

## مدل سازی عددی اثر زبری بر رفتار جریان سیال در شکستگی طبیعی سنگ

محمدجواد نصری<sup>۱\*</sup>؛ احمد رمضان زاده<sup>۲</sup>؛ هومن جنابی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. کارشناس فنی؛ شرکت پایانه های نفتی ایران

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۷/۱۰/۲۰؛ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۷/۱۱/۲۵

DOI: 10.22107/JPG.2019.165915.1082

واژگان کلیدی	چکیده
جریان سیال، مدل سازی عددی، شکستگی سنگ، زبری شکستگی، رابطه فورچهمیر	در بسیاری از پروژه های مهندسی ژئومکانیک، شناخت رفتار هیدرولیکی شکستگی های سنگی به عنوان بخش تراوای توده سنگ ضروری است. پارامترهای هندسی شکستگی، نظیر زبری دیواره ها و بازشدگی شکستگی تأثیر چشم گیری در رفتار هیدرولیکی و مکانیکی آن دارد. در این مقاله این پارامترها به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته اند. در تهیه مدل هندسی از اسکن سه بعدی دیواره های شکستگی سنگ طبیعی استفاده شده و با استفاده از نرم افزار <i>Fluent</i> و حل معادله های ناویر-استوکس در این مدل، جریان سیال در شکستگی سنگ شبیه سازی شده است. اعتبار مدل سازی عددی نیز با نتایج آزمایشگاهی کنترل شده که حاکی از صحت روش مدل سازی است. در ادامه برای محدوده وسیعی از نرخ جریان و زبری های متفاوت با استفاده از این مدل عددی، جریان سیال در شکستگی سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مدل سازی نشان می دهد که رابطه ماکروسکوپی فورچهمیر به خوبی جریان غیرخطی سیال در شکستگی سنگی را توصیف می کند. مقادیر ضرایب خطی و غیرخطی معادله فورچهمیر برای هر یک از مدل های هندسی برآورد شده است. افزون بر آن نتایج به دست آمده نشان می دهد که با افزایش بازشدگی، مقادیر ضرایب خطی و غیرخطی کاهش می یابد.

### ۱. پیش گفتار

شده اند تحت تأثیر خصوصیات ذرات عامل پروپان و تنش های برجا هستند، در حالی که نفوذپذیری شکستگی هایی که پروپان دار نشده اند توسط خصوصیات هندسی شکستگی و میدان تنش تعیین می گردد (Sharma & Manchanda, 2015). از سوی دیگر فهم دقیق تر از رفتار هیدرولیکی شکستگی سنگی به توسعه مدل های دقیق تر از فرآیندهای هیدرولیکی توده سنگ کمک می کند. به همین دلیل این موضوع همواره مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده و جنبه های متفاوتی از جریان سیال در یک شکستگی با استفاده از روش های تحلیلی (Zimmerman & Bodvarsson, 1996) و آزمایشگاهی (Lee & Cho, 2002; Li et al., 2008; Zhang & Nemcik., 2013; Zhou et al., 2015; Zimmerman & Yeo, 2000) مورد بررسی قرار گرفته است. در سالیان گذشته با پیشرفت علوم رایانه و روش های محاسباتی، استفاده از روش های عددی در تحلیل جریان سیال در شکستگی سنگی رایج شده و جنبه های متفاوتی از آن مورد بررسی قرار گرفته

بخش عمده جریان هیدروکربن در مخازن شکافدار از طریق شکستگی های موجود در آن رخ می دهد، بنابراین شناخت مناسب از رفتار هیدرولیکی و مکانیکی از هیدروکربن در این نوع مخازن نیازمند فهم عمیق تر از ویژگی های شکستگی های سنگی خواهد بود (Lin et al., 2015). به طور کلی در مخازن هیدروکربوری دو نوع شکستگی شامل شکستگی های طبیعی و شکستگی های ایجاد شده توسط شکست هیدرولیکی وجود دارد. بخشی از شکستگی های القایی توسط شکست هیدرولیکی تحت تأثیر ذرات عامل پروپانی باز باقی می ماند که مسیر اصلی انتقال نفت خام از مخزن به چاه می شود. بخش بیشتری از شکستگی های القایی و شکستگی های طبیعی که بازشدگی کمی دارند تحت اثر عامل پروپانی قرار نمی گیرند؛ ولی همچنان به تولید نفت کمک می کنند (Kong & Chen, 2018). نفوذپذیری شکستگی هایی که به خوبی پروپان دار

شبهه‌سازی جریان در شکستگی پرداختند و نتیجه گرفتند که با افزایش جابجایی برشی، انحراف آنگذری شکستگی از قانون مکعب بیشتر می‌شود (Kong & Chen, 2018). به‌رغم پژوهش‌های گسترده در خصوص رفتار سیال در شکستگی با توجه به پیچیدگی‌های بسیار زیاد هندسه شکستگی، نیاز به پژوهش در این حوزه ضروری است؛ به ویژه اینکه یک مدل عددی خوب می‌تواند مکمل مطالعات آزمایشگاهی باشد و در شناسایی موارد مهم در آزمون‌های آزمایشگاهی به پژوهشگران کمک کند.

در پژوهش حاضر به دنبال مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته توسط نصری و همکاران (۲۰۱۹) در خصوص جریان سیال در شکستگی سنگ طبیعی، به مدل‌سازی عددی این آزمایش‌ها پرداخته شده است (Nasri et al., 2019). از این رو در گام نخست با اسکن سطوح شکستگی، هندسه‌ی آن برآورد و با استفاده از داده‌های به دست آمده هندسه دامنه جریان سیال ترسیم شده است. از این هندسه‌ها برای شبهه‌سازی سه بعدی جریان سیال در شکستگی سنگی با زبری متفاوت استفاده شده است. سپس اعتبار نتایج مدل‌سازی عددی جریان سیال درون شکستگی سنگی، با استفاده از آزمایشات جریان سیال سنجیده شده است. در گام بعدی، با مطالعه تأثیر زبری بر رفتار هیدرولیکی شکستگی، روابط میکروسکوپی موجود برای توصیف رابطه نرخ جریان با گرادین فشار (روابط فورچهمیر) در شکستگی‌های سنگی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. مباحث نظری مرتبط با این مطالعه

به طور کلی روابط استفاده شده برای تحلیل هیدرولیکی در توده‌سنگ را می‌توان در دو مقیاس میکروسکوپی و میکروسکوپی دسته‌بندی کرد. در مدل‌های میکروسکوپی شرایط هیدرولیکی در هر نقطه از جریان سیال قابل تحلیل است. معادلاتی نظیر ناویر-استوکس<sup>۱</sup>، معادله روانکاری رینولدز<sup>۲</sup> و معادله استوکس<sup>۳</sup>، از این نوع مدل‌های ریاضی هستند. این معادلات تحت شرایط و فرضیات خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در اغلب موارد معادله کامل ناویر -

است (Crandall et al., 2010; Javadi et al., 2010; Koyama et al., 2009; Nowamooz et al., 2009; Zimmerman et al., 2004). زیمرمن و همکاران (۲۰۰۴) با شبهه‌سازی المان محدود، به کمک نرم‌افزار Fluent به این نتیجه دست یافتند که نقطه آغاز انحراف از رفتار خطی به غیرخطی، زمانی قابل ملاحظه است که نسبت افت فشار غیرخطی به افت فشار کل برابر ۱۰ درصد باشد (Zimmerman et al., 2004).

نظری دوست و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از نرم‌افزار Fluent شکستگی سنگ را به صورت دو بعدی شبهه‌سازی کردند و به بررسی اعتبار رابطه مکعب در شکستگی پرداختند. مدل‌سازی عددی آن‌ها نشان داد که افت فشار توسط کوچک‌ترین بازشدگی موجود در مسیر سیال در شکستگی کنترل می‌شود و با گنجانیدن مسیر پیچ و خم‌دار در مدل صفحات موازی، این مدل به خوبی رفتار سیال را توصیف می‌کند. همچنین برای تخمین افت فشار در شکستگی سنگ رابطه فاکتور اصطکاک را پیشنهاد دادند (Nazridoust et al., 2006).

کویاما و همکاران (۲۰۰۸) با روش عددی المان محدود و نرم‌افزار COMSOL Multiphysic به صورت دو بعدی به بررسی رفتار هیدرومکانیکی شکستگی تحت برشی پرداختند و نتیجه گرفتند که پروفیل سرعت پیش‌بینی شده توسط معادله ناویر استوکس بسیار متفاوت از پروفیل سهموی سرعت تعریف شده توسط قانون مکعب محلی و معادله رینولدز است. این انحراف تأثیر قابل توجهی در رفتار انتقال ذرات و خواص آن‌ها دارد (Koyama et al., 2008). کراندال و همکاران (۲۰۰۹) مدل عددی ارائه شده توسط نظری دوست را با لحاظ شکستگی در احاطه با ماده سنگی با نفوذپذیری مشخص بهبود بخشیده‌اند (Crandall et al., 2010).

جوادی و همکاران (۲۰۱۰) با به کارگیری نرم‌افزار Fluent و ساده‌سازی هندسه بازشدگی و مدل‌سازی عددی سه‌بعدی شکستگی برای توصیف جریان سیال در آن یک رابطه‌ی هندسی مشابه با رابطه فورچهمیر معرفی کردند (Javadi et al., 2010). کنگ و چن (۲۰۱۸) با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار COMSOL Multiphysic به

<sup>1</sup> Navier-Stokes

<sup>2</sup> Reynolds Lubrication equation

<sup>3</sup> Stokes

می‌دهد. هنگامی که عدد ماخ کوچک‌تر از  $0.3$  است، می‌توان جریان را تراکم‌ناپذیر در نظر گرفت. در نتیجه، چگالی سیال ثابت و دیورژانس سرعت مایع برابر با صفر می‌شود و معادله ناویر-استوکس به صورت معادله (۵) ساده‌نویسی می‌شود. این معادله به عنوان معادله استوکس شناخته می‌شود. انتگرال‌گیری از معادله استوکس در امتداد جهت عرض شکستگی منجر به معادله روانکاری رینولدز یا قانون مکعب محلی می‌شود (Zimmerman & Yeo, 2000).

$$-\nabla P = \nabla \cdot (\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) \quad (5)$$

معادلات کامل ناویر - استوکس اگرچه قادر است به خوبی رفتار جریان نیوتنی تراکم‌ناپذیر را شبیه‌سازی کند اما حل قسمت غیرخطی این معادلات بسیار پیچیده و زمان‌بر است. در سطح ماکروسکوپی تلاش بر این است تا رابطه ساده شده‌ای برای طراحی مهندسی و حل معادلات در حجم بالا ارائه گردد. قانون مکعب از مشهورترین معادلات ماکروسکوپی هیدرولیکی در محیط شکستگی سنگی و شکل ساده‌سازی شده‌ای از معادله‌های ناویر- استوکس برای تحلیل جریان آرام در شکستگی به صورت دو صفحه موازی و صاف است:

$$Q = -\frac{we^3}{12\mu} \nabla P \quad (6)$$

در این معادله پارامترهای  $w$  عرض شکستگی و  $e$  بازشدگی شکستگی است. این معادله برای رفتار خطی جریان در شکستگی استفاده می‌شود اما برای توصیف جریان در حالت غیرخطی دو معادله ماکروسکوپی تجربی فورچهمیر<sup>۵</sup> و ایزباش<sup>۶</sup> ارائه شده‌اند. رابطه فورچهمیر از یک معادله درجه دوم خطی برای توصیف خصوصیات ماکروسکوپی جریان غیرخطی استفاده می‌کند که در رابطه ۷ آورده شده است:

$$-\nabla P = aQ + bQ^2 \quad (7)$$

در اینجا  $a$  مؤلفه خطی،  $b$  مؤلفه غیرخطی و  $\nabla P$  افت فشار را بر حسب  $Q$  دبی سیال نشان می‌دهد. براساس این معادله

استوکس قادر به توصیف جریان سیال در شکستگی است. این معادله برای مایع نیوتنی فشرده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left( \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot u)I \right) + F \quad (1)$$

در این معادله  $u$  سرعت جریان سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $P$  اختلاف فشار،  $\mu$  ویسکوزیته سیال و  $F$  نیروی خارجی است. عبارت سمت چپ نیروی اینرسی<sup>۴</sup> است؛ اولین عبارت در سمت راست نشان دهنده نیروی فشار و عبارت دوم نیروی ویسکوز را نشان می‌دهد، همچنین آخرین بخش این معادله نیروی خارجی مانند گرانش است. معادله (۱) باید با معادله بقای جرم حل شود. در حالت ایستایی، معادله ناویر استوکس و معادله بقای جرم به شکل معادلات (۲) و (۳) ساده نویسی می‌شود:

$$\rho(u \cdot \nabla u) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot u)I) + F \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3)$$

عدد رینولدز عددی بدون بُعد است که به صورت نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوز همانند رابطه (۴) تعریف می‌شود (Ranjith & Darlington, 2007)

$$Re = \frac{\rho v e}{\mu} = \frac{2\rho Q}{\mu w} \quad (4)$$

جریان سیال برای عدد رینولدز کم ( $2100$ ) برای جریان در یک لوله) به صورت آرام و برای حالتی که عدد رینولدز بزرگ است ( $4000$ ) برای جریان در یک لوله) به صورت مغشوش در نظر گرفته می‌شود. برای عدد رینولدز بسیار کوچک ( $Re \ll 1$ )، نیروی اینرسی نسبت به نیروی ویسکوز ناچیز است؛ بنابراین هنگام حل معادله ناویر استوکس نیروی اینرسی را می‌توان نادیده گرفت. عدد ماخ نسبت سرعت مایع به سرعت صدا در آن مایع است و تراکم‌پذیری جریان را نشان

<sup>4</sup> Inertial

<sup>5</sup> Forchheimer

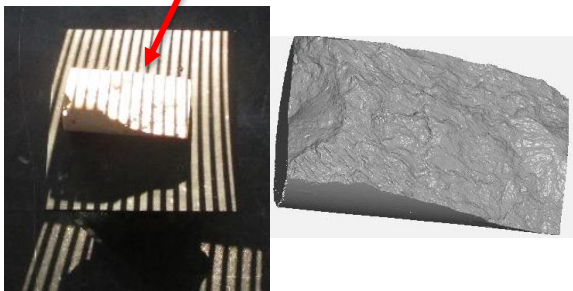
<sup>6</sup> Izbash

## مدل‌سازی عددی اثر زبری بر رفتار جریان سیال در شکستگی طبیعی سنگ

استفاده شده است (شکل ۲). این دستگاه برای رقوم‌سازی یک جسم، مجموعه‌ای از نورهای ساختار یافته را بر سطح آن می‌تابد. تصاویر این الگو که به علت زبری سطح منحرف شده است، به صورت خودکار توسط دو دوربین با رزولوشن  $1392 \times 1040$  برداشت می‌شود. نرم‌افزار با استفاده از این جفت تصاویر، مختصات سه بعدی برای هر پیکسل را به صورت دقیق و بر مبنای اصول مثلثاتی محاسبه می‌کند. با استفاده از این اطلاعات، بازشدگی و زبری سطوح شکستگی برآورد می‌شود. مقادیر برآورد شده برای زبری سطوح شکستگی در جدول ۱ آورده شده است.



(الف) تجهیزات مورد استفاده برای برداشت هندسه شکستگی‌ها



(ب) نمونه رقومی شده سطح پایینی نمونه S4

شکل ۲. (الف) تجهیزات مورد استفاده برای برداشت هندسه شکستگی‌ها؛ (ب) نمونه واقعی و رقومی شده برای سطح پایینی S4

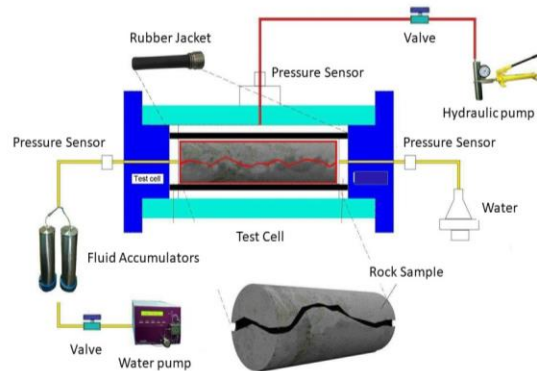
قانون فورچهمیر را می‌توان به صورت قانون اصلاحی داری در نظر گرفت که عبارت غیرخطی  $bQ^2$  به آن افزوده شده و چنانچه اثر غیرخطی جریان ناچیز باشد ( $b=0$ ) این رابطه به قانون داری تبدیل می‌شود. معادله ایزبانش رابطه دیگری است که جریان غیرخطی را به صورت ماکروسکوپی توصیف می‌کند:

$$-\nabla P = \lambda Q^m \quad (8)$$

که  $\lambda$  و  $m$  ضرایب تجربی و ثابتی هستند. در صورتی که  $m=1$  باشد، نشان‌دهنده جریان خطی و اگر  $m=2$  باشد، نشان‌دهنده جریان کاملاً مغشوش است. برای حالت گذر از جریان خطی به جریان کاملاً مغشوش،  $m$  در محدوده بین ۱ تا ۲ قرار می‌گیرد (Zoorabadi et al., 2015).

### ۳. آزمایش‌های مبنا

در این پژوهش آزمایش‌های انجام شده توسط نصری و همکاران (۲۰۱۹) به عنوان مبنای مطالعه قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها رفتار هیدرومکانیکی چند شکستگی طبیعی سنگ آهک با زبری متفاوت بررسی شده است. شکل ۱ به صورت شماتیک تجهیزات انجام آزمایش نشان می‌دهد (Nasri et al., 2019).



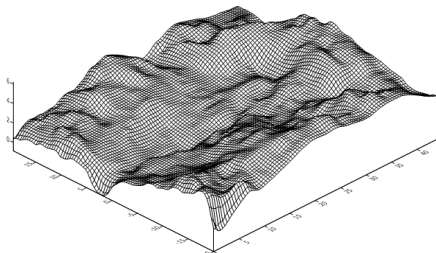
شکل ۱. شماتیک از تجهیزات انجام آزمایش

### ۴. ساخت هندسه مدل

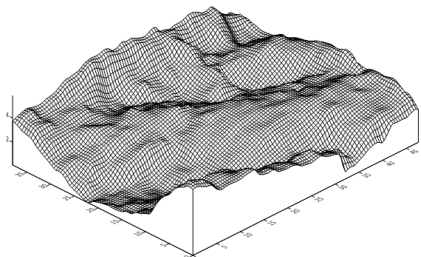
در این مطالعه، از داده‌های دیجیتالی برداشت شده از شکستگی طبیعی به منظور ساخت هندسه سه بعدی استفاده شده است. از سیستم اندازه‌گیری ژئومتریک - استریو سه بعدی به منظور برداشت هندسه سطوح دیوارهای شکستگی

جدول ۱. مشخصات هندسی سطوح شکستگی

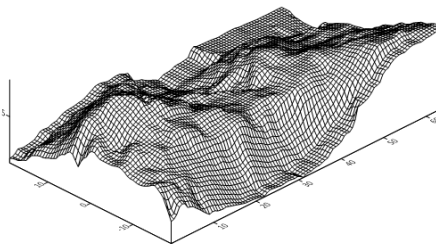
شماره نمونه	طول نمونه (mm)	شاخص زبری $JRC$	بعد فرکتال زبری درزه
نمونه S1	۴۳	۱۶	۲/۴۴۶
نمونه S2	۴۷/۵	۱۳	۲/۳۴۰۴
نمونه S3	۶۴	۱۴	۲/۳۲۸۳
نمونه S4	۶۴	۲۰	۲/۲۱۷۸



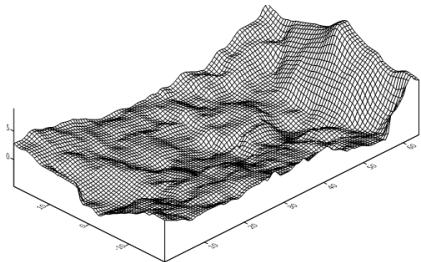
(الف) نمونه S1



(ب) نمونه S2



(ج) نمونه S3

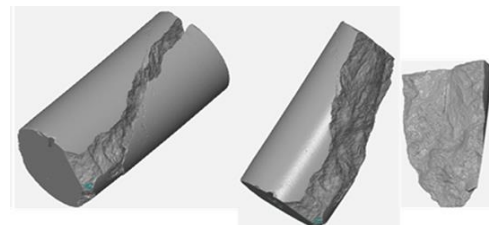


(د) نمونه S4

شکل ۴. تصویر اسکن سه بعدی زبری در سطوح شکستگی نمونه‌ها

#### ۴.۱ تعیین بازشدگی

برای اندازه‌گیری بازشدگی شکستگی سنگ علاوه بر رقوم‌سازی سطح دو دیواره شکستگی، می‌بایست اطلاعات مکان نسبی این دو سطح نسبت به یکدیگر مشخص باشد. داده‌های رقوم‌سازی شده از دو دیواره شکستگی با استفاده از نقطه‌های مبنا مشترک در سه هندسه، (داده‌های رقوم‌سازی شده دیواره پایینی، بالایی و شکستگی بسته) به یک هندسه منتقل می‌گردد. شکل ۳ داده‌های مورد نیاز برای تخمین بازشدگی را نشان می‌دهد. فاصله بین دیواره بالایی و پایینی شکستگی، به صورت عمود بر صفحه  $x-y$  به عنوان بازشدگی تعریف می‌شود.



شکل ۳. داده مورد نیاز برای اندازه‌گیری بازشدگی شکستگی

در شکل ۴ تصویری از اسکن سه بعدی زبری در یکی از سطوح شکستگی برای هر نمونه آورده شده است. در مرحله بعد هندسه سه بعدی بازشدگی با کمک نرم‌افزار *Gambit* ساخته می‌شود. در شکل ۵ هندسه مش‌بندی شده برای نمونه S1 آورده شده است.

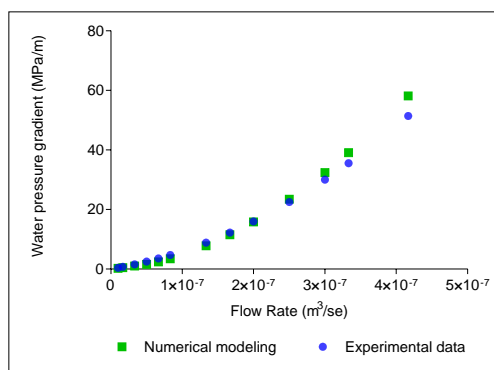
#### ۵. مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی عددی، معادله ناویر استوکس و معادلات پیوستگی جریان با استفاده از نرم‌افزار *Fluent* در هندسه (ایجاد شده توسط نرم‌افزار *Gambit*) حل شده است. این



## مدل سازی عددی اثر زبری بر رفتار جریان سیال در شکستگی طبیعی سنگ

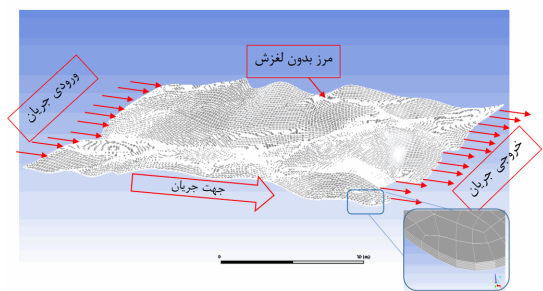
مقایسه‌ای بین مقادیر افت فشار به دست آمده از مدل سازی عددی و آزمون آزمایشگاهی برای یک نمونه شکستگی سنگی انجام که در شکل ۶ نشان داده شده است. منظور از مقدار افت فشار استاتیکی، تفاضل مقادیر فشار استاتیک در ورودی و خروجی شکستگی است.



شکل ۶. مقایسه بین افت فشار برای مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده بین نتایج آزمایشگاهی و عددی تطابق خوبی برقرار است. بنابراین مدل عددی ساخته شده قادر خواهد بود به خوبی رفتار هیدرولیکی در شکستگی زبر را تقریب بزند. پس از اطمینان از صحت محاسبات عددی، استقلال مدل از تعداد المان در مدل سازی عددی انجام شده است. به منظور ارزیابی استقلال مدل از تعداد المان، شبیه سازی برای تعداد متفاوتی از المان ایجاد گردیده است. شکل ۷ مقایسه بین نتایج مدل سازی با تعداد متفاوت المان را نشان می‌دهد. هر اندازه تعداد المان بیشتر شود، نتایج دقیق تر و زمان حل افزایش می‌یابد. البته تعداد المان از یک حد که بیشتر شود تأثیری در دقت نتایج نمی‌گذارد؛ بنابراین می‌بایست تعداد معقولی از المان برای مدل سازی انتخاب شود تا هم دقت مدل سازی لحاظ و هم زمان و هزینه مدل سازی مقرون به صرفه گردد.

نرم افزار بر مبنای روش عددی حجم محدود<sup>۷</sup> قادر به مدل سازی جریان سیال در هندسه‌های پیچیده است. از معادلات میانگین رینولدز ناویر استوکس *RANS* به همراه مدل مغشوش *k-ε* برای شبیه سازی رفتار جریان مغشوش استفاده شده است.



شکل ۵. هندسه دامنه جریان سیال برای نمونه S1

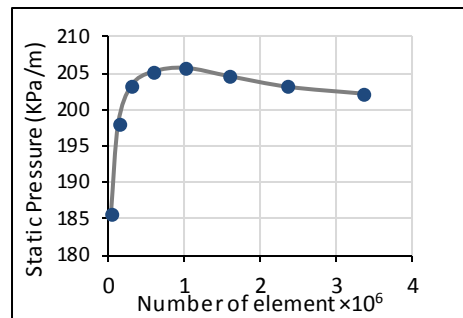
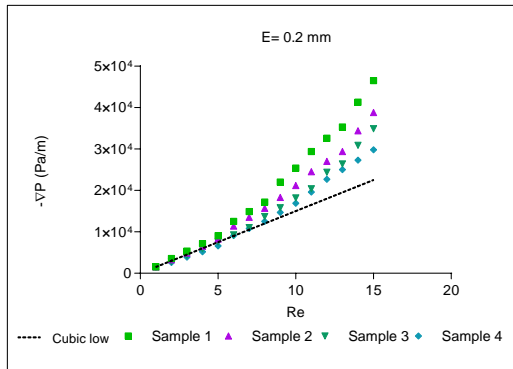
وزن مخصوص ۹۹۸/۲ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته دینامیکی ۰/۰۱ پویز به عنوان ویژگی‌های فیزیکی آب در نظر گرفته شده است. با توجه به ضخامت بسیار کم جریان سیال اثر جاذبه در مدل سازی لحاظ نشده و با توجه به محدودیت‌های موجود برای تولید مش کمترین مقدار بازشدگی ۰/۰۵ میلی متر لحاظ شده است.

مطابق شرایط انجام آزمایش برای مدل عددی، شرایط مرزی تعریف می‌شود. برای منطقه ورودی *velocity inlet* *boundary condition* لحاظ شده است. توزیع سرعت در راستای محور *y* یکنواخت در نظر گرفته شده و سایر مرزهای موجود در مدل سازی با توجه به ناتراوا بودن ماده سنگ در دیواره‌های شکستگی به صورت *Wall* با شرایط مرزی غیرلغزش تعریف شده است.

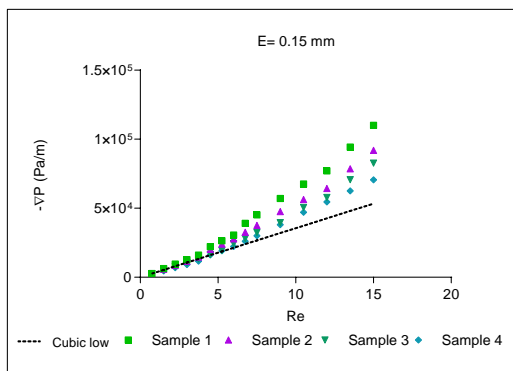
### ۵.۱ اعتبارسنجی مدل عددی

از آنجایی که همواره نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی به صورت تقریب در نظر گرفته می‌شود بنابراین قبل از تحلیل نتایج مدل سازی، می‌بایست اعتبار مدل سازی مورد ارزیابی قرار گیرد. اعتبارسنجی در دو بخش مجزا بررسی شده و صحت محاسبات عددی و استقلال نتایج از مش انجام شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج محاسبات عددی،

<sup>7</sup> Finite Volume Method

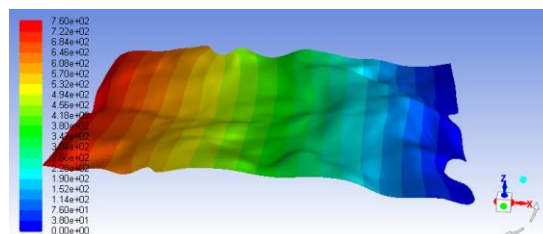
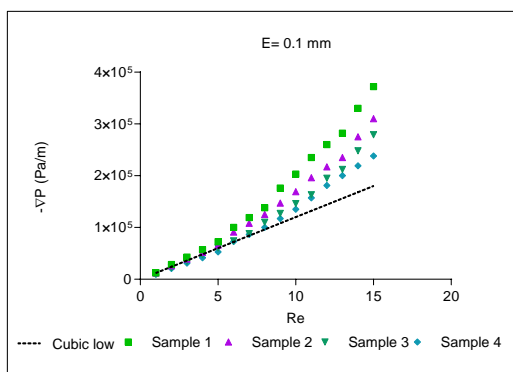


شکل ۷. تغییرات افت فشار به نسبت تعداد المان به کار گرفته شده برای مدل‌سازی

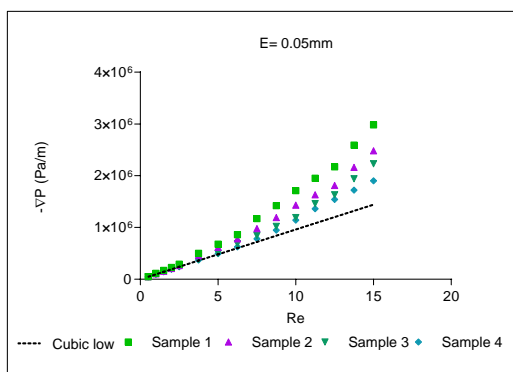


### ۶. تحلیل و بررسی نتایج

پس از اعتبارسنجی مدل عددی می‌توان از آن به منظور بررسی پارامترهای مختلف در جریان سیال در شکستگی استفاده کرد. با استفاده از این مدل عددی تأثیر هندسه (زبری و بازشدگی) بر رفتار جریان سیال بررسی شده است. بنابراین هندسه چهار نمونه سنگ با زبری متفاوت و برای چهار بازشدگی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵، و ۰/۲ میلی‌متر ایجاد گردید و جریان سیال با سرعت‌های متفاوت شبیه‌سازی شد. شکل ۸ توزیع فشار در طول نمونه سنگ را نشان می‌دهد.



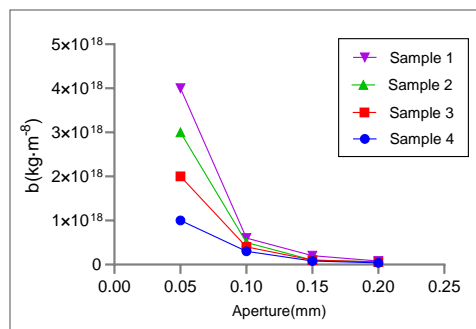
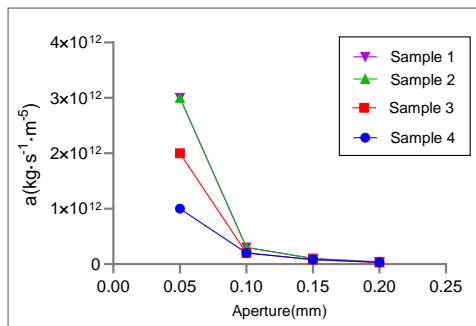
شکل ۸. توزیع فشار در طول نمونه S1 و بازشدگی ۰/۲ میلی‌متر



شکل ۹. تغییرات افت فشار به نسبت عدد رینولدز

نتایج مدل‌سازی همانند روابط ماکروسکوپی و شیوه مرسوم در تحلیل رفتار هیدرولیکی در سنگ به شکل تغییرات افت فشار به نسبت نرخ جریان برای هر کدام از بازشدگی‌ها به صورت جداگانه ترسیم شده است (مقادیر افت فشار استاتیکی ناشی از حرکت سیال در شکستگی، از اختلاف مقادیر فشار استاتیکی در ورودی و خروجی شکستگی محاسبه می‌شود). شکل ۹ این نمودارها را نشان می‌دهد برای مقایسه نتایج با قانون مکعب مقدار تخمینی افت فشار توسط رابطه مکعب نیز آورده شده است. همچنین در شکل ۱۰ خطای نسبی بین افت فشار تقریب زده شده به روش مدل‌سازی و برآورد شده با قانون مکعب برای اعداد مختلف رینولدز آورده شده است.

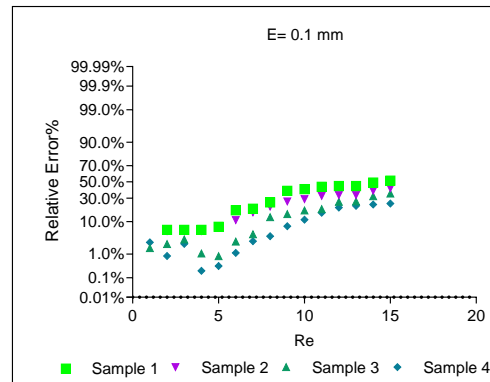
می شود و رابطه بین نرخ جریان با افت فشار به صورت غیرخطی تغییر می کند. بنابراین از رابطه فورچهمیر برای توصیف این رابطه استفاده شده است و ضرایب خطی و غیرخطی این معادله توسط روش رگرسیون گیری غیرخطی تعیین شده است. معادله فورچهمیر به خوبی رفتار غیرخطی را توصیف می کند ( $R^2 > 0.9888$ ). تغییرات این ضرایب به نسبت تغییر بازشدگی برای هندسه های با زبری متفاوت در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. روند تغییرات ضریب خطی و غیرخطی معادله فورچهمیر به نسبت بازشدگی

مقادیر این دو ضریب با تغییر بازشدگی از ۰/۰۵ تا ۰/۲ میلیمتر به صورت نزولی کاهش یافته و در بازشدگی کم (۰/۰۵ میلیمتر) اثر زبری هندسه بر روی این مقادیر مشخص است و البته با افزایش بازشدگی اثر زبری کاهش می یابد. بنابراین این ضرایب علاوه بر بازشدگی تابعی از زبری شکستگی نیز هستند.

اگر ضریب خطی  $a$  به صورت نفوذپذیری ذاتی شکستگی لحاظ گردد مقادیر بیشتر آن بیانگر نفوذپذیری کمتر شکستگی و سطح مقطع کم جریان سیال است. از لحاظ ریاضی ضریب  $b$  کنترل کننده انحنای سهمی افت فشار به نسبت نرخ جریان است. با کاهش بازشدگی شیب منحنی



شکل ۱۰. خطای نسبی بین افت فشار تقریب زده شده به روش مدل سازی و برآورد شده با قانون مکعب برای اعداد مختلف رینولدز

در هریک از بازشدگی ها مقادیر تخمین زده شده برای افت فشار توسط قانون مکعب کمتر از مقادیر مدل سازی عددی است. بنابراین مقدار آنگذری تخمین زده شده توسط رابطه مکعب بیشتر از مقدار واقعی است.

همانطور که پیش بینی می شد با کاهش بازشدگی مقدار افت فشار افزایش پیدا می کند که نشان دهنده کاهش آنگذری با بازشدگی است. همچنین این نتایج نشان می دهد که در هر یک از بازشدگی های ثابت، تغییر زبری سطوح شکستگی باعث افزایش مقدار افت فشار جریان سیال می گردد و با افزایش دبی جریان این اختلاف به طور غیرخطی افزایش می یابد، ولی در بازشدگی کوچک تر این تغییرات بزرگ تر است. در سرعت های کم جریان سیال زبری سطح شکستگی باعث پیچ و خم دار شدن مسیر جریان سیال می گردد و این مسئله باعث افت فشار جریان سیال می شود. با افزایش دبی با توجه به ثابت بودن سطح مقطع شکستگی سرعت افزایش می یابد. در سرعت های بالا جریان افت فشار به مغشوش بودن سیال هم مرتبط می شود. در بازشدگی های کم به دلیل سطح مقطع کوچکتر شکستگی جریان با سرعت بیشتر حرکت می کند و پیچ و خم داری مسیر هم بیشتر است این دو عامل باعث افزایش افت فشار می شود.

برای مقایسه رابطه مکعب با نتایج مدل سازی عددی، نتایج رابطه مکعب هم در شکل ها آورده شده است. نتایج مدل سازی عددی نشان می دهد که از یک عدد رینولدزی مشخص، رابطه افت فشار با دبی جریان از رابطه خطی منحرف



## ۹. سیاهه‌ی نمادها

جدول ۲. سیاهه‌ی نمادها		
شرح	واحد	نماد
نرخ جریان سیال	$m^3.se^{-1}$	$Q$
فشار سیال	$Pa$	$P$
سطح اعمال نیرو	$m^2$	$A$
عدد رینولدز		$Re$
چگالی آب	$Kg.m^{-3}$	$\rho$
ویسکوزیته سیال		$\mu$
عرض شکستگی	$m$	$w$
ضرایب رابطه	$Pa.s.m^{-4}$ $Pa.s^2.m^{-7}$	$a$ $b$
فورچهمیر		
بازشدگی	$m$	$e_h$
هیدرولیکی		
بازشدگی	$m$	$E$
مکانیکی		

افزایش یافته بنابراین مقادیر بیشتری برای ضریب  $b$  می‌بایست انتخاب گردد. افزایش مقدار  $b$  بیانگر کاهش سطح مقطع جریان و افزایش پیچ و خم‌داری مسیر جریان است که با تغییرات انجام شده همخوانی خوبی دارد.

## ۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار اثر هندسه شکستگی بر رفتار غیرخطی جریان سیال در شکستگی زیر سه بعدی بررسی شده و از روش عددی حجم محدود برای حل جریان سیال در شکستگی سنگی استفاده شده است. نتایج مهم بدست آمده از این پژوهش به شرح ذیل است:

- مقایسه بین نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمون آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این مدل عددی به خوبی قادر است رفتار جریان سیال در یک شکستگی زیر را شبیه‌سازی کند.
- مقایسه‌ی بین نتایج تخمین زده شده توسط قانون مکعب و نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که قانون مکعب مقادیر بزرگتری را برای آب‌گذری برآورد می‌کند.
- با استفاده از نتایج مدل عددی مشخص شد که رابطه بین نرخ جریان با افت فشار به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. برازش غیرخطی از نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که رابطه فورچهمیر به خوبی قادر است رفتار غیرخطی را توصیف کند. مقادیر ضرایب خطی و غیرخطی معادله فورچهمیر برای هر یک از هندسه‌ها برآورد شده است.
- تغییرات هر دو ضریب خطی و غیرخطی نسبت به تغییر بازشدگی مورد بررسی قرار گرفته است و با افزایش بازشدگی از ۰/۵ به ۰/۲ میلی‌متر مقادیر  $a$  از  $10^{12} \times 3$  به  $10^{10} \times 3$  (۱۰۰ درصد) و مقدار  $b$  از  $10^{18} \times 4$  به  $10^{16} \times 3$  (۱۳۳ درصد) کاهش یافته است.

## ۸. سپاس‌گزاری

از شرکت پایانه‌های نفتی ایران به عنوان حامی مالی این پژوهش قدردانی می‌شود.

## مراجع

- Crandall, D., Bromhal, G., & Karpyn, Z. T. (2010). Numerical simulations examining the relationship between wall-roughness and fluid flow in rock fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(5), 784–796. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.03.015>
- Javadi, M., Sharifzadeh, M., & Shahriar, K. (2010). A new geometrical model for non-linear fluid flow through rough fractures. *Journal of Hydrology*, 389(1–2), 18–30. <http://doi.org/10.1016/j.jhydro.2010.05.010>
- Kong, B., & Chen, S. (2018). Numerical simulation of fluid flow and sensitivity analysis in rough-wall fractures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168, 546–561. <http://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.04.070>
- Koyama, T., Li, B., Jiang, Y., Jing, L., Engineering, R., Koyama, T., & Engineering, W. R. (2009). Numerical modelling of fluid flow tests in a rock fracture with a special algorithm for contact areas. *Computers and Geotechnics*, 36(1–2), 291–303. <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.02.010>
- Koyama, T., Neretnieks, I., & Jing, L. (2008). 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. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(7), 1082–1101. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.11.006>
- Lee, H. S., & Cho, T. F. (2002). Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 35(4), 299–318. <http://doi.org/10.1007/s00603-002-0028-y>
- Li, B., Jiang, Y., Koyama, T., Jing, L., & Tanabashi, Y. (2008). Experimental 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(3), 362–375. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.06.004>
- Lin, M., Chen, S., Ding, W., Chen, Z., & Xu, J. (2015). Effect of fracture geometry on well production in hydraulic-fractured tight oil reservoirs. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 54(3), 183–194. <http://doi.org/10.2118/167761-PA>
- Nasri, M. J., Ramezanzadeh, A., & Jenabi, H. (2019). Laboratory investigation nonlinear flow characteristics through natural rock fractures. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, qjegh2017-142. <http://doi.org/10.1144/qjegh2017-142>
- Nazridoust, K., Ahmadi, G., & Smith, D. H. (2006). A new friction factor correlation for laminar, single-phase flows through rock fractures. *Journal of Hydrology*, 329(1–2), 315–328. <http://doi.org/10.1016/j.jhydro.2006.02.032>
- Nowamooz, A., Radilla, G., & Fourar, M. (2009). Non-Darcian two-phase flow in a transparent replica of a rough-walled rock fracture. *Water Resources Research*, 45(7), W07406. <http://doi.org/10.1029/2008WR007315>
- Ranjith, P. G., & Darlington, W. (2007). Nonlinear single-phase flow in real rock joints. *Water Resources Research*, 43(9), 1–9. <http://doi.org/10.1029/2006WR005457>
- Sharma, M. M., & Manchanda, R. (2015). The Role of Induced Un-propped (IU) Fractures in Unconventional Oil and Gas Wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston,

Texas, USA: Society of Petroleum Engineers. <http://doi.org/10.2118/174946-MS>

- Zhang, Z., & Nemeik, J. (2013). Fluid flow regimes and nonlinear flow characteristics in deformable rock fractures. *Journal of Hydrology*, 477, 139–151. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.024>
- Zhou, J. Q., Hu, S. H., Fang, S., Chen, Y. F., & Zhou, C. B. (2015). Nonlinear flow behavior at low Reynolds numbers through rough-walled fractures subjected to normal compressive loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, 202–218. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.09.027>
- Zimmerman, R. W., Al-Yaarubi, A., Pain, C. C., & Grattoni, C. A. (2004). Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(SUPPL. 1). <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.03.036>
- Zimmerman, R. W., & Bodvarsson, G. S. (1996). Effective transmissivity of two-dimensional fracture networks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(4), 433–438. [http://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00067-4](http://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00067-4)
- Zimmerman, R., & Yeo, I. (2000). Fluid Flow in Rock Fractures: From the Navier- Stokes Equations to the Cubic Law. *Dynamics of Fluids in Fractured Rock*, 213–224. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/GM122p0213/summary>
- Zoorabadi, M., Saydam, S., Timms, W., & Hebblewhite, B. (2015). Non-linear flow behaviour of rough fractures having standard JRC profiles, 76, 192–199. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.03.004>