

بررسی جریان غیرخطی در شکستگی‌های سنگی با دیواره زبر

مصطفی شریف زاده^{۱*}؛ مرتضی جوادی اصطهباناتی^۲؛ کورش شهریار^۳

چکیده

در بسیاری از ساختارهای زمین شناسی، نفوذپذیری ماتریکس سنگ در مقایسه با شکستگی های توده سنگ ناچیز است و شکستگی ها مسیر اصلی جریان سیال در توده سنگ هستند. رفتار جریان سیال درون شکستگی به دلیل افزایش کارایی مطالعات طراحی، اجرا و ایمنی سازه های زیرزمینی و روباز به عنوان یک موضوع مهم تحقیقاتی تلقی می شود. در این مقاله، جریان سیال یک فاز درون شکستگی های سنگی مطالعه شده است. دامنه محاسباتی یک شکستگی فرضی سه بعدی تولید شده و شبیه سازی جریان آرام و آشفته برای دامنه گسترده ای از سرعت های ورودی جریان و با استفاده از روش حجم محدود انجام شده است. افت فشار در بین مقاطع قائم متوالی در داخل شکستگی محاسبه شده و برای توصیف ارتباط بین دبی و افت فشار ناشی از جریان سیال استفاده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که: (۱) افت فشار استاتیک پیش بینی شده با شبیه سازی جریان آشفته برای محدوده عدد رینولدز ۴/۵ تا ۸۹/۵ به ترتیب ۳٪ تا ۱۷٪ بیشتر از مقادیر پیش بینی شده با شبیه سازی جریان آرام است؛ (۲) قانون فورچی میر به خوبی با نتایج شبیه سازی جریان مطابقت دارد و رینولدز بحرانی ۱۵ برای جریان غیر خطی پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی

جریان غیر خطی، شبیه سازی جریان سیال، جریان آرام و آشفته، قانون فورچی میر، شکستگی های سنگی.

Evaluation of Non-linear Fluid Flow Through Rough-walled Fractures

M. Sharifzadeh, M. Javadi, K. Shahriar

ABSTRACT

In many geological structures, the matrix permeability is negligible and the fractures are the main flow paths. The fluid flow and particle transport through rock fracture are increasingly important research topics mainly to the demands for design, operation and safety assessments of underground/ surface constructions. In this paper, single-phase fluid flow through a rock fracture is studied. Computational domain for an artificial three-dimensional fracture is generated and used for numerical fluid flow simulations. Both laminar and turbulent flow simulations are performed by using finite element method for a wide range of inlet velocities. The calculated average pressure drops, between consecutive vertical sections are compared to describe the flow rate dependant pressure drop. The simulation results show that; (i) the predicted static pressure drop for turbulent flow simulation was roughly 3% to 17% more than laminar simulation at Reynolds number of 4.5 to 89.5, respectively, and (ii) the Forchheimer law is fitted very well to flow simulation results and critical Reynolds number of 15 is suggested.

KEYWORDS : Non-linear fluid flow, Fluid flow simulation, Turbulent and laminar flow, Forchheimer law, Rock fractures.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۲/۱

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۱۱/۲۸

^{۱*} نویسنده مسئول و استادیار دانشگاه صنعتی امیر کبیر: sharifzadeh@aut.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیر کبیر: ttsco@aut.ac.ir

^۳ دانشیار دانشگاه صنعتی امیر کبیر: k.shahriar@aut.ac.ir

با استفاده از قانون فورچی میر بیان شده است [۴،۳۰،۳۳] که ارتباط بین افت فشار و دبی جریان عبوری از شکستگی را به صورت یک چند جمله ای درجه ۲ پیشنهاد می‌کند.

هر چند مطالعات بالا فهم و سطح دانش ما را در رفتار غیرخطی جریان بهبود بخشیده اند، تاکنون مطالعات چندانی روی حل عددی معادله ناویراستوکس برای جریان آشفته برای شکستگی سه بعدی انجام نشده است؛ در این مقاله این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مطالعه، ابتدا یک دامنه هندسی سه بعدی از یک شکستگی مصنوعی با دهانه متغیر ساخته شده است. دامنه محاسباتی برای این شکستگی سه بعدی با استفاده از نرم افزار GAMBITTM تولید شده و شبیه سازی جریان سیال در داخل این شکستگی برای جریان آشفته و آرام انجام شده است. هر دو روش شبیه سازی جریان آرام و آشفته برای جریان سیال در داخل شکستگی به صورت سه بعدی با روش حجم محدود برای محدوده وسیعی از دبی جریان حجمی و با استفاده از نرم افزار FLUENTTM انجام شده است. نتایج شبیه سازی های جریان مورد بررسی قرار گرفته، بر اساس نتایج شبیه سازی جریان آشفته، رفتار غیر خطی جریان بررسی شده است.

۲- معادلات حاکم بر جریان

توصیف کلی جریان سیال درون یک شکستگی با استفاده از روابط ناویر استوکس (NS) ارائه می‌شود که بیان کننده تعادل مومنتوم و جرم در داخل فضای خالی شکستگی است. با در نظر گرفتن جریان آرام و پایا و یک سیال نیوتنی با دانسیته و ویسکوزیته ثابت در داخل شکستگی با دیواره های نفوذناپذیر، معادلات (NS) را می‌توان به صورت برداری به صورت زیر نوشت [۳۰].

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \mu \nabla^2 u - \nabla p, \quad (1)$$

که ρ دانسیته سیال، μ ویسکوزیته سیال، u بردار سرعت جریان و p فشار هیدرودینامیک است. رابطه (۱) از یک مجموعه معادلات مشتقات جزئی غیر خطی با درجه های مختلف تشکیل شده است [۳۳]. برای اینکه یک سیستم بسته از معادلات داشته باشیم، لازم است که این معادلات با معادله پیوستگی (که بیان کننده تعادل جرم است) ترکیب شوند [۱]. برای یک سیال تراکم ناپذیر، معادله تعادل جرم با معادله تعادل حجم معادل است و به شکل زیر در می‌آید [۳۱].

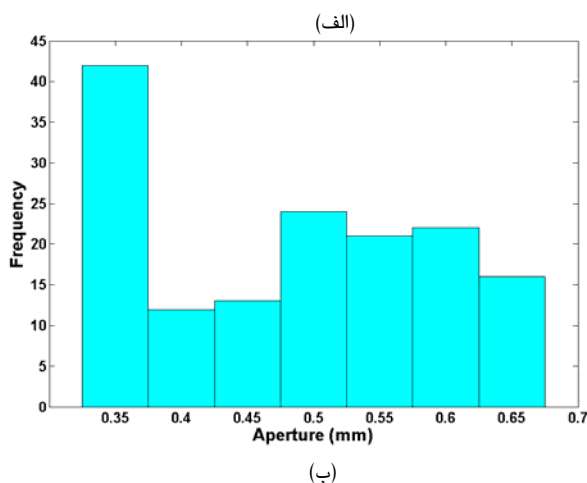
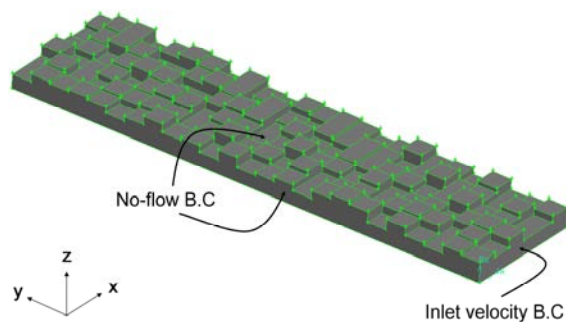
$$\nabla \cdot u = 0. \quad (2)$$

شرایط مرزی متناسب با معادلات NS شامل شرایط مرزی جریان بدون لغزش^۱ است که بردار سرعت سیال روی مرز

در بسیاری از ساختارهای زمین شناسی، نفوذپذیری ماتریکس سنگی در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی های موجود در توده سنگ بسیار ناچیز است. در این حالت رفتار هیدرولیک توده سنگ به وسیله شکستگی ها کنترل می‌شود و برآورد رفتار هیدرولیک توده سنگ نیازمند فهم مناسبی از رفتار هیدرولیک شکستگی و شبکه شکستگی ها است. با به کارگیری مدل هیدرولیکی مناسب برای بررسی رفتار هیدرولیکی توده سنگ اطراف حفریات زیرزمینی مثل تونل، مخازن دفن زباله های هسته ای و مغارهای زیرزمینی، می‌توان دقت مطالعات طراحی و ایمنی را افزایش داد.

رفتار جریان سیال درون شکستگی ها، در مقیاس میکروسکوپی با استفاده از معادلات مشتقات جزئی غیر خطی ناویر استوکس بیان می‌شود [۱] که در حالت کلی حل این معادلات بسیار مشکل است و همچنین پیچیدگی هندسه شکستگی بر مشکلات کار با این روابط می افزاید. مطالعات اولیه برای تعمیم قانون مکعب (دارسی) به شکستگی های واقعی با استفاده از روابط تجربی انجام شده است [۲،۳]. رابطه مکعب به طور گسترده برای بررسی رفتار جریان سیال در شکستگی استفاده شده که به سبب شرایط هندسی ایده آل مورد استفاده در این رابطه، پژوهشگران مختلف از پروفیل های هندسی با دیواره های موازی غیر صفحه ای مثل دندان اره ای [۴،۵] سینوسی [۴] و پله ای [۶-۱۱] استفاده نموده اند که در این حالت رفتار هیدرولیک شکستگی با استفاده از ترم دهانه موثر بیان می شود. با پیشرفت توان محاسباتی، روش های عددی حل معادلات جریان برای بررسی رفتار هیدرولیک شکستگی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷-۱۲]. معادله رینولدز به طور گسترده ای برای بیان رفتار هیدرولیک شکستگی با دیواره های زبر مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲-۱۸] و محققین مختلفی اعتبار این معادله را بررسی نموده اند [۲۷-۲۳]. در هر حال معادله رینولدز فقط برای جریان آرام در شکستگی معتبر بوده، نیازمند شرایط خاص هندسی و سینماتیکی از شکستگی و جریان سیال است [۲۶-۱،۲۴]. رژیم های جریان و جریان غیرخطی در شکستگی توسط پژوهشگران مختلف به صورت تجربی [۲،۳] آزمایشگاهی [۲۸] و عددی [۳،۲۹] مورد بررسی قرار گرفته است و به دلیل پایین بودن کارایی معادله رینولدز، در مطالعات اخیر از حل عددی معادله ناویر استوکس برای بررسی جریان سیال در شکستگی استفاده شده است [۳۲-۲۹]. رفتار غیر خطی جریان درون شکستگی در بسیاری از مطالعات

هندسی شکستگی، شرط مرزی جریان خروجی^۱ فرض شده است. بقیه سطوح جامد دامنه (مرزهای شکستگی) به صورت دیواره های نفوذناپذیر با شرط مرزی بدون جریان تعریف شده اند. شبیه سازی جریان در داخل شکستگی سه بعدی برای محدوده سرعت ورودی از ۰/۰۱ m/s تا ۰/۲ m/s (برای شبیه سازی جریان آرام) و از ۰/۰۱ m/s تا ۱ m/s (برای شبیه سازی جریان آشفته) انجام شده است.



شکل (۱): دامنه هندسی استفاده شده برای شبیه سازی جریان، الف) پروفیل سه بعدی به همراه شرایط مرزی، ب) فراوانی دهانه دامنه هندسی.

۴- نتایج شبیه سازی

برای انتخاب روش شبیه سازی و تعیین رژیم جریان حاکم بر مسئله، ابتدا هر دو روش شبیه سازی جریان آرام و آشفته برای شبیه سازی جریان سیال درون شکستگی و برای سرعت ورودی جریان با مقادیر مختلف از ۰/۰۱ m/s تا ۰/۲ m/s مورد استفاده قرار گرفته اند. مقادیر افت فشار استاتیک ناشی از جریان سیال درون شکستگی با استفاده از تفاضل مقادیر فشار استاتیک در ورودی و خروجی جریان، برای هر یک از

جامد بایستی با بردار سرعت مرز جامد برابر باشد [۱].

۳- شبیه سازی عددی

روش حجم محدود برای حل معادلات NS و پیوستگی برای یک مسأله سه بعدی به کار گرفته شده است. شبیه سازی مستقیم عددی DNS^۲ و شبیه سازی RANS^۳ به ترتیب برای شبیه سازی جریان آرام و آشفته به کار گرفته شده اند. حل عددی معادلات NS برای جریان آشفته بسیار مشکل است و به دلیل ساختارهای بسیار کوچکی که در جریان آشفته وجود دارند، برای رسیدن به حل معادله بایستی از مش بندی بسیار ریز استفاده شود؛ این موضوع باعث افزایش شدید زمان محاسبات می شود. برای چیره شدن بر این مشکل، از معادلات میانگین گیری شده در زمان (در این مطالعه از روش RANS) به همراه مدل آشفته $k-\epsilon$ استفاده شده است.

۳-۱- هندسه مدل و شرایط مرزی

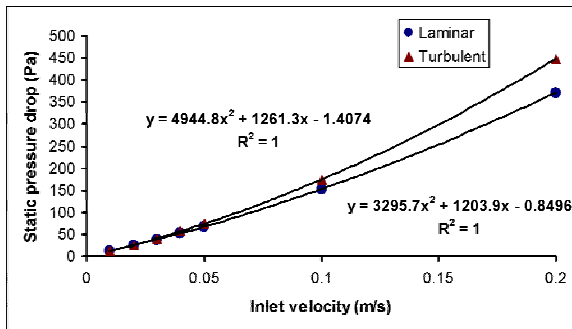
دامنه هندسی سه بعدی از یک شکستگی مصنوعی با عرض ۳ mm و طول ۱۲/۵ mm (به ترتیب در راستای x, y) برای شبیه سازی جریان سیال استفاده شده است. برای ارزیابی تاثیر دهانه و زبری سطوح روی جریان سیال در داخل فضای خالی، دیواره پایین شکستگی صاف و دیواره بالایی به صورت خیلی زبر (شکل ۱-الف) در نظر گرفته شده است. فضای خالی سه بعدی به صورت مجموعه ای از المان های حجمی روی صفحه x-y با فواصل یکنواخت Δx و Δy (برابر با ۰/۵ mm) و دهانه متغیر (z) ساخته شده است. دامنه هندسی شکستگی از ۱۵۰ عدد المان حجمی (۶ ردیف و ۲۵ ستون) تشکیل شده است که ارتفاع هر یک از این المان های حجمی (در راستای z) نشان دهنده مقدار دهانه است.

دهانه شکستگی از مقدار مینیمم ۰/۲۵ mm تا مقدار ماکسیمم ۰/۶۵ mm تغییر می کند و مقدار متوسط و انحراف استاندارد آن به ترتیب ۰/۴۸۵ mm و ۰/۱۰۶ mm است. شکل (۱-ب) فراوانی آماری دهانه شکستگی را نشان می دهد. شبکه المان های محاسباتی با ۸۹۰۰۰۰ مش تتراهدرال ایجاد شده و شبیه سازی ها برای سیال آب با چگالی $998/2 \text{ kg/m}^3$ و ویسکوزیته $0/01 \text{ kg/ms}$ بدون در نظر گرفتن تاثیر گرانش انجام شده است. شرط مرزی سرعت ورودی^۱ برای ناحیه ورودی دامنه استفاده شده است. سرعت ورودی به صورت یکنواخت و در راستای y در نظر گرفته شده و یک مقدار کوچک شدت آشفتگی^۲ برابر با مقدار (۱٪) برای همه شبیه سازی های جریان آشفته فرض شده است. برای خروجی جریان در دامنه

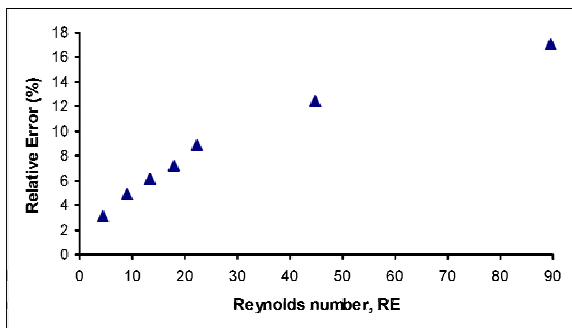
کلی با استفاده از قانون فورچی میر^۷ و به صورت زیر بیان می‌شود [۴،۳۱].

$$\Delta p = AQ + BQ^2, \quad (4)$$

در این رابطه Δp افت فشار، A و B ضرایب ثابت و Q نشان دهنده دبی جریان سیال در جهت گرادیان فشار اصلی است. ضرایب A و B به صورت تجربی تعیین می‌شوند و به سیال و محیط انتقال جریان وابسته هستند و فقط برای محدوده جریان داده شده معتبرند [۳۱]. با توجه به اینکه نتایج شبیه‌سازی آشفته برای سرعت های ورودی کوچک، دارای اختلاف نسبتاً کوچک با نتایج شبیه سازی آرام است و رژیم جریان در سرعت های ورودی بزرگتر به صورت آشفته است، برای ادامه بررسی ها از نتایج شبیه سازی آشفته استفاده شده است. علاوه بر سرعت های ورودی شرح داده شده در بالا، شبیه سازی جریان آشفته برای سرعت های ورودی 0.5 m/s و 1 m/s نیز انجام شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۲): مقایسه شبیه سازی جریان آرام و آشفته، (الف) مقادیر افت فشار استاتیک برای سرعت های ورودی مختلف جریان، (ب) خطای نسبی بین افت فشار استاتیک محاسبه شده با دو روش مختلف با توجه به عدد رینولدز

در حالت کلی شروع رفتار غیر خطی جریان در بسیاری از مطالعات با استفاده از عدد رینولدز بحرانی توصیف شده است. زیرمن و همکاران (۲۰۰۴) عدد رینولدز بحرانی را به صورت

سرعت‌های ورودی و برای هر دو روش شبیه سازی جریان آرام و آشفته محاسبه شده اند. این مقادیر افت فشار استاتیک به صورت نموداری و نسبت به سرعت ورودی جریان رسم شده و در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. برای مقایسه این دو روش، خطای نسبی بین نتایج شبیه سازی ها به صورت تفاضل بین افت فشار های استاتیک پیش بینی شده با آشفته و آرام نسبت به افت فشار استاتیک پیش بینی شده با روش آشفته محاسبه شده است. ارتباط بین مقادیر خطای نسبی و عدد رینولدز در شکل (۲-ب) نشان داده شده است؛ مقادیر عدد رینولدز برای جریان سیال در داخل شکستگی با استفاده از رابطه زیر تعیین شده است [۳۱].

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

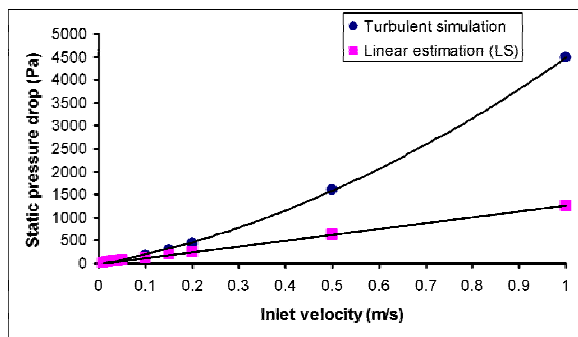
در رابطه فوق، Q دبی حجمی جریان عبوری از شکستگی و w عرض شکستگی است. همان گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، شبیه سازی جریان آشفته، افت فشار استاتیک بیشتری را نسبت به شبیه سازی جریان آرام پیش بینی می‌کند. در مقادیر کوچک سرعت ورودی، اختلاف بین نتایج شبیه سازی جریان آرام و آشفته نسبتاً کوچک است که با افزایش سرعت ورودی جریان خطای نسبی بین دو روش شبیه سازی افزایش می‌یابد؛ به طوری که مقدار خطای نسبی از مقدار تقریباً $3/1\%$ برای سرعت ورودی 0.1 m/s به مقدار $17/3\%$ برای سرعت ورودی 0.2 m/s می‌رسد. مقایسه این مقادیر خطای نسبی افت فشارهای استاتیک نشان می‌دهد که رژیم جریان حاکم بر مسأله در مقادیر کوچک سرعت ورودی جریان به صورت جریان آرام است و با افزایش سرعت ورودی جریان، رژیم جریان از حالت آرام خارج شده، به سمت رژیم جریان آشفته میل می‌کند. برازش منحنی بین افت فشار های استاتیک پیش بینی شده برای هر دو روش شبیه سازی انجام شده است. برای نتایج شبیه سازی آرام، از دو نوع منحنی خطی و چند جمله ای درجه ۲ استفاده شده است. برازش معادله خطی برای این نتایج با خطای زیادی همراه است و نتایج آن نشان داده نشده است (مقدار جمله باقیمانده با استفاده از برازش خطی در حدود $21/3\%$ است که بایستی این مقدار به سمت صفر میل کند). بهترین معادله برازش برای نتایج شبیه سازی آرام به صورت چند جمله ای درجه ۲ با ضریب برازش $R^2=1$ به دست آمده است که در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. همچنین برای نتایج حاصل از شبیه سازی آشفته از چند جمله ای درجه ۲ استفاده شده و نتایج آن در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. این نوع رفتار غیر خطی جریان در حالت

درون شکستگی، تعداد ۱۲۶ مقطع قائم (نرمال بر جریان اصلی) و به فاصله ۱۰۰ μm درون شکستگی در نظر گرفته شده است. متوسط فشار کلی روی هر مقطع قائم (\bar{p}_i) برای هر یک از سرعت های ورودی جریان محاسبه شده است. فضای بین هر دو مقطع قائم متوالی به عنوان یک شکستگی فرعی تعریف شده است که مقادیر دهانه هر یک از شکستگی های فرعی در راستای x (عمود بر جهت جریان اصلی) متغیر و در راستای y (نرمال بر جهت جریان اصلی) ثابت است. مقدار افت فشار کلی برای هر شکستگی فرعی به صورت $\Delta \bar{p}_j = \bar{p}_i - \bar{p}_{i+1}$ محاسبه شده است (ارتباط بین اندیس مقاطع قائم و شکستگی فرعی به صورت $i = j$ است) و نتایج آن در شکل (۴) نشان داده شده است. همان گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، مقادیر افت فشار کلی برای شکستگی های فرعی که به طور متوالی قرار گرفته اند، در طول شکستگی به صورت گراف های شبه موجی ظاهر شده اند. در ز هایی که مضرب صحیحی از عدد ۵ هستند، یک پیک ناگهانی در مقادیر افت فشار کلی مشاهده می شود که این پیک های ناگهانی، برای همه سرعت های ورودی ظاهر شده است.

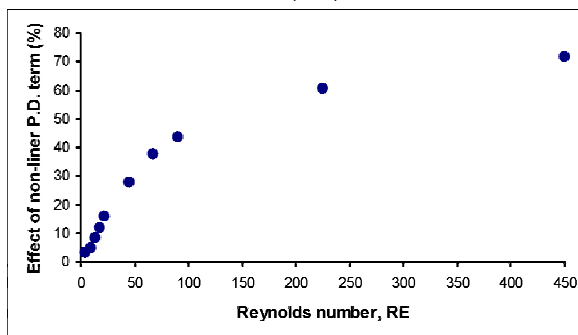
تغییرات افت فشار کلی برای شکستگی های فرعی را می توان با استفاده از دامنه هندسی شکستگی تحلیل نمود. در دامنه هندسی استفاده شده برای شبیه سازی جریان (شکل ۱-الف)، مقادیر دهانه روی یک شبکه منظم مربعی توزیع شده است که در راستای y و در مقادیر ۰/۵، ۱، ۱۲/۵، ...، ۱۲/۵ mm است. بین دو شکستگی مقادیر دهانه به طور ناگهانی تغییر می کند. بین دو شکستگی فرعی متوالی که قبل و بعد از تغییرات ناگهانی دهانه واقع شده اند (بعد از این به صورت شکستگی های فرعی SA نامیده می شوند)، سطح مقطع جریان به طور ناگهانی تغییر می کند. در بقیه شکستگی های فرعی متوالی دهانه وجود ندارد و این شکستگی های فرعی NA نامگذاری شده اند. مقادیر افت فشار کلی برای شکستگی های فرعی برای شکستگی های فرعی NA تقریباً دارای تغییرات کوچک است و با کاهش سطح مقطع شکستگی فرعی، افت فشار کلی افزایش می یابد؛ این افت فشار به دلیل تاثیر ویسکوزیته سیال (افت فشار ویسکوز) به وجود می آید.

در شکستگی های فرعی SA مقادیر افت فشار کلی به طور ناگهانی افزایش می یابد و علاوه بر افت فشار ویسکوز، یک افت فشار موضعی به مقادیر افت فشار کلی اضافه می شود. این تغییرات ناگهانی افت فشار به خوبی در شکل (۴) و برای شکستگی های فرعی با ز هایی که مضرب صحیحی از عدد ۵ هستند، مشاهده می شود. همان گونه که در شکل (۴) نشان داده

مقداری از عدد رینولدز که تاثیر ترم غیر خطی افت فشار بیشتر از ۱۰٪ افت فشار کل را شامل شود، تعریف کرده اند [۳۱] در نتیجه برای محاسبه رینولدز بحرانی بایستی سهم ترم غیرخطی از کل افت فشار محاسبه شود. برای محاسبه سهم ترم غیر خطی افت فشار، یک تقریب خطی از ارتباط بین افت فشار و دبی جریان عبوری از شکستگی در نظر گرفته شده است. این تقریب خطی با استفاده از افت فشار پیش بینی شده با شبیه سازی جریان آرام برای سرعت های ورودی ۰/۰۱ m/s و ۰/۰۲ m/s در نظر گرفته شده و تحت عنوان (LS) نامگذاری شده است (شکل ۳-الف). سهم ترم غیر خطی افت فشار با استفاده از تفاوت بین افت فشار استاتیک پیش بینی شده با شبیه سازی جریان آشفته و تقریب خطی LS محاسبه شده است که نتایج آن در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. با توجه به تعریف رینولدز بحرانی شرح داده شده و شکل (۳-ب)، برای جریان در شکستگی مورد نظر، مقدار عدد رینولدز بحرانی برابر با ۱۵ محاسبه شده است.



(الف)



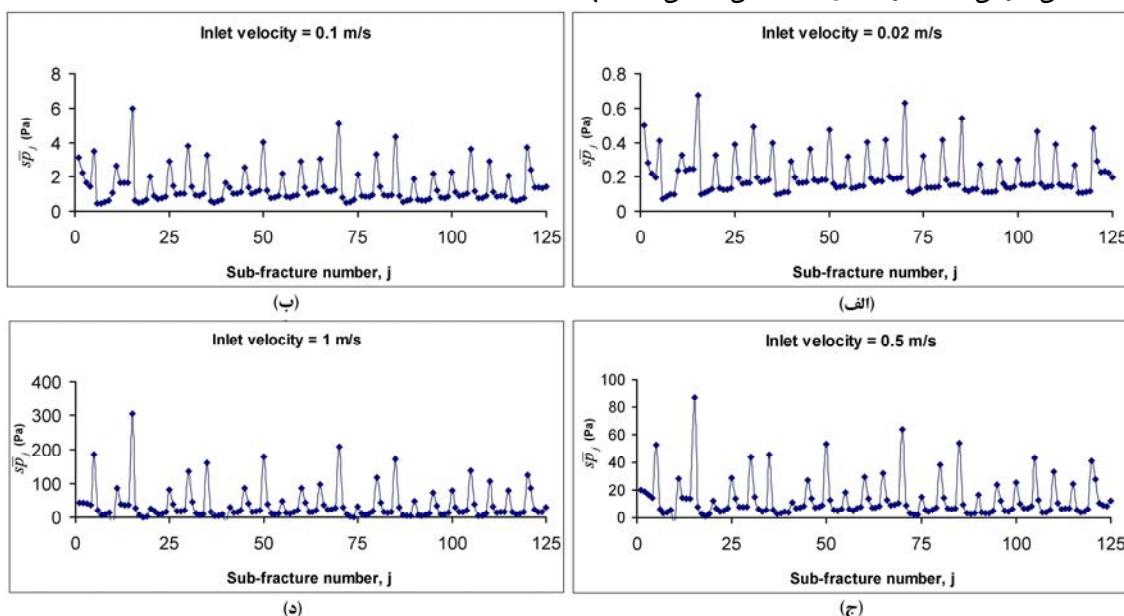
(ب)

شکل (۳): مقایسه نتایج شبیه سازی جریان آشفته و تقریب خطی (LS)، (الف) مقادیر افت فشار استاتیک برای سرعت های ورودی مختلف جریان، (ب) سهم ترم غیر خطی افت فشار با توجه به عدد رینولدز.

برای بررسی تاثیر تغییرات دهانه بر روی افت فشار کلی

شده‌اند. برای هر کدام از این شکستگی های فرعی، مقادیر افت فشار کلی در سرعت های ورودی مختلف محاسبه شده است و نسبت به سرعت ورودی جریان، به ترتیب در شکل های (۵) و (۶) نشان داده شده اند.

شده است، با افزایش سرعت ورودی جریان، هر دو مولفه افت فشار ویسکوز و افت فشار موضعی افزایش می‌یابند. برای بررسی تاثیر سرعت ورودی جریان بر روی مقادیر افت فشار کلی در شکستگی های فرعی، تعداد سه شکستگی فرعی NA و سه شکستگی فرعی SA در داخل شکستگی اصلی انتخاب

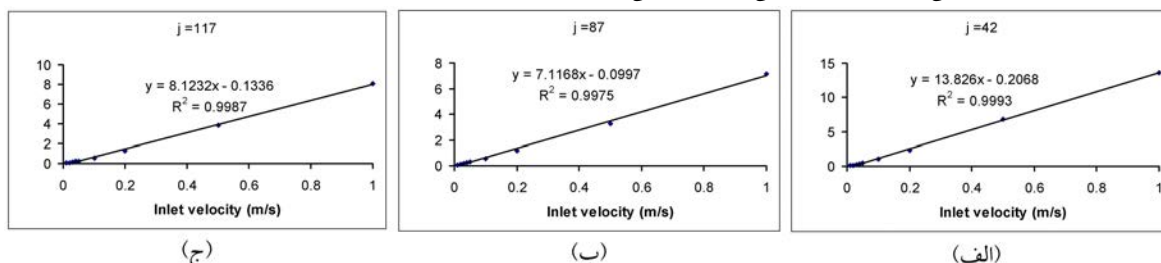


شکل (۴): تغییرات افت فشار کلی برای شکستگی های فرعی برای شبیه سازی جریان آشفته و سرعت های ورودی: الف) ۰/۰۲ m/s، ب) ۰/۱ m/s، ج) ۰/۵ m/s، د) ۱ m/s

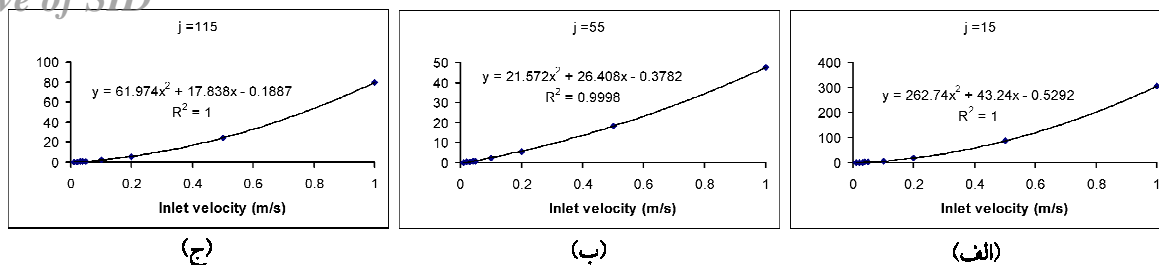
اصلی (شکستگی های فرعی NA) به صورت خطی و در بعضی از قسمت ها (شکستگی های فرعی SA) به صورت چند جمله ای درجه ۲ از سرعت افزایش می‌یابد؛ در نتیجه می‌توان افت فشار کلی در شکستگی اصلی (حاصل جمع افت فشار مربوط به شکستگی های فرعی SA و NA) را به صورت یک چند جمله ای درجه ۲ از سرعت بیان کرد که این رفتار غیر خطی جریان با قانون فورچی میر تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

همان گونه که در شکل (۵) نشان داده شده است، برای شکستگی های فرعی NA، با افزایش سرعت ورودی جریان، افت فشار کلی به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. در شکستگی های فرعی SA با افزایش سرعت ورودی جریان، افت فشار کلی به صورت یک چند جمله ای درجه ۲ از سرعت، افزایش می‌یابد (شکل ۶).

با توجه به موارد مطرح شده در بالا و بر اساس نتایج شبیه سازی (شکل ۵ و ۶) می‌توان گفت که با افزایش سرعت ورودی جریان، افزایش افت فشار کلی برای قسمت هایی از شکستگی



شکل (۵): تاثیر سرعت ورودی جریان روی افت فشار کلی در شکستگی های فرعی NA با موقعیت: الف) ۴۲=j، ب) ۸۷=j، ج) ۱۱۷=j



شکل (۶): تاثیر سرعت ورودی جریان بر روی افت فشار کلی در شکستگی های فرعی SA با موقعیت: الف) $j=15$ ب) $j=55$ ج) $j=115$

جریان ظاهر می شود. در نتیجه، رابطه بین نرخ جریان و افت فشار به صورت یک رابطه غیر خطی ظاهر می شود. رفتار غیر خطی جریان به نحوی بیان کننده جریان آشفته است؛ از این رو بهتر است برای بررسی این رفتار از شبیه سازی جریان آشفته استفاده شود که در این مقاله انجام شده است. مقایسه نتایج دو روش شبیه سازی جریان آرام و آشفته نشان می دهد که تاثیر رفتار غیر خطی جریان با افزایش عدد رینولدز افزایش می یابد؛ به طوری که مقدار خطای نسبی از مقدار تقریباً ۳/۱٪ برای سرعت ورودی 0.1 m/s به مقدار ۱۷/۳٪ برای سرعت ورودی 0.2 m/s می رسد که این موضوع تأییدی بر لزوم استفاده از شبیه سازی جریان آشفته در شکستگی ها است. نتایج شبیه سازی های انجام شده در این مطالعه نشان می دهد که عدد رینولدز بحرانی برای جریان در شکستگی در مقادیر پایین تر از ۱۵ قابل انتظار است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله جریان سیال درون شکستگی با هندسه سه بعدی با یک دیواره زبر و یک دیواره صاف ایده آل با استفاده از روش حجم محدود و برای دو جریان آرام و آشفته شبیه سازی شده است. مقایسه نتایج شبیه سازی جریان آشفته و آرام با استفاده از افت فشار استاتیک انجام شده و بر اساس این مقایسه برای ادامه بررسی ها از نتایج شبیه سازی جریان آشفته استفاده شده است.

در سرعت های پایین جریان (رینولدز پایین) رفتار سیال در مقیاس میکروسکوپی با رابطه استوکس کنترل می شود و یک ارتباط خطی بین دبی جریان و افت فشار مورد انتظار است. با افزایش سرعت جریان، حرکت ذرات سیال نامنظم شده و در مقطع عرضی تبادل مومنتوم شدیدی بین ذرات سیال به وجود می آید و شتاب های فضایی ناشی از انقباض و انبساط جریان درون شکستگی به دلیل تغییرات سطح مقطع شکستگی در دامنه

۶- مراجع

- | | | | |
|------|---|-----|--|
| [۸] | 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, 2275-2283, 1989. | [۱] | Zimmerman, R. W., Bodvarsson, G. S; "Hydraulic conductivity of rock fractures", Transport Porous Media, 23, 1-30, 1996. |
| [۹] | Walsh, J. B., Brown, S. R., Durham. W. B; "Effective media theory with spatial correlation for flow in a fracture", Journal of Geophysical Research., 102(22), 587-22,594, 1997. | [۲] | Louis, C; "A study of groundwater flow in jointed rock and influence on the stability of rock masses", Imp coll. of London rock mech., Res. Rep. 10, 90, 1969. |
| [۱۰] | Bear, J., Tsang, C. F., De Marsily, G; "Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock", Academic Press, San Diego, 1993. | [۳] | Lomize, G.M; "Filtratsia v treshchinovatykh porodakh (Seepage in Jointed Rocks)", Gosudarstvennoe Energeticheskoe Izdatel'stvo, Moskva-Leningrad, 1951. |
| [۱۱] | Tsang, Y. W., Witherspoon, P. A; "Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress", J. Geophys. Res., 86, 9287-9298, 1981. | [۴] | Elsworth, D., Goodman, R. E; "Characterization of rock fissure hydraulic conductivity using idealized wall roughness profiles", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 23, 233-243, 1986. |
| [۱۲] | Tsang, Y. W; "The effect of tortuosity on fluid flow through a single fracture", Water Resources Research., 20(9), 1209-1215, 1984. | [۵] | Wilson, C. R., Witherspoon, P. A; "Steady state flow in rigid networks of fractures", Water Res. Res., 10, 328-335, 1974. |
| [۱۳] | Moreno, L., Tsang, Y. W., Tsang, C. F., Hale, F. V., Neretnieks, I; "Flow and tracer transport in a single fracture: a stochastic model and its relation to some field observations" Water Resources Research 24 (12), 2033-2048, 1988. | [۶] | Neuzil, C.E., Tracy, J. V; "Flow Through Fractures", Water Resources Research, 17(1), 191-199, 1981. |
| | | [۷] | Moreno, L., Neretnieks, I., Eriksen, T; "Analysis of some laboratory tracer runs in natural fissures", Water Resources Research, 2 (7), 951-958, 1985. |

- Oron, A. P., Berkowitz, B; "Flow in rock fractures: the local cubic law assumption reexamined", *Water Resources Research*. 34:2811-24, 1998. [۲۴]
- Nicholl, M., Rajaram, J. H., Glass, R., Detwiler, R; "Saturated flow in a single fracture: Evaluation of the Reynolds equation in measured aperture field", *Water Res., Res.*, 35(11), 3361-3373, 1999. [۲۵]
- Ge, S; "A governing equation for fluid flow in rough fractures", *Water Resources Research* 33 (1), 53-61, 1997. [۲۶]
- Yeo, I. W., Ge, S; 'Applicable range of the Reynolds equation for fluid flow in a rock Fracture', *Geosciences Journal* 9 (4), 347-352, 2005. [۲۷]
- Qian, J., Zhan, H., Zhao, W., Sun, F; "Experimental study of turbulent unconfined groundwater flow in a single fracture", *Journal of Hydrology*, 311, 134-142, 2005. [۲۸]
- Koyama, T., Neretnieks, I., 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", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 45, 1082-1101, 2008. [۲۹]
- Zimmerman, R. W., Al-Yaarubi, A. H., Pain, C. C., Grattoni, C. A; "Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 41 (3), 163-169, 2004. [۳۰]
- Nazridoust, K., Ahmadi, G., Smith, D. H; "A new friction factor correlation for laminar, single-phase flows through rock fractures", *Journal of Hydrology* 329, 315- 328, 2006. [۳۱]
- Brush, D., Thomson, N. R; "Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes, and local cubic law simulations", *Water Resources Research* 39 (4), 1085-1099, 2003. [۳۲]
- Chen, Z. X., Lyons, S. L., Qin, G; "Derivation of the Forchheimer law via homogenization", *Transp. Porous Media*, 44, 325-35, 2001. [۳۳]
- Tsang, Y.W., Tsang, C.F; "Flow Channeling in a Single Fracture as a Two- Dimensional Strongly Heterogeneous Permeable Medium", *Water Resources Research*, 25(9), 2076-2080, 1989. [۱۴]
- Piggott, A. R., Elsworth, D; "Laboratory assesment of the equivalent apertures of a rock fracture", *Geophysical Research Letters* 2, 1387-1390, 1993. [۱۵]
- David, C; "Geometry of flow paths for fluid transport in rocks", *Journal of Geophysical Research.*, 98, 12,267-12,278, 1993. [۱۶]
- Brown, S. R; "Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness", *Journal of Geophysical Research* 92 (B2), 1337-1347, 1987. [۱۷]
- Renshaw, C. E; "On the relationship between mechanical and hydraulic apertures in rough-walled fractures", *Journal of Geophysical Research*, 100 (B12), 629-636, 1995. [۱۸]
- Thompson, M. E., Brown, S. R; "The effect of anisotropic surface roughness on flow and transport in fracture", *Journal of Geophysical Research* 96 (B13), 923-932, 1991. [۱۹]
- Brown, S. R; "Transport of fluid and electric current through a single fracture", *Journal of Geophysical Research*, 94, 9429-9438, 1989. [۲۰]
- Koyama, T., Li, B., Jiang, Y., Jing, L; "Numerical simulations for the effects of normal loading on particle transport in rock fractures during shear", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45(5), 1403-1419, 2008. [۲۱]
- Koyama, T., Fardin, N., Jing, L., Stephansson, O; "Numerical simulation of shear-induced flow anisotropy and scale-dependent aperture and transmissivity evolution of rock fracture replicas", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, 89-106, 2006. [۲۲]
- Brown, S.R., Stockman, H.W., Reeves, S.J; "Applicability of the Reynolds equation for modeling fluid flow between rough surfaces", *Geophys. Res. Lett*, 22(18), 2537-2540, 1995. [۲۳]

۷- زیر نویس ها

¹ No-Slip

² Direct numerical simulation

³ Reynolds-averaged Navier-Stokes

⁴ Inlet velocity boundary condition

⁵ Turbulence intensity

⁶ Out flow boundary condition

⁷ Forchheimer law