی و ماتریس سنگ، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آب غوطه‌ور شدند.

ث- آماده‌سازی نمونه‌ها. در این مرحله هر دو بخش بالایی و پایینی شکستگی منطبق بر ابعاد قالب از سطح جانبی توسط چسب سنگ به یکدیگر متصل می‌شوند. در مرحله بعد با استفاده از دستگاه ساب، محل اتصال دو قطعه صاف و یکدست می‌شود و در نهایت برای جلوگیری از نشت سیال از داخل نمونه به بیرون از غشا، به‌خوبی در سلفون پیچیده می‌شود.

ج- قرارگیری نمونه در سلول. ابتدا غشا لاستیکی را وارد سلول کرده و سپس نمونه سلفون پیچ شده وارد

نوسانات بالا جلوگیری می‌کند. مقادیر فشار در ۴ سطح و ارتفاع مختلف تنظیم شد و متناسب با قانون برنولی مقادیر ۱۹۵، ۲۹۳، ۳۹۱ و ۴۸۹ پاسکال بدست آمد.

خ- ثبت داده‌های دبی. در نهایت پس از بازکردن شیر خروجی مخزن و خروج آب از سلول، برای هر نمونه در فواصل ۱ دقیقه‌ای نمونه‌برداری صورت می‌گیرد و وزن می‌شود. این فرایند تا مرحله‌ای ادامه دارد تا جریان سیال خروجی شرایط پایدار پیدا کند. در این بخش مقدار دبی به تعداد ۱۰ تکرار ۱ تا ۵ دقیقه‌ای ثبت می‌شود.

### ۳- نتایج و بحث

جدول ۱ نتایج عددی و تجربی برای سه سطح زبری شکستگی (JRC=0، ۱۰ و ۲۰) و چهار فشار هیدرولیکی (۱۹۵ تا ۴۸۹ پاسکال) را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که دبی جریان سیال با افزایش فشار هیدرولیکی افزایش یافته و با افزایش زبری شکستگی کاهش می‌یابد. تطابق میان داده‌های عددی و تجربی نشان‌دهنده توانایی مدل عددی در پیش‌بینی رفتار جریان سیال است.

چ- اعمال فشار جانبی. در این مرحله پس از بستن سلول و اتصال شیرآلات توسط یک جک هیدرولیکی به سلول، بین ۱ تا ۲ بار فشار جانبی اعمال می‌گردد. این فشار جانبی کم جهت اطمینان حاصل کردن از عدم نشت آب از دیواره‌های کناری است. مقدار لازم جهت عدم ایجاد نشت از دیواره‌های سلول، توسط آزمایش چندین نمونه بکر بدون شکستگی و ثبت داده‌های نفوذپذیری بدست آمد.

ح- تنظیم مخزن سیال ورودی. در این مرحله پس از اتصال شلنگ خروجی از مخزن به قسمت ورودی سلول، با بازکردن شیر خروجی مخزن، آب وارد سلول شده و پس از گذر از درون شکستگی موجود در نمونه از بخش پایینی سلول خارج می‌شود. در این مرحله هواگیری سلول انجام می‌شود. جهت اعمال فشار سیال ورودی، امکان ارتفاع مخزن و همچنین ارتفاع سطح آب داخل مخزن توسط شناور تعبیه شده در مخزن وجود دارد. شناور در ارتفاع‌های متفاوتی از مخزن قابل نصب و تنظیم است. همچنین شناور این امکان را فراهم می‌کند که به محض خروج آب، ورود آب به مخزن داشته باشیم که از ایجاد سطوح ارتفاعی متفاوت و تفاوت‌های فشاری و

جدول ۱- نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی نمونه‌های حاوی شکستگی با نتایج عددی در فشارهای هیدرولیکی متفاوت

JRC	Hydraulic Pressure	Numerical Results (ml/min)	Experimental Results Upper Bound (ml/min)	Experimental Results Lower Bound (ml/min)
0	195	523.51	537.98	512.46
0	293	748.6	766.92	731
0	391	961.84	986.22	940.89
0	489	1155.26	1189.22	1123.13
10	195	481.6292	494.01	470.78
10	293	688.712	705.19	680.64
10	391	884.8928	909.68	883.28
10	489	1062.839	1091.27	1032.11
20	195	418.808	431.07	411.48
20	293	598.88	617.32	589.9
20	391	769.472	787.87	748.66
20	489	924.208	949.55	914.13

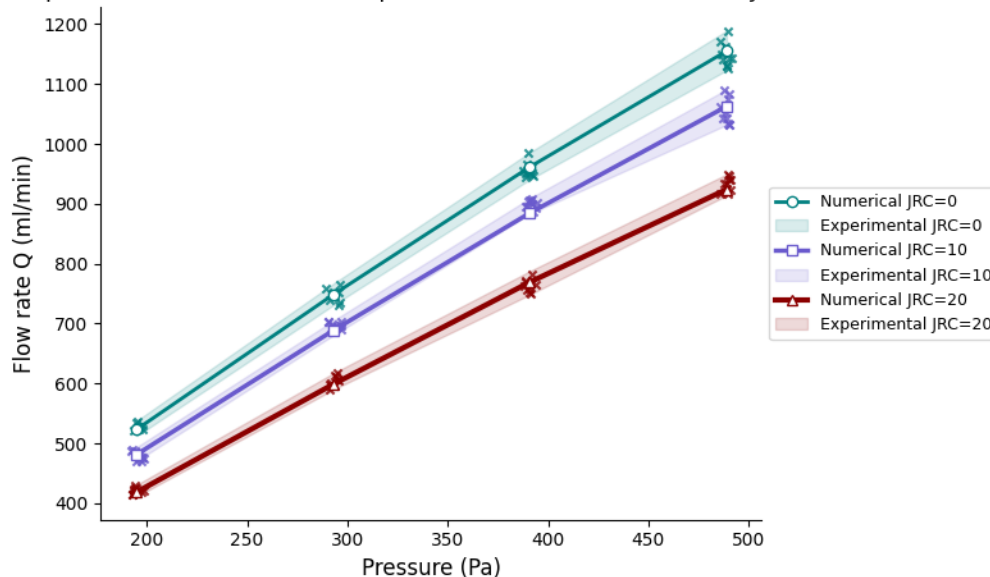
این کاهش ناشی از افزایش مقاومت هیدرولیکی در سطوح زبر است که باعث افت انرژی جریان می‌گردد. برای مثال، در فشار

همانطور که در شکل ۹ مشخص است افزایش زبری شکستگی‌ها منجر به کاهش قابل توجه دبی جریان می‌شود.

جریان را شبیه‌سازی می‌کند. اختلاف بین داده‌های عددی و تجربی عمدتاً ناچیز و در محدوده خطاهای آزمایشگاهی است. به‌عنوان مثال، در  $JRC=0$  و فشار ۲۹۳ پاسکال، مقدار عددی دبی ۷۴۸.۶ میلی‌لیتر بر دقیقه و مقدار تجربی میانگین حدود ۷۴۸.۴۶ میلی‌لیتر بر دقیقه است. اختلافات جزئی مشاهده‌شده، به محدودیت‌های تجهیزات آزمایشگاهی و ثبت داده‌ها، نوسانات جزئی جریان سیال ورودی و تغییرات جزئی در هندسه نمونه‌ها مرتبط است، اما این اختلاف‌ها تأثیر معناداری بر نتیجه‌گیری کلی ندارد.

۱۹۵ پاسکال، دبی عددی از ۵۲۳.۵۱ میلی‌لیتر بر دقیقه ( $JRC=0$ ) به ۴۱۸.۸۰۸ میلی‌لیتر بر دقیقه ( $JRC=20$ ) کاهش می‌یابد. این روند در تمامی فشارها مشاهده شده و نقش زبری در کاهش نرخ جریان به‌خوبی تأیید می‌شود. فشار هیدرولیکی تأثیر مستقیمی بر افزایش دبی جریان دارد. این رابطه خطی در تمامی سطوح زبری مشاهده می‌شود. برای نمونه، در  $JRC=10$ ، دبی عددی از ۴۸۱.۶۲۹ میلی‌لیتر بر دقیقه در فشار ۱۹۵ پاسکال به ۱۰۶۲.۸۳۹۲ میلی‌لیتر بر دقیقه در فشار ۴۸۹ پاسکال افزایش یافته است. این یافته‌ها با قوانین مکانیک سیالات و معادلات ناویر-استوکس همخوانی دارد و نشان می‌دهد که مدل عددی به‌خوبی رفتار

Comparison of Numerical and Experimental Results for Different JRC Levels



شکل ۹: نتایج آزمایشگاهی و عددی در فشارهای هیدرولیکی و سطوح شکستگی متفاوت

کارایی بالای روش عددی به‌کاررفته است. اهم نتایج به شرح زیر است:

استفاده از چیدمان آزمایشگاهی با هندسه‌های دقیق و زبری کنترل‌شده، امکان بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر جریان سیال را فراهم کرد. این چیدمان توانست به‌صورت قابل‌اطمینانی داده‌های تجربی تولید کند که تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی عددی داشت و اعتبار مدل عددی را تأیید کرد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه تمرکز بر طراحی و استفاده از یک چیدمان آزمایشگاهی دقیق برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی جریان سیال در شکستگی‌های زبر جهت شناخت رفتار جریان و ارزیابی عوامل مؤثر بر آن به صورت عددی و آزمایشگاهی بود. تطبیق نتایج آزمایشگاهی با داده‌های شبیه‌سازی نشان‌دهنده صحت و

مدل عددی مبتنی بر روش حجم محدود و الگوریتم SIMPLE با تطابق خوب با داده‌های آزمایشگاهی، دقت بالایی خود را در شبیه‌سازی جریان سیال در شکستگی‌های زبر نشان داد. این تطابق نشان داد که مدل عددی می‌تواند به‌عنوان ابزاری قابل‌اعتماد برای تحلیل جریان سیال مورد‌استفاده قرار گیرد.

چیدمان آزمایشگاهی طراحی‌شده، امکان کنترل پارامترهای مهمی نظیر زبری سطح، بازشدگی هیدرولیکی و فشار ورودی را فراهم کرد. این ویژگی‌ها، بستری مناسب برای مطالعه و شناخت

اثر این عوامل بر رفتار جریان سیال در شکستگی‌های سنگی ایجاد می‌کند.

مدل عددی ارائه‌شده، علاوه بر پیش‌بینی رفتار جریان در شرایط موجود، قابلیت گسترش به تحلیل‌های پیچیده‌تر نظیر جریان‌های غیرخطی و تقاطع شکستگی‌ها را دارد. این ویژگی، مدل را به ابزاری قدرتمند برای تحلیل سیستم‌های پیچیده تبدیل می‌کند.

#### ۵- مراجع

- [1] S. Chandra, E. Auken, P. K. Maurya, S. Ahmed, and S. K. Verma, "Large scale mapping of fractures and groundwater pathways in crystalline hardrock by AEM," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, p. 398, 2019.
- [2] L. J. Pyrak-Nolte, D. J. DePaolo, and T. Pietraß, "Controlling subsurface fractures and fluid flow: A basic research agenda," USDOE Office of Science (SC)(United States), 2015.
- [3] Z. Shi *et al.*, "Interaction between Groundwater and Rock Fractures under Stress and Seepage Based on Extractive Water Resource Utilisation," *Processes*, vol. 11, no. 12, p. 3380, 2023.
- [4] C.-B. Zhou, Y.-F. Chen, R. Hu, and Z. Yang, "Groundwater flow through fractured rocks and seepage control in geotechnical engineering: Theories and practices," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 1-36, 2023.
- [5] J. S. Konzuk and B. H. Kueper, "Evaluation of cubic law based models describing single-phase flow through a rough-walled fracture," *Water Resources Research*, vol. 40, no. 2, 2004.
- [6] Y. Jin, J. Dong, X. Zhang, X. Li, and Y. Wu, "Scale and size effects on fluid flow through self-affine rough fractures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 105, pp. 443-451, 2017.
- [7] Y. Zhang and J. Chai, "Effect of surface morphology on fluid flow in rough fractures: A review," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 79, p. 103343, 2020.
- [8] D. J. Brush and N. R. Thomson, "Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes, and local cubic law simulations," *Water Resources Research*, vol. 39, no. 4, 2003.
- [9] B. Y. Fu, A. Cheng, Y. E. Li, and J. Zong, "Factors that influence fluid flow in a single fracture," *Geophysical Prospecting*, vol. 70, no. 1, pp. 135-151, 2021.
- [10] L. Xie, C. Gao, L. Ren, and C. Li, "Numerical investigation of geometrical and hydraulic properties in a single rock fracture during shear displacement with the Navier–Stokes equations," *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, pp. 7061-7074, 2015.
- [11] M. Wang, Y.-F. Chen, G.-W. Ma, J.-Q. Zhou, and C.-B. Zhou, "Influence of surface roughness on nonlinear flow behaviors in 3D self-affine rough fractures: Lattice Boltzmann simulations," *Advances in water resources*, vol. 96, pp. 373-388, 2016.
- [12] Q. Zhang, S. Luo, H. Ma, X. Wang, and J. Qian, "Simulation on the water flow affected by the shape and density of roughness elements in a single rough fracture," *Journal of Hydrology*, vol. 573, pp. 456-468, 2019.
- [13] J. Lee and T. Babadagli, "Effect of roughness on fluid flow and solute transport in a single fracture: A review of recent developments, current trends, and future research," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 91, p. 103971, 2021.
- [14] K. Xue, X. Liu, X. Yan, and X. Chi, "The Effect of Fracture Surface Roughness and Mechanical Aperture on the Onset of Nonlinear Flow Behaviors in 3D Self-Affine Rough Fractures," *Geofluids*, vol. 2022, no. 1, p. 4837207, 2022.
- [15] F. Darboux, P. Davy, C. Gascuel-Oudou, and C.-h. Huang, "Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments," *Catena*, vol. 46, no. 2-3, pp. 125-139,

- 2002.
- [16] R. Egert, F. Nitschke, M. Gholami Korzani, and T. Kohl, "Spatial Characterization of Channeling in Sheared Rough-Walled Fractures in the Transition to Nonlinear Fluid Flow," *Water Resources Research*, vol. 59, no. 10, p. e2022WR034362, 2023.
- [17] T. Phillips *et al.*, "A systematic investigation into the control of roughness on the flow properties of 3D-printed fractures," *Water Resources Research*, vol. 57, no. 4, p. ewrcr.25233, 2021.
- [18] B. Li, J. Wang, R. Liu, and Y. Jiang, "Nonlinear fluid flow through three-dimensional rough fracture networks: Insights from 3D-printing, CT-scanning, and high-resolution numerical simulations," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 1020-1032, 2021.
- [19] T. Phillips *et al.*, "Laboratory-based investigation into the fluid flow properties of natural and 3D-printed rough fractures," in *1st Geoscience & Engineering in Energy Transition Conference*, 2020, vol. 2020, no. 1: European Association of Geoscientists & Engineers, pp. 1-5.
- [20] A. Rahmani Shahraki, A. Baghbanan, and A. Azhari, "Precise Replication of Complex Rock Fracture Surfaces Combining 3D Printing, Mold-and-Cast, and Statistical Analysis," *Indian Geotechnical Journal*, 2025/05/12 2025, doi: 10.1007/s40098-025-01250-2.
- [21] S. M. Mousavi, S. Sadeghnejad, and M. Ostadhassan, "Evaluation of 3D printed microfluidic networks to study fluid flow in rocks," *Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles*, vol. 76, p. 50, 2021.
- [22] W. Tan and P. Wang, "Experimental study on seepage properties of jointed rock-like samples based on 3D printing techniques," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, no. 1, p. 9403968, 2020.
- [23] P. Yin, C. Zhao, J. Ma, C. Yan, and L. Huang, "Experimental study of non-linear fluid flow through rough fracture based on fractal theory and 3D printing technique," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 129, p. 104293, 2020.
- [24] Y. Ma, Y. Zhang, Z. Hu, Z. Yu, Y. Huang, and C. Zhang, "Experimental study of the heat transfer by water in rough fractures and the effect of fracture surface roughness on the heat transfer characteristics," *Geothermics*, vol. 81, pp. 235-242, 2019.
- [25] Y. Huang, Y. Zhang, Z. Yu, Y. Ma, and C. Zhang, "Experimental investigation of seepage and heat transfer in rough fractures for enhanced geothermal systems," *Renewable Energy*, vol. 135, pp. 846-855, 2019.



## Validation of Numerical Simulation of Fluid Flow Through Rough Rock Fractures Using Physical Modeling Based on 3D Printing

Ahmad Rahmani Shahrki<sup>1</sup>; Alireza Baghbanan<sup>2\*</sup>; Amin Azhari<sup>3</sup>; Ali Askarpour Kabir<sup>4</sup>; Amirhossein Vahedi<sup>4</sup>; Sina Mirzabeigi<sup>4</sup>

1. PhD Candidate in Rock Mechanics, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran.

2. Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran.

3. Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran.

4. Master's Graduate, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran.

Received: 25. December. 2024      Accepted: 17. March. 2025  
(\*Corresponding author: bagh110@iut.ac.ir)

### Keywords

Rough fracture  
3D printing  
Numerical fluid flow simulation  
Experimental permeability  
Navier-Stokes equations

### Final English Extended Abstract

#### Summary

This study develops an integrated experimental–numerical framework for validating computational fluid-dynamics (CFD) models of single rock fractures with controlled roughness. Three fracture replicas with joint roughness coefficients (JRC = 0, 10, 20) were fabricated by high-resolution 3-D printing and tested in a custom triaxial flow cell under four hydraulic pressures (195–489 Pa). Steady-state discharge and pressure distribution were recorded and compared with Navier–Stokes simulations solved by the finite-volume method in STAR-CCM+. Numerical results matched laboratory observations within 5 %, confirming the reliability of the model for nonlinear flow regimes. The verified workflow enables robust investigation of roughness-induced deviations from Darcy behavior and provides a benchmark for more complex fracture-network analyses.

### Introduction

Accurate prediction of fluid transport through fractured rocks is critical for groundwater management, hydrocarbon recovery, geothermal energy extraction, and subsurface waste isolation. Classical cubic-law formulations fail when aperture variability and surface asperities dominate flow resistance, necessitating full Navier–Stokes modelling. Such models, however, require high-quality experimental data for calibration and validation. Conventional casting or engraving cannot reproduce field-scale roughness repeatably. This research addresses these challenges by combining precise additive manufacturing of fracture geometries with a pressure-controlled permeameter, delivering reproducible datasets for numerical verification and future parametric studies.

### Methodology and Approaches

Surface topographies representing JRC 0, 10 and 20 were generated in CAD, respecting a 54 mm diameter and 110 mm length to fit a Hoek triaxial cell. The halves were printed from rigid photopolymer, sealed, water-saturated, and assembled. A perforated 3D-printed distributor ensured uniform inflow. Upstream head levels produced inlet pressures of 195, 293, 391 and 489 Pa; lateral confinement of 1–2 bar prevented side leakage. Outflow was weighed at one-minute intervals until steady conditions were reached. Numerical meshes employed hexahedral elements refined near asperities. Incompressible, laminar Navier–Stokes equations were solved with a coupled pressure–velocity algorithm; convergence was accepted at residuals  $<10^{-6}$ .

### Results and Conclusions

Discharge increased linearly with inlet pressure for every roughness, yet absolute flow rates decreased as JRC rose. At 195 Pa, measured flow declined from  $538 \text{ mL min}^{-1}$  (JRC 0) to  $431 \text{ mL min}^{-1}$  (JRC 20); simulations predicted  $524 \text{ mL min}^{-1}$  and  $419 \text{ mL min}^{-1}$  respectively. Maximum deviation across all cases was 4.8 %, attributable to minor



printing tolerances and sensor resolution. The validated CFD model accurately captures roughness-controlled head losses and is extensible to intersecting fractures, non-Darcy regimes, and thermo-hydraulic coupling. Practically, the combined laboratory–numerical platform offers a dependable means for parameter rising permeability in fractured reservoirs and for benchmarking up-scaled network models.

---