



## بررسی رفتار غیرخطی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای زبری با تکیه بر شبیه‌سازی سه‌بعدی معادلات ناویه-استوکس

مرتضی جوادی اصطهباناتی \*

استادیار، گروه استخراج دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۳ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۷

DOI:10.22107/jpg.2019.167591.1083

### چکیده

در این مقاله، تأثیر جریان غیرخطی نفت درون شکستگی‌های سنگی بر پارامترهای هیدرولیکی و با هدف ارزیابی انحراف رفتار هیدرولیکی شکستگی‌ها از قانون داری مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، جریان نفت در داخل شکستگی سه‌بعدی دارای دیواره‌های زبر برای دامنه وسیعی از دبی حجمی جریان عبوری و با استفاده از حل عددی هم‌زمان معادلات ناویه-استوکس و پیوستگی به روش حجم محدود شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از این مقاله نشان می‌دهد که جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای رفتار غیرخطی بوده و به همین دلیل، دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری شکستگی، پارامترهای ثابت (مستقل) نبوده و کاملاً به میزان دبی جریان عبوری از شکستگی وابسته هستند. در حقیقت، با افزایش سرعت جریان در داخل شکستگی‌ها، مقادیر دهانه هیدرولیکی شکستگی و نفوذپذیری به‌طور غیرخطی کاهش می‌یابند که مقدار کاهش نسبی این دو پارامتر برای شکستگی‌های مورد مطالعه در این مقاله به ترتیب در بازه ۱۰ و ۲۰ درصد بوده است. همچنین، نتایج حاصل از برازش قوانین داری و فورچی‌میر به نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که رفتار جریان در شکستگی‌های سنگی توسط قانون فورچی‌میر به خوبی توصیف می‌شود به گونه‌ای که دقت قانون فورچی‌میر برای توصیف رفتار جریان نفت در شکستگی مورد بررسی بیش از ۹۸٪ بوده در حالی که خطای قانون داری به بیش از ۲۷٪ نیز می‌رسد.

### واژگان کلیدی

رفتار هیدرولیکی شکستگی  
انحراف از قانون داری  
دهانه هیدرولیکی  
قانون فورچی‌میر

### ۱. پیش‌گفتار

در قریب به اتفاق مخازن هیدروکربوری شکافدار، عمده هیدروکربور تولیدی از داخل شکستگی‌های موجود در سنگ میزبان عبور می‌کند. بدون تردید در این نوع از مخازن، فرآیندهای هیدرولیکی داخل مخزن (اندرکنش سنگ و سیال) توسط شکستگی‌ها کنترل شده و شکستگی‌ها نقش اساسی در رفتار هیدرولیکی مخزن خواهند داشت. بنابراین، مطالعه رفتار هیدرولیکی شکستگی‌ها به‌ویژه در مخازن شکافدار از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

رفتار هیدرولیکی عمده مخازن هیدروکربوری شکافدار توسط شکستگی‌های سنگی کنترل می‌شود (Nelson, 2001)، (Bear, Tsang, & de Marsily, 1993). رفتار جریان سیالات نیوتنی درون شکستگی‌های سنگی و در مقیاس میکروسکوپی با استفاده از معادلات مشتقات جزئی

غیرخطی ناویه-استوکس بیان می‌شود (Javadi et al., 2014). به‌طور کلی حل این معادلات بسیار مشکل بوده و علاوه بر این، پیچیدگی هندسه شکستگی بر مشکلات کار با این روابط می‌افزاید. به دلیل این پیچیدگی‌ها، استفاده از مدل‌های ساده مبتنی بر فرضیات ساده‌کننده (هم در رابطه با معادلات حاکم و هم در رابطه با هندسه سطوح شکستگی) گریزناپذیر خواهد بود. ساده‌ترین مدل برای بیان رفتار جریان سیال درون شکستگی، بر اساس فرضیات ساده‌کننده، شامل صفحات صاف موازی برای سطوح شکستگی و جریان صفحه‌ای پویزیل (Neuzil & Tracy, 1981) بوده؛ که بر این اساس حل تحلیلی معادلات جریان، امکان‌پذیر می‌شود (Zimmerman & Bodvarsson, 1996). ماحصل این حل تحلیلی، تحت عنوان قانون ویا رابطه مکعب شناخته شده (Witherspoon et al., 1980) که به عنوان یک اصل اساسی در مدل‌سازی جریان سیال در مخازن هیدروکربوری شکافدار

استوکس انجام شده است. این موضوع به عنوان هدف اصلی مقاله پیش‌رو و با تمرکز بر قانون فورچی‌میر<sup>۱</sup> و انحراف رفتار هیدرولیکی شکستگی‌های سنگی از قانون دارسی مورد مطالعه قرار گرفته است.

هدف از این مقاله، بررسی تأثیر جریان غیرخطی نفت درون شکستگی‌های سنگی بر پارامترهای هیدرولیکی شکستگی‌های سنگی است. بدین منظور، شبیه‌سازی جریان نفت در داخل شکستگی سه‌بعدی با هندسه‌های متفاوت انجام شده که هندسه شکستگی‌ها، با فرض یکسان بودن تداخل (حجم فضای خالی) و برای شش حالت هندسی مختلف از توزیع دهانه روی پلان و همچنین زبری شکستگی‌ها باز تولید شده است. دامنه محاسباتی برای این شکستگی‌های سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار *GAMBIT*<sup>TM</sup> تولید شده و برای شبیه‌سازی جریان سیال مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه‌سازی جریان سیال در داخل شکستگی به صورت سه‌بعدی با روش حجم محدود برای دامنه وسیعی از دبی حجمی جریان (یا عدد رینولدز) و با استفاده از نرم‌افزار *FLUENT*<sup>TM</sup> انجام شده است. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی جریان از دیدگاه نوع رژیم حاکم بر جریان تحلیل شده و تأثیر رفتار غیرخطی جریان بر ترم‌های هیدرولیکی (از قبیل نفوذپذیری و دهانه هیدرولیکی) شکستگی‌های سنگی با دیواره زبر مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. معادلات حاکم بر جریان

از نظر رئولوژیکی، بخش عمده‌ای از سیالات هیدروکربوری و به‌طور خاص بخش عمده‌ای از انواع نفت خام در زمره سیالات نیوتنی قرار می‌گیرند (Rønningsen, 2012). به‌طور کلی رفتار جریان یک سیال نیوتنی در فضای خالی با استفاده از معادلات ناویه-استوکس (تعادل مومنتوم و نیرو) توصیف می‌شود (Sharifzadeh & Javadi, 2017):

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

که در رابطه فوق،  $u$  بردار سرعت،  $\rho$  دانسیته سیال،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیک سیال و  $p$  فشار هیدرودینامیک سیال است. برای حصول یک سیستم بسته از معادلات حاکم، لازم

مورد استفاده قرار می‌گیرد (Sarkar et al., 2002). با توجه به عدم برقراری فرضیات مورد استفاده برای استنتاج رابطه مکعب و به‌طور خاص زبری سطوح شکستگی (Javadi et al., 2010)، اصلاحات متعددی بر روی این رابطه توسط محققین مختلف انجام گرفته است. اولین تلاش‌ها برای اصلاح قانون مکعب، با تکیه بر فرض دیوارهای زبر موازی و پروفیل‌های دندانه اراهی (Wilson & Witherspoon, 1974)، سینوسی (Elsworth & Goodman, 1986)، و یا پله‌ای (Witherspoon et al., 1980; Tsang & Tsang, 1981; Tsang & Witherspoon, 1987) و نهایتاً معرفی ترم اصلاحی تحت عنوان "دهانه مؤثر" انجام شده است. با پیشرفت توان محاسباتی، روش‌های عددی حل معادلات جریان برای بررسی رفتار هیدرولیکی شکستگی‌ها و اصلاح تأثیر زبری شکستگی‌ها بر روی نفوذپذیری مورد استفاده قرار گرفت (David, 1993; Piggott & Elsworth, 1993; Piggott & Elsworth, 1993; David, 1993) (David, 1993)، (Piggott & Elsworth, 1993)، (Brown S. R., 1987) بدین منظور، معادله روغن‌کاری رینولدز به‌طور گسترده‌ای برای محاسبات عددی استفاده شد (Renshaw, 1995)، (Thompson & Brown, 1991)، (Koyama, Fardin, Jing, & Stephansson, 2006)

با این وجود، معادله روغن‌کاری رینولدز فقط برای شرایط خاص هندسی و سینماتیکی از شکستگی و جریان سیال معتبر است (Oron & Berkowitz, 1998; Brown, Stockman, & Reeves, 1995; Nicholl, Rajaram, Glass & Detwiler, 1999; Ge, 1997; Yeo & Ge, 2005). مهم‌ترین محدودیت معادله روغن‌کاری رینولدز، حذف ترم اینرسی از معادلات اصلی جریان بوده (Javadi et al., 2014) که برای رفع این محدودیت، در مطالعات اخیر از حل عددی معادله ناویه-استوکس برای بررسی جریان سیال در شکستگی استفاده شده است (Koyama et al., 2008; Zimmerman et al., 2004; Nazridoust, Ahmadi & Smith, 2006; Brush & Thomson, 2003; Javadi et al., 2012; Sharifzadeh, Javadi & Shahriar, 2010) با این وجود مطالعات اندکی بر روی رفتار غیرخطی (انحراف از قانون دارسی) جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی با دیواره‌های زبر و به‌طور خاص، شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان غیرخطی نفت با استفاده از حل عددی معادلات ناویه-

<sup>1</sup> Forchheimer

بررسی رفتار غیرخطی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای زبری با تکیه بر شبیه‌سازی سه‌بعدی معادلات ناویه-استوکس

### ۳. چارچوب شبیه‌سازی عددی

در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی جریان نفت در داخل شکستگی سه‌بعدی با هندسه‌های متفاوت و برای دامنه وسیعی از دبی جریان (یا عدد رینولدز) انجام شده است. برای ساخت هندسه سه‌بعدی، از نتایج لیزر اسکن یک شکستگی واقعی استفاده شده که بخشی از هندسه این شکستگی واقعی در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. فضای خالی سه‌بعدی شکستگی دارای عرض  $3 \text{ mm}$  و طول  $12/5 \text{ mm}$  (به ترتیب در راستای  $x, y$ ) بوده که به صورت یک مجموعه از المان‌های حجمی بر روی صفحه  $x-y$  و دهانه متغیر ( $z$ ) ساخته شده است. زبری سطوح این شکستگی‌ها به دو صورت مختلف شامل ۱- سطح پایین شکستگی کاملاً صاف و سطح بالا کاملاً زبر و ۲- هر دو سطح بالا و پایین شکستگی زبر و به صورت متقارن در نظر گرفته شده که این دو حالت هندسی به ترتیب *SMD* و *SYM* نام‌گذاری شده‌اند. در این مقاله از شش مدل هندسی مختلف از شکستگی (با نام‌گذاری *CI-SMD*، *CI-SMD*، *CII-SMD*، *CII-SYM*، *CIII-SMD* و *CIII-SYM*) استفاده شده است. لازم به ذکر است، شکستگی‌های مورد استفاده در تحلیل‌های عددی این مقاله کاملاً منطبق بر شکستگی‌های مورد استفاده در مطالعه (Javadi M., 2018) بوده که برای اطلاعات بیشتر در این خصوص به مرجع مذکور مراجعه شود.

شبیه‌سازی جریان نفت در داخل شکستگی به صورت حل عددی هم‌زمان معادلات ناویه-استوکس و پیوستگی با روش حجم محدود و با استفاده از نرم‌افزار *FLUENT<sup>TM</sup>* انجام شده است. با توجه به حضور ساختارهای بسیار کوچک جریان در داخل شکستگی، لازم است برای حل عددی معادلات جریان از مش‌بندی بسیار ریز استفاده شود. بدین منظور، فضای داخل شکستگی‌ها به شبکه المان‌های محاسباتی با حداقل تعداد ۱۲۰۰۰۰۰ مش تتراهدراال و با استفاده از نرم‌افزار *GAMBIT<sup>TM</sup>* تبدیل شده و برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. شرایط مرزی شامل

است که این معادلات با معادله پیوستگی (که بیان‌کننده تعادل جرم است) ترکیب شوند. برای یک سیال غیرقابل تراکم، معادله تعادل جرم با معادله تعادل حجم معادل بوده و به صورت زیر توصیف می‌شود (Zimmerman & Bodvarsson, 1996):

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

رابطه ناویه-استوکس از یک مجموعه معادلات مشتقات جزئی غیرخطی با درجه‌های مختلف تشکیل شده که تاکنون راه‌حل تحلیلی برای آن ارائه نشده است. با صرف‌نظر کردن از ترم اینرسی (ترم غیرخطی) در این رابطه، معادله خطی استوکس حاصل می‌شود (Kitandis & Dykaar, 1997) با فرض صفحات صاف و موازی به عنوان دیواره‌های شکستگی و حل تحلیلی معادله استوکس، یک معادله ساده تحت عنوان "قانون مکعب" به دست می‌آید (Zimmerman & Bodvarsson, 1996):

$$Q = -\frac{wa^3}{12\mu} \nabla p = -\frac{kS_f}{\mu} \nabla p \quad (3)$$

که در رابطه فوق،  $Q$  دبی جریان،  $w$  عرض شکستگی،  $\nabla p$  گرادیان فشار،  $a$  دهانه شکستگی،  $k$  نفوذپذیری شکستگی و  $S_f$  سطح مقطع شکستگی است. رابطه فوق معادل با قانون دارسی بوده که با استفاده از این معادل‌سازی، نفوذپذیری شکستگی به صورت  $k = \frac{a^2}{12}$  تعریف می‌شود. برای بسیاری از شرایط حاکم بر جریان سیال، ارتباط بین دبی و گرادیان رابطه غیرخطی بوده که رایج‌ترین فرم معادلات جریان غیرخطی برای شکستگی‌ها (و محیط متخلخل) با استفاده از قانون فورچی‌میر و به صورت زیر بیان می‌شود (Bear J., 1972):

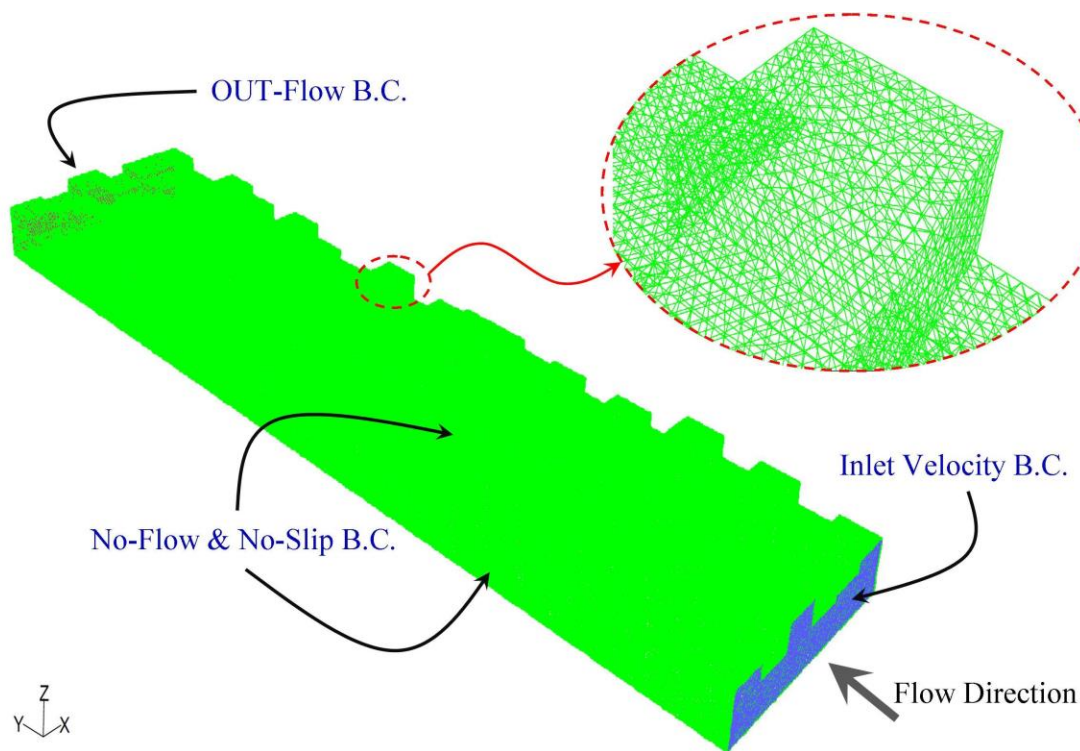
$$-\nabla p = \frac{\mu}{k} Q + \rho \beta Q^2 \quad (4)$$

$$-\nabla p = AQ + BQ^2$$

در رابطه فوق،  $\beta$  ضریب غیردارسی یا مقاومت اینرسی و فاکتورهای  $A$  و  $B$  ضرایب هدر رفت انرژی با مکانیسم ویسکوز و اینرسی هستند.

استفاده شده، لازم است قبل از بررسی نتایج شبیه‌سازی، صحت فرآیند فوق مورد سنجش و ارزیابی قرار گیرد. این بررسی‌ها در دو دسته مختلف شامل ۱- صحت‌سنجی (کنترل درستی محاسبات عددی) و ۲- استقلال نتایج از شبکه (استقلال از نحوه‌ی مش‌بندی شامل تعداد و اندازه المان‌ها) انجام شده است. صحت‌سنجی با استفاده از مدل شکستگی ایده‌آل انجام شده و نتایج آن با حل تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای بررسی استقلال نتایج از شبکه، از تحلیل حساسیت افت فشار استاتیک به تعداد و ابعاد مش و با حد پذیرش خطای ۱٪ انجام شده است. تحلیل‌های مربوط به استقلال از شبکه و صحت‌سنجی محاسبات عددی به‌طور مشابه با (Javadi M., 2018) انجام شده و در نتیجه این موارد در مقاله پیش رو تکرار نشده است.

سرعت ورودی<sup>۲</sup> و جریان خروجی<sup>۳</sup> به ترتیب برای ورودی و خروجی شکستگی اعمال شده است. با توجه به فرض نفوذناپذیر بودن دیواره‌های شکستگی، شرط مرزی بدون جریان<sup>۴</sup> برای سطوح جامد دیواره در نظر گرفته شده است. نمای کلی از هندسه شکستگی *CI-SMD*، شرایط مرزی اعمالی و مش‌بندی دامنه برای مدل سه‌بعدی در شکل ۱ نشان داده شده است. شبیه‌سازی جریان نفت غیراشباع با چگالی نسبی ۰/۸۵ و ویسکوزیته  $cP$  ۱ و با استفاده از روش مستقیم *DNS* انجام شده است. شبیه‌سازی جریان در داخل شکستگی سه‌بعدی برای محدوده وسیعی از دبی جریان ورودی (یا عدد رینولدز) و به‌صورت سرعت ورودی از  $0.1 \text{ m/s}$  تا  $0.2 \text{ m/s}$  انجام شده و فشار نسبی داخل شکستگی در شبیه‌سازی‌ها بیشتر از فشار نقطه حباب لحاظ شده است. با توجه به اینکه در این مقاله از شبیه‌سازی عددی برای تحلیل‌های جریان



شکل ۱. نمای سه‌بعدی از هندسه، شرایط مرزی و مش‌بندی یکی از شکستگی‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی (CI-SMD).

<sup>2</sup> Inlet Velocity

<sup>3</sup> Out Flow

<sup>4</sup> No-Slip

#### ۴. نتایج

در مطالعات مربوط به جریان سیال در شکستگی‌های سنگی، وابستگی فاکتورهای از قبیل افت فشار، نحوه توزیع جریان در صفحه شکستگی و توزیع سرعت سیال به میزان دبی جریان سیال عبوری از شکستگی (معادل با عدد رینولدز) به‌عنوان مهم‌ترین جنبه‌های رفتاری مطرح می‌شود. برای بررسی این جنبه‌های رفتاری، در مرحله اول، افت توزیع فشار استاتیک بر روی صفحه شکستگی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، برای مقادیر مختلف سرعت جریان ورودی (شرایط مرزی)، کانتورهای توزیع فشار استاتیک در شکستگی  $CI$  و برای هر دو مدل هندسی  $SMD$  و  $SYM$  ترسیم و در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، صفحه شکستگی مورد استفاده برای ترسیم کانتورها، در وسط تراز ارتفاعی شکستگی (در فاصله ۳۲۵ میکرونی از کف مدل) تعریف شده است. همچنین، محل ورودی جریان با کادر آبی رنگ مشخص و مقادیر سرعت ورودی در این کادر نشان داده شده است. مقادیر حداکثر و حداقل فشار استاتیک نیز به‌صورت جدول در بالای هر یک از کانتورها نشان داده شده است.

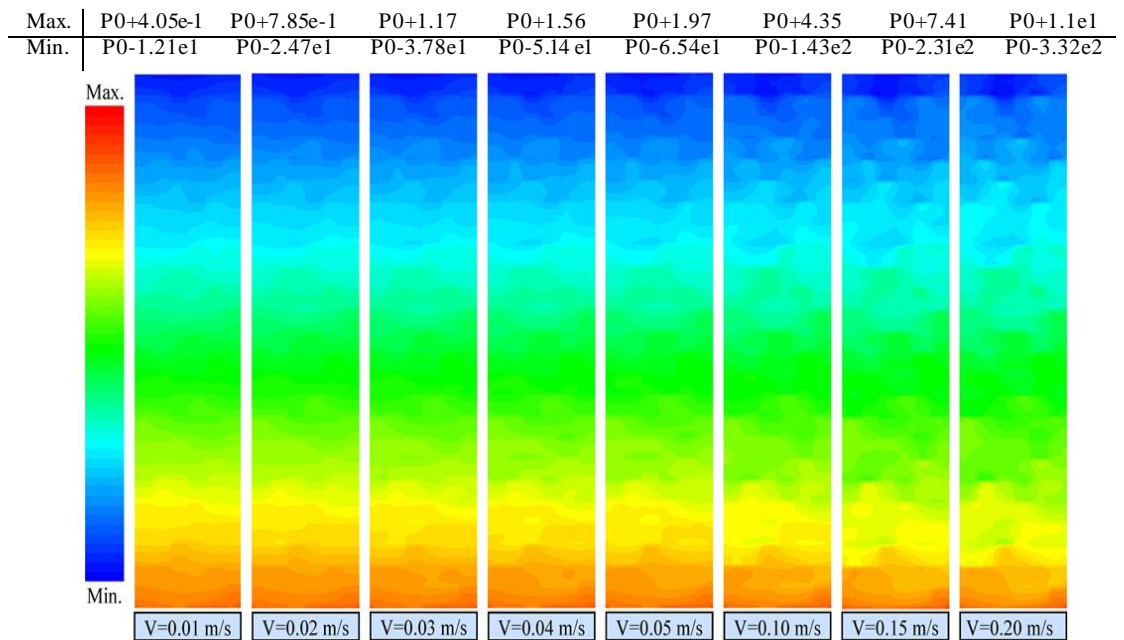
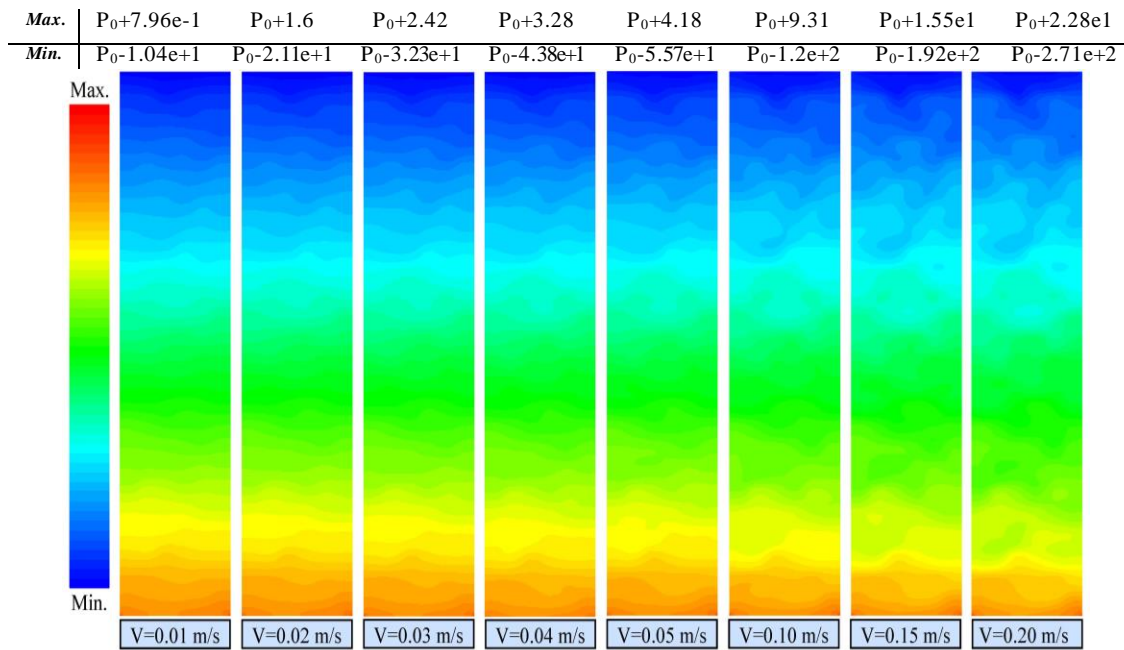
مطابق با شکل ۲، با افزایش فاصله از محل ورودی جریان، مقادیر فشار استاتیک روی صفحه شکستگی کاهش یافته که در نتیجه، بیشترین و کمترین مقادیر فشار استاتیک به ترتیب در محل ورودی و خروجی شکستگی حاصل می‌شود. برای مقادیر اندک سرعت ورودی جریان (معادل با مقادیر اندک عدد رینولدز)، کانتورهای فشار استاتیک در طول شکستگی (موازی با جهت جریان) دارای شکل هندسی منظم‌تری بوده و بخشی از کانتورها با هم موازی هستند. توزیع کانتورهای فشار استاتیک معادل با رفتار شکستگی ایده‌آل (شکستگی با صفحات صاف و موازی) بوده و هر چه این کانتورها افقی‌تر و موازی‌تر باشد، رفتار شکستگی به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر خواهد بود (لازم به ذکر است برای یک شکستگی ایده‌آل، کانتورهای فشار استاتیک روی صفحه شکستگی به‌صورت کاملاً موازی بوده و خطوط کانتور فشار استاتیک عمود بر جهت جریان هستند).

با افزایش دبی جریان سیال عبوری از شکستگی (معادل با افزایش سرعت ورودی جریان و یا افزایش عدد رینولدز)، از نظم کانتورهای فشار استاتیک کاسته می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش سرعت ورودی (یا دبی جریان)، تغییرات بیشتری در

الگوی هندسی کانتورهای فشار استاتیک ایجاد می‌شود. این موضوع بدین معناست که با افزایش دبی جریان سیال عبوری از شکستگی، رفتار سیال درون شکستگی انحراف بیشتری از حالت ایده‌آل خواهد داشت. این انحراف در عمده موارد تحت عنوان جریان غیرخطی (انحراف از قانون داریسی) تعبیر می‌شود. وابستگی افت فشار استاتیک به میزان دبی جریان سیال عبوری از شکستگی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های رفتاری در بحث جریان سیال در شکستگی‌های سنگی است. برای بررسی این موضوع، برای هر یک از شبیه‌سازی‌ها (شکستگی‌های مختلف و مقادیر مختلف سرعت ورودی)، افت فشار استاتیک با استفاده از مقادیر فشار استاتیک در ورودی و خروجی شکستگی محاسبه شده و سپس تغییرات این فاکتور نسبت به دبی جریان عبوری به‌صورت گراف ترسیم و در شکل ۳ نشان داده شده است.

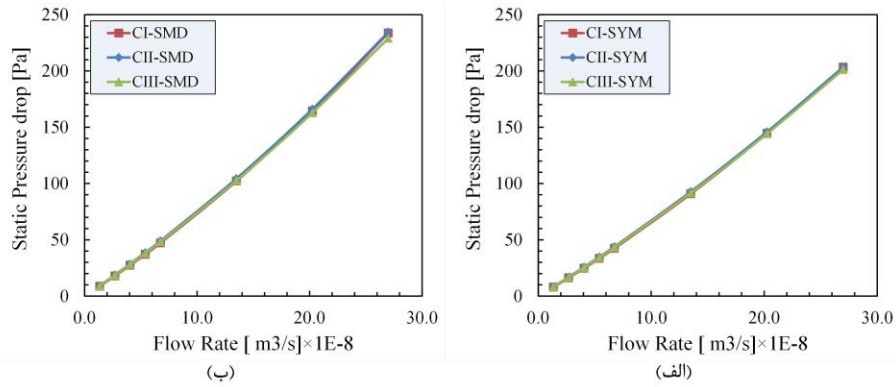
مقایسه نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد، در مقادیر یکسان از دبی جریان عبوری، در عمده موارد افت فشار استاتیک ایجاد شده در شکستگی‌ها با هندسه متقارن (مدل هندسی  $SYM$ ) کمتر از مدل هندسی با یک سطح صاف-یک سطح زبر (مدل هندسی  $SMD$ ) است. با افزایش دبی جریان عبوری این تفاوت بیشتر شده و مقدار عددی اختلاف بین مقادیر افت فشار افزایش می‌یابد.

همچنین، مطابق با شکل ۳، با افزایش دبی جریان عبوری از شکستگی، میزان افت فشار استاتیک افزایش می‌یابد. همه نمودارهای دبی-افت فشار دارای تقعر به سمت بالا هستند که این موضوع نشان‌دهنده رفتار غیرخطی (مشابه با قانون فورچی‌میر) و انحراف از قانون داریسی است. به‌منظور بررسی بهتر این مسئله، در مرحله اول، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به‌صورت گراف‌های گرادینان افت فشار استاتیک-دبی جریان ترسیم شد. در ادامه، هر دو قانون داریسی (نمودار خطی) و قانون فورچی‌میر (نمودار غیرخطی) از نوع چندجمله‌ای درجه ۲) بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برازش یافته است. این فرآیند برای همه مدل‌های هندسی از شکستگی (هر شش مدل هندسی) انجام و نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

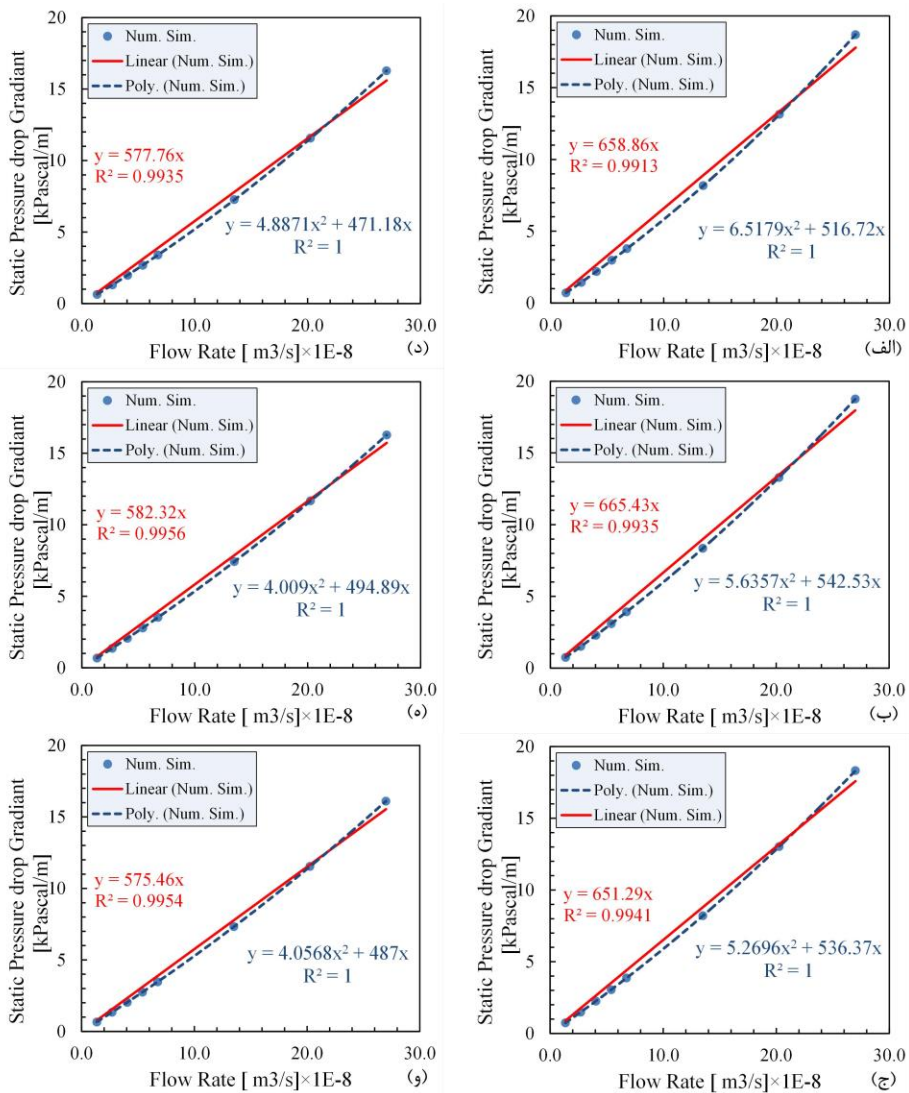


شکل ۲. کانتورهای فشار استاتیک بر روی صفحه شکستگی CI، شکل بالا: مدل هندسی SYS، شکل پایین: مدل هندسی SMD (مقادیر حداکثر و حداقل فشار استاتیک نیز به صورت جدول در بالای هر یک از کانتورها نشان داده شده است).

بررسی رفتار غیرخطی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای زبری با تکیه بر شبیه‌سازی سه‌بعدی معادلات ناویه-استوکس



شکل ۳. تأثیر دبی جریان سیال عبوری از شکستگی بر افت فشار استاتیک: (الف) شکستگی SYM، (ب) شکستگی SMD.

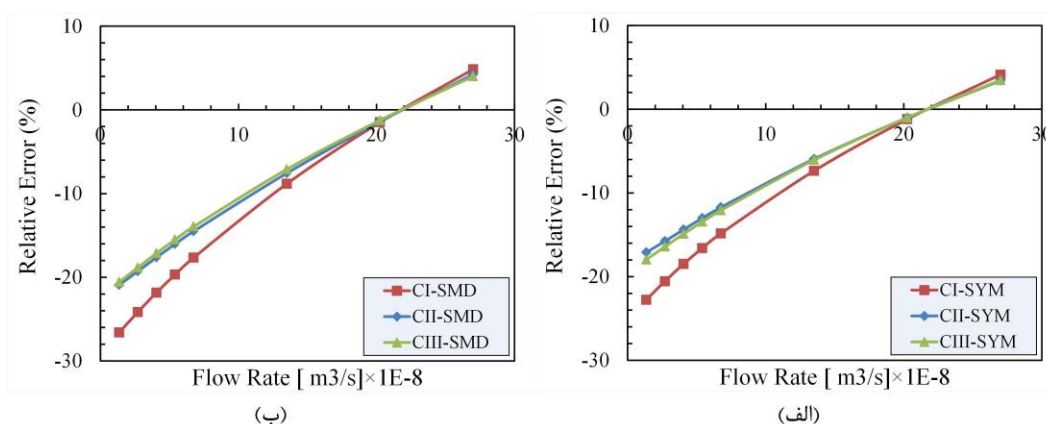


شکل ۴. برازش قوانین دارسی و فورچی‌میر به نتایج شبیه‌سازی جریان در شکستگی‌های مختلف: (الف) CI-SMD، (ب) CII-SMD، (ج) SMD، (د) CIII-SMD، (ه) CI-SYM، (و) CII-SYM، (ز) CIII-SYM.

برای کلیه مدل‌های هندسی شکستگی، مقادیر خطای نسبی گرادیان افت فشار حاصل از برازش قانون داری و نتایج شبیه‌سازی به‌صورت نموداری ترسیم و در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۵، برای مقادیر اندک از دبی جریان عبوری از شکستگی، مقادیر خطای نسبی بسیار زیاد بوده و در محدوده ۱۵ الی ۲۷ درصد است. به عبارت دیگر، برای مقادیر اندک از دبی جریان عبوری از شکستگی، برازش قانون داری، مقادیر گرادیان افت فشار را در حدود ۱۵ الی ۲۷ درصد بیشتر از نتایج شبیه‌سازی برآورد می‌کند. با افزایش دبی جریان عبوری از شکستگی، خطای نسبی بین برازش قانون داری و نتایج شبیه‌سازی ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد که این تغییرات در مقادیر خطا همراه با تغییر نوع خطا به ترتیب از حالت بیش برآورد به کم برآورد گرادیان افت فشار نیز همراه است. به عبارت دیگر، برای مقادیر اندک از دبی جریان عبوری از شکستگی، قانون داری مقادیر گرادیان افت فشار را بیشتر از مقادیر شبیه‌سازی برآورد نموده و برای مقادیر بزرگ از دبی جریان عبوری از شکستگی، مقادیر گرادیان افت فشار پیش‌بینی شده با برازش قانون داری کمتر از مقادیر حاصل از شبیه‌سازی عددی خواهد بود. مقادیر خطای نسبی گرادیان افت فشار حاصل از برازش قانون فورچی میر و نتایج شبیه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۶، مقادیر خطای نسبی بین برازش قانون فورچی میر و نتایج حاصل از شبیه‌سازی بسیار اندک است. همچنین، در عمده موارد اختلاف بین نتایج حاصل از برازش قانون فورچی میر و شبیه‌سازی کمتر از ۱/۵٪ است.

در شکل ۴، نتایج حاصل از برازش قوانین داری و فورچی میر به نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده شده است. برای برازش قانون داری به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، از تابع رگرسیون خطی استفاده شده و منحنی برازش شده به نتایج، به‌صورت یک تابع خطی خواهد بود. همچنین، برای برازش قانون فورچی میر به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، از تابع رگرسیون غیرخطی استفاده شده و منحنی برازش شده به نتایج، به‌صورت یک تابع دوجمله‌ای است. مقایسه نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که هر دو قانون فورچی میر و داری دارای مقادیر  $R^2$  بسیار خوبی هستند ولی در تمامی مدل‌های هندسی از شکستگی، برازش قانون فورچی میر به نتایج شبیه‌سازی از دقت و اعتبار بسیار بیشتری برخوردار است. برای پایش دقت عملکرد توابع برازش (بررسی میزان اعتبار قوانین داری و فورچی میر)، مقادیر خطای حاصل از تابع برازش یافته به نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا مقادیر گرادیان افت فشار حاصل از دبی جریان عبوری از شکستگی‌های مختلف با استفاده از توابع برازش محاسبه شده است (این مقدار محاسبه شده تحت عنوان  $\nabla P_{Reg}$  نام‌گذاری شده است)؛ سپس مقادیر گرادیان افت فشار حاصل از شبیه‌سازی ( $\nabla P_{Sim}$ ) به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شده و مقادیر خطای نسبی بین منحنی برازش و نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌صورت زیر محاسبه شده است:

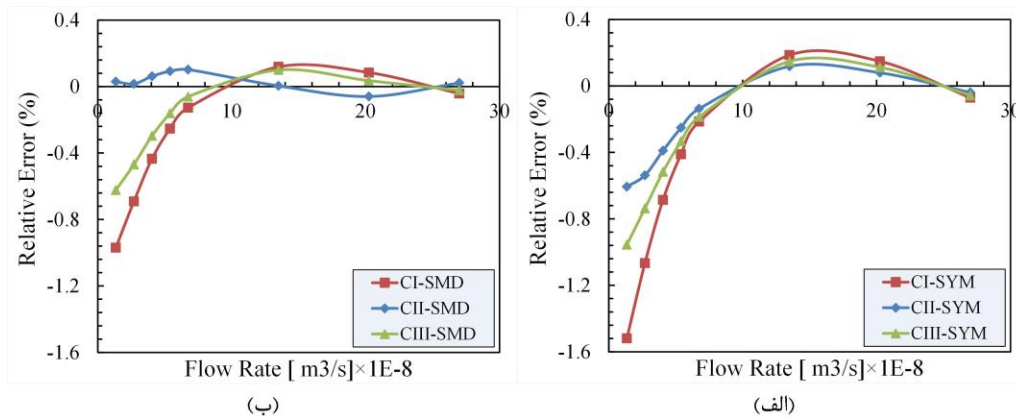
$$RE(\%) = 100 \times \frac{\nabla P_{Sim} - \nabla P_{Reg}}{\nabla P_{Sim}} \quad (5)$$



شکل ۵. خطای نسبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و برازش قانون داری: الف) شکستگی‌های SYM، ب) شکستگی‌های SMD



بررسی رفتار غیرخطی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای زبری با تکیه بر شبیه‌سازی سه‌بعدی معادلات ناویه-استوکس



شکل ۶. خطای نسبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و برازش قانون فورچی‌میر: الف) شکستگی‌های SYM، ب) شکستگی‌های SMD.

$$a_h = \left[ \frac{12\mu Q_{sim}}{w \cdot \nabla P} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (۶)$$

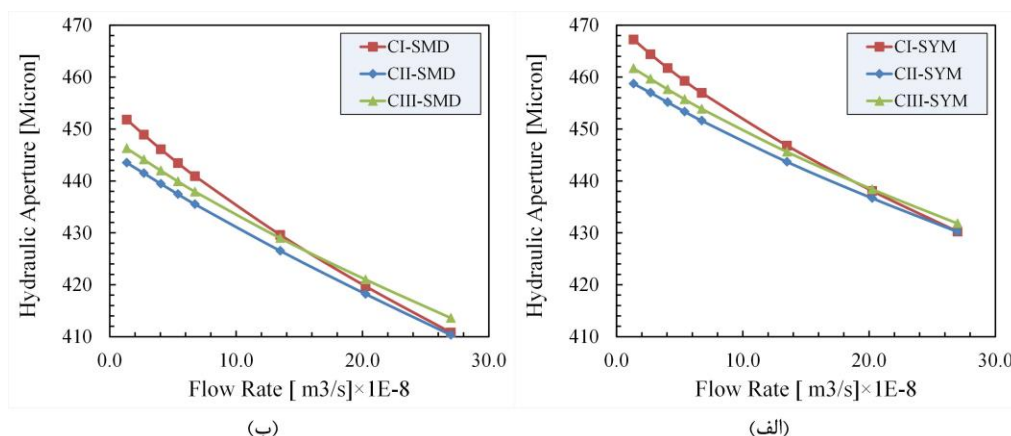
$$k = \frac{a_h^2}{12}$$

که در رابطه فوق  $Q_{sim}$  دبی جریان عبوری از شکستگی (مطابق با شبیه‌سازی)،  $w$  عرض شکستگی،  $\nabla p$  گرادیان فشار ابتدا و انتهای شکستگی،  $a_h$  دهانه هیدرولیکی شکستگی و  $k$  نفوذپذیری شکستگی است. برای هر یک از مقادیر سرعت ورودی جریان (شرایط مرزی اعمالی به شکستگی)، مقادیر دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری شکستگی با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شده و به تفکیک شکستگی‌های مختلف به ترتیب در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۷ و شکل ۸ به خوبی نشان می‌دهند که به دلیل رفتار غیرخطی جریان عبوری از شکستگی، دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری شکستگی، پارامترهای ثابت (مستقل) نبوده و کاملاً به میزان دبی جریان عبوری از شکستگی (و یا سرعت جریان) وابسته هستند. این موضوع، هم برای شکستگی‌های با هندسه متقارن (SYM) و هم برای شکستگی‌های با یک دیواره زبر و یک دیواره صاف (SMD) صادق است. همچنین، با افزایش سرعت جریان نفت در داخل شکستگی (معادل با افزایش دبی جریان و یا عدد رینولدز)، مقدار دهانه هیدرولیکی شکستگی و نفوذپذیری به‌طور غیرخطی کاهش می‌یابند.

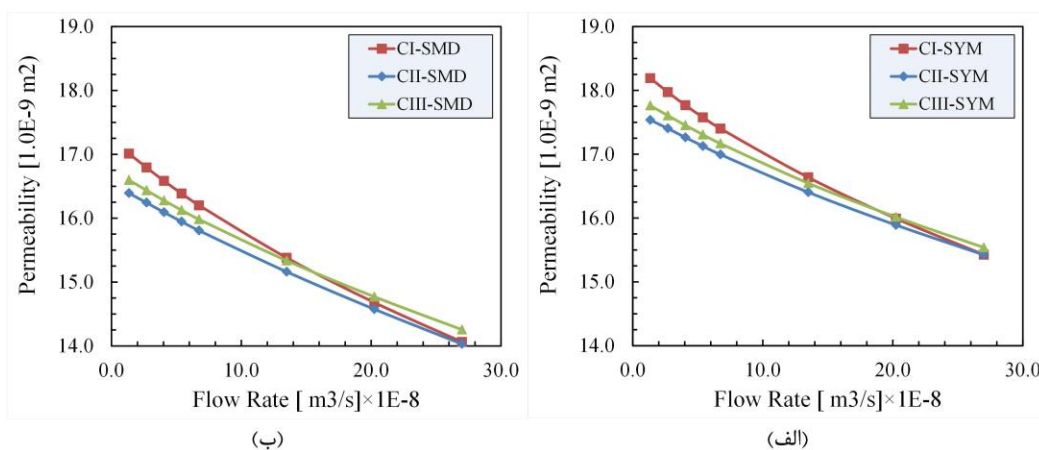
مقایسه شکل ۵ و شکل ۶ نشان می‌دهد که رفتار جریان در شکستگی‌های سنگی با قانون فورچی‌میر انطباق بسیار بیشتری داشته و قانون دارسی از دقت کافی برخوردار نیست. به عبارت دیگر، توصیف رفتار جریان در شکستگی‌های سنگی با استفاده از قانون دارسی همراه با انحراف بوده و در چنین مواردی، استفاده از قانون فورچی‌میر منتج به توصیف دقیق‌تری از رفتار هیدرولیکی شکستگی‌های سنگی خواهد شد. در حقیقت، رفتار جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی به‌صورت غیرخطی بوده و این رفتار غیرخطی با استفاده از قانون فورچی‌میر به‌خوبی توصیف می‌شود.

در رفتار خطی جریان (قانون دارسی)، فرض اساسی بر مستقل بودن پارامترهای هیدرولیکی محیط<sup>۵</sup> از نرخ جریان (دبی جریان عبوری) است. حال آنکه، رفتار غیرخطی جریان بدین معنا خواهد بود که پارامترهای هیدرولیکی شکستگی نظیر دهانه هیدرولیکی و یا نفوذپذیری به نرخ جریان عبوری وابسته خواهند بود. برای بررسی این ویژگی خاص از رفتار غیرخطی جریان در شکستگی‌های سنگی، تأثیر نرخ جریان بر روی پارامترهایی نظیر دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری شکستگی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، مقادیر دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری شکستگی با استفاده از روابط زیر محاسبه شده است:

<sup>5</sup> Media



شکل ۷. تأثیر دبی جریان عبوری از شکستگی بر دهانه هیدرولیکی: الف) شکستگی‌های SYM، ب) شکستگی‌های SMD.

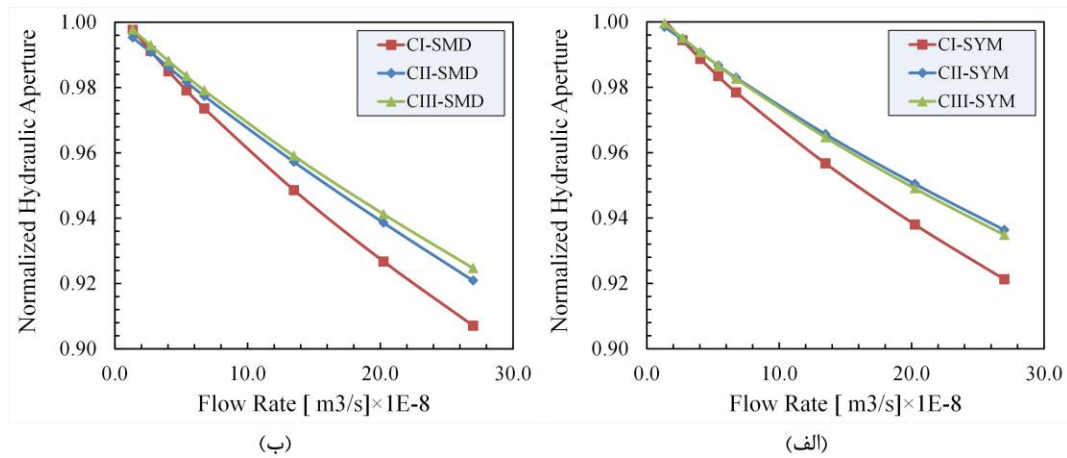


شکل ۸. تأثیر دبی جریان عبوری از شکستگی بر نفوذپذیری: الف) شکستگی‌های SYM، ب) شکستگی‌های SMD.

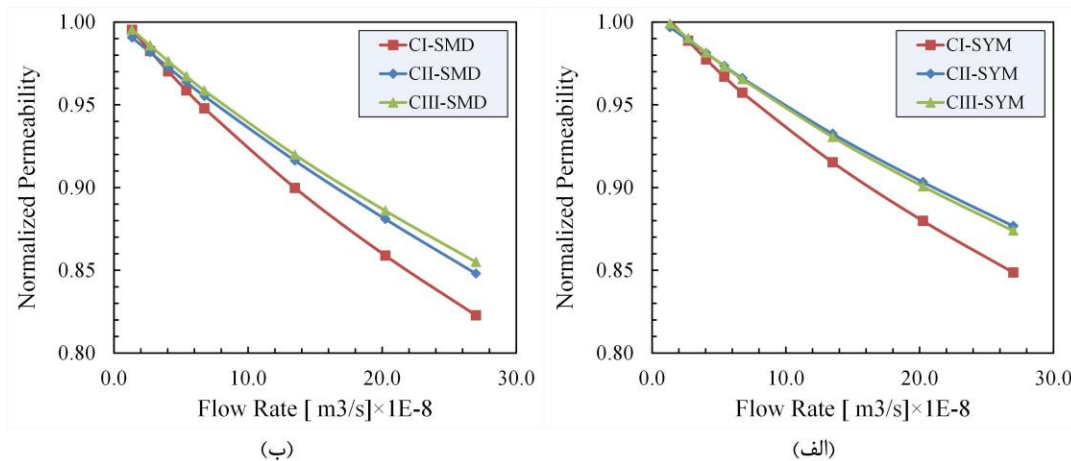
نشان داده شده است. لازم به ذکر است، برای بی‌بعدسازی از یک مقدار مینا استفاده شده که این مقدار مینا با جایگذاری ضریب  $A$  حاصل از برازش منحنی غیرخطی (قانون فورچی میر) مندرج در شکل ۴ در رابطه ۶ به دست آمده است.

به منظور بررسی میزان تأثیرپذیری دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری شکستگی از دبی جریان عبوری از شکستگی، مقادیر دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری با استفاده از یک مقدار مینا بی‌بعد شده و نتایج آن به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۰

بررسی رفتار غیرخطی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای زبری با تکیه بر شبیه‌سازی سه‌بعدی معادلات ناویه-استوکس



شکل ۹. تأثیر دبی جریان عبوری از شکستگی بر دهانه هیدرولیکی بی‌بعد شده: الف) شکستگی‌های SYM، ب) شکستگی‌های SMD.



شکل ۱۰. تأثیر دبی جریان عبوری از شکستگی بر نفوذپذیری بی‌بعد شده: الف) شکستگی‌های SYM، ب) شکستگی‌های SMD.

حدود ۱۹ درصد کاهش یابد؛ که این ارتباط در نتایج مربوط به مقادیر دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری بی‌بعد شده کاملاً مشهود است.

## ۵. بحث

عبور جریان سیال (نفت و یا سایر سیالات) از فضای داخلی شکستگی‌های سنگی با افت انرژی سیال همراه است. منشأ افت انرژی جریان سیال در داخل شکستگی‌ها را می‌توان به دو مکانیسم مختلف شامل اثر نیروهای ویسکوز و اثر نیروهای اینرسی نسبت داد. معمولاً اثر نیروهای ویسکوز در افت فشار سیالات نیوتنی به‌صورت خطی بوده و اثر نیروهای اینرسی

مطابق با شکل ۹، با افزایش دبی نفت عبوری از شکستگی، مقادیر دهانه هیدرولیکی بی‌بعد شده، به صورت غیرخطی کاهش می‌یابند. به‌طور مشابه، با افزایش دبی جریان نفت عبوری از شکستگی، مقادیر نفوذپذیری بی‌بعد شده نیز به‌صورت غیرخطی کاهش می‌یابند (شکل ۱۰). نرخ تغییرات نفوذپذیری بی‌بعد شده شکستگی بیشتر از نرخ تغییرات مربوط به دهانه هیدرولیکی بی‌بعد شده است که این موضوع کاملاً با رابطه ۶ همخوانی دارد. به عبارت دیگر، نفوذپذیری شکستگی تابعی درجه ۲ از مقدار دهانه هیدرولیکی شکستگی خواهد بود که در نتیجه کاهش ۱۰ درصدی در مقدار دهانه هیدرولیکی باعث می‌شود که مقدار نفوذپذیری شکستگی در

در نظر گرفته شود. رفتار جریان سیال در دامنه فیزیکی و برای هر نقطه از سیال (فاز) را می‌توان با استفاده از معادلات ناویه-استوکس مورد بررسی قرار داد که این توصیف ریاضی از رفتار جریان سیال تحت عنوان "سطح میکروسکوپی" شناخته می‌شوند. با این وجود، به کارگیری معادلات ریاضی در سطح میکروسکوپی با پیچیدگی‌های شدیدی در رابطه با برآورد هندسه پیچیده و اعمال شرایط مرزی روی مرزها و پیچیدگی حل معادلات همراه بوده و عملاً برای مسائل بزرگ مقیاس، برای چیره شدن بر این مشکلات، مسائل جریان و انتقال سیال به "سطح ماکروسکوپی" تبدیل شوند؛ که این تبدیل با استفاده از میانگین‌گیری ترم‌های میکروسکوپی و معادل‌سازی جنبه‌های رفتاری با استفاده از یک سری پارامتر انجام می‌شود. این روش که در بسیاری از شاخه‌های علوم به کار گرفته می‌شود تحت عنوان "روش پیوسته" نیز تعبیر می‌شود. در حقیقت، در زمان میانگین‌گیری ترم‌های میکروسکوپی و تعمیم‌دهی این ترم‌ها بر رفتار ماکروسکوپی، ناگزیر باید از پارامترهایی استفاده کرد که این پارامترها بر اساس نوع قوانین مفروض تعریف می‌شوند. برای مسائل مرتبط با جریان سیال در محیط‌های سنگی (به‌ویژه جریان نفت در مخازن هیدروکربوری)، معادله حاکم بر جریان در سطح ماکروسکوپی معمولاً با فرض برقراری قانون داری استنباط می‌شوند.

علی‌رغم سادگی این قانون، مطالعات اخیر نشان می‌دهد که رفتار جریان سیال در مقیاس ماکروسکوپی به صورت غیرخطی ظاهر شده و قانون فورچی‌میر با این جنبه رفتاری انطباق بسیار بهتری دارد. بنابراین، استفاده از قانون فورچی‌میر برای افزایش دقت معادلات جریان در سطح ماکروسکوپی پیشنهاد می‌شود. همان‌گونه که در بخش‌های قبل توضیح داده شده، قانون فورچی‌میر رفتار جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی را با دقت بسیار بیشتری نسبت به قانون داری توصیف می‌کند. تفاوت عمده بین قانون داری و قانون فورچی‌میر مربوط به ترم غیرخطی جریان است. در حقیقت، قانون فورچی‌میر یک رابطه جامع‌تر نسبت به قانون داری بوده و با حذف ترم غیرخطی (معادل با ترم  $BQ^2$  در رابطه ۴)، رابطه فورچی‌میر به رابطه داری تقلیل

به‌صورت غیرخطی خواهد بود. رفتار غیرخطی در جریان سیال داخل شکستگی‌های سنگی معمولاً به دلیل اثر نیروهای اینرسی ناشی از تغییرات سرعت و جهت جریان، گردابه‌های موضعی در محل تغییرات دهانه و پیچش خطوط جریان ایجاد می‌شود. با این وجود، در عمده مطالعات پیشین، معادلات حاکم مورد استفاده (مثل روابط روغن‌کار رینولدز) از دقت کافی برخوردار نبوده و تأثیرات ناشی از فرآیندهای مرتبط با رفتار غیرخطی جریان در این‌گونه مطالعات منعکس نشده است. هرچه سطح معادلات حاکم مورد استفاده برای حل عددی معادلات جریان بیشتر باشد، اثر تقابلی این دو نوع مکانیسم به‌طور دقیق‌تری در محاسبات اعمال شده و نتایج خروجی از حل عددی معادلات جریان دقیق‌تر خواهد بود. در چنین شرایطی، استفاده از معادلات ناویه-استوکس (که به‌عنوان بالاترین سطح معادلات حاکم بر جریان سیالات نیوتنی شناخته می‌شوند)، برای شبیه‌سازی جریان سیال، رفتار واقعی سیال را به طرز مناسب‌تر و دقیق‌تری منعکس می‌کند. به همین دلیل، امروزه روش‌های عددی مبتنی بر حل عددی معادلات ناویه-استوکس (دینامیک سیال محاسباتی) به‌عنوان یک ابزار سودمند و غیرقابل جایگزین برای بررسی و مطالعه رفتار جریان سیال به‌ویژه شبیه‌سازی جریان نفت در شکستگی‌های سنگی مطرح شده که در مقاله حاضر نیز از این روش استفاده شده است.

استفاده کاربردی از روش عددی حل معادلات ناویه-استوکس نیازمند صحت‌سنجی<sup>۶</sup> و اعتبارسنجی<sup>۷</sup> خواهد بود. صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی مورد استفاده در این پژوهش، در مطالعه پیشین (Javadi M. , 2018) انجام شده که مطالعه مذکور حاکی از صحت محاسبات عددی است. با توجه به صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی، استفاده از این ابزار برای مقاصد پژوهشی و برای بررسی جنبه‌های مختلف رفتاری به‌ویژه بروز رفتار غیرخطی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی برای مطالعات بعدی به شدت توصیه می‌شود. با این وجود، در رابطه با اعتبارسنجی روش عددی برای فرآیند جریان سیال درون شکستگی‌های واقعی، تاکنون پژوهش مدون و قابل اعتمادی در این رابطه توسط محققین ارائه نشده که این موضوع به‌عنوان رویکرد اصلی در مطالعات آینده باید

<sup>6</sup> Verification

<sup>7</sup> Validation

بررسی رفتار غیرخطی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای زبری با تکیه بر شبیه‌سازی سه‌بعدی معادلات ناویه-استوکس

مثال با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، روابط تجربی و یا روابط هندسی کلاسیک جهت تبدیل دهانه مکانیکی به دهانه مؤثر) و نفوذپذیری وجود داشته باشد؛ می‌توان برای جریان‌های با نرخ بسیار کم همچنان از قانون داریسی استفاده نمود. با این وجود، دامنه اعتبار این قانون (که به‌طور معمول در عمده مطالعات عملی مورد استفاده قرار می‌گیرد)، با افزایش دبی جریان نفت عبوری از شکستگی کاهش می‌یابد. همچنین، در حالتی که دبی جریان نفت عبوری از شکستگی زیاد باشد، مقادیر بی‌بعد شده دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری کمتر از یک خواهد بود. در چنین شرایطی، مدل‌های هیدرولیکی بزرگ مقیاس از مخازن هیدروکربوری شکاف‌دار، همواره بانوع خاصی از خطا به دلیل وجود جریان غیرخطی در شکستگی‌های سنگی همراه خواهند بود و کالیبراسیون این مدل‌ها با نرخ‌های اولیه میدانی نیز چندان جوابگو نخواهد.

#### ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر جریان غیرخطی نفت درون شکستگی‌های سنگی بر پارامترهای هیدرولیکی و با هدف برآورد میزان انحراف رفتار هیدرولیکی شکستگی‌های سنگی از قانون داریسی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، از نتایج شبیه‌سازی جریان نفت در داخل شکستگی سه‌بعدی دارای دیواره‌های زبر استفاده است. شبیه‌سازی جریان نفت درون شکستگی به‌صورت سه‌بعدی بوده و شامل حل عددی هم‌زمان معادلات ناویه-استوکس و پیوستگی به روش حجم محدود بوده که این فرآیند با استفاده از نرم‌افزار *FLUENT<sup>TM</sup>* انجام شده است. شبیه‌سازی جریان غیرخطی برای شش شکستگی با هندسه‌های مختلف انجام شده و نتایج حاصل، از دیدگاه نوع رژیم حاکم بر جریان تحلیل شده و تأثیر رفتار غیرخطی جریان بر پارامترهای هیدرولیکی (از قبیل نفوذپذیری و دهانه هیدرولیکی) شکستگی‌های سنگی با دیواره زبر مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس تحلیل‌های مختلف صورت گرفته، موارد زیر به‌عنوان مهم‌ترین نتایج این مقاله حاصل شده است: برای مقادیر اندک سرعت ورودی جریان، کانتورهای فشار استاتیک در طول شکستگی دارای شکل هندسی منظم‌تری بوده و بخشی از کانتورها با هم موازی هستند. توازی کانتورهای فشار استاتیک معادل با رفتار ایده‌آل جریان (قانون داریسی) در شکستگی بوده که با افزایش دبی جریان سیال

می‌یابد. در این حالت، می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که قانون داریسی زیرمجموعه‌ای از رفتار کلی‌تر یا جامع‌تر فورچی‌میر بوده که برای موارد خاصی که بتوان از ترم  $BQ^2$  صرف‌نظر کرد، قانون فورچی‌میر به قانون داریسی تقلیل می‌یابد. این موضوع برای مقادیر اندک از عدد رینولدز معادل با مقادیر اندک دبی جریان عبوری از شکستگی رخ می‌دهد که در چنین مواردی، سهم ترم  $BQ^2$  به دلیل حضور توان دوم نسبت به ترم  $AQ$  اندک قابل صرف‌نظر کردن خواهد بود. به عبارت دیگر، در مقادیر اندک از دبی جریان عبوری از شکستگی، سهم ترم  $BQ^2$  در ایجاد افت فشار استاتیک شکستگی قابل صرف‌نظر کردن بودن و با حذف این ترم، رابطه جامع فورچی‌میر به رابطه داریسی تبدیل می‌شود. در این حالت می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که قانون فورچی‌میر را می‌توان برای کل دامنه دبی‌های عبوری از شکستگی با دقت مناسبی بکار گرفت ولی قانون داریسی فقط برای بخشی از این دامنه (برای مقادیر اندک دبی جریان عبوری) دارای کفایت لازم و دقت مناسب خواهد بود.

منشأ تعریف پارامترهایی نظیر دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری شکستگی اساساً بر اساس فرض برقراری قانون داریسی (در سطح ماکروسکوپی) است. وجود رفتار غیرخطی و به ویژه برقرار قانون فورچی‌میر برای جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی باعث می‌شود که پارامترهایی نظیر دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری شکستگی تابعی از میزان دبی جریان بوده و در نتیجه فرض استقلال این پارامترها از دبی جریان مخدوش شود. حضور ترم  $BQ^2$  در معادلات حاکم بر جریان ماکروسکوپی باعث افزایش افت فشار ناشی از جریان شده که این موضوع به معنای افزایش مقاومت شکستگی در مقابل جریان خواهد بود. افزایش مقاومت شکستگی در مقابل جریان نیز معادل با کاهش نفوذپذیری با دهانه هیدرولیکی بوده؛ و در نتیجه هر چه میزان دبی جریان عبوری از شکستگی بیشتر باشد، پارامترهایی نظیر دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری شکستگی کاهش بیشتری می‌یابند. در مقادیر اندک دبی نفت عبوری از شکستگی، مقادیر بی‌بعد شده دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری نزدیک به یک هستند که این موضوع حاکی از برقراری قانون داریسی (با اعمال اصلاح لازم در خصوص دهانه هیدرولیکی و بالتبع قانون داریسی) خواهد بود. به عبارت دیگر، در صورتی که امکان اصلاح مقدار دهانه هیدرولیکی (به‌طور

نفوذپذیری، مدل‌های هیدرولیکی بزرگ مقیاس از مخازن هیدروکربوری شکاف‌دار، همواره با نوع خاصی از خطا به دلیل وجود جریان غیرخطی در شکستگی‌های سنگی همراه خواهند بود.

عبوری از شکستگی، رفتار هیدرولیکی شکستگی از حالت ایده‌آل منحرف شده که اثر آن در بی‌نظمی کانتورهای فشار استاتیک انعکاس می‌یابد.

نمودارهای دبی-افت فشار غیرخطی بوده و منحنی‌ها دارای تقعر به سمت بالا هستند. نتایج حاصل از برازش قوانین دارسی و فورچی‌میر به نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که رفتار جریان در شکستگی‌های سنگی توسط قانون فورچی‌میر کنترل می‌شود. همچنین، دقت قانون فورچی‌میر برای توصیف رفتار جریان نفت در شکستگی مورد بررسی بیش از ۹۸٪ بوده در حالی خطای قانون دارسی به بیش از ۲۷٪ نیز می‌رسد. رفتار جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی به صورت غیرخطی بوده و این رفتار غیرخطی با استفاده از قانون فورچی‌میر به خوبی توصیف می‌شود. به دلیل رفتار غیرخطی جریان عبوری از شکستگی، دهانه هیدرولیکی و نفوذپذیری پارامترهای ثابت (مستقل) نبوده و کاملاً به میزان دبی جریان عبوری از شکستگی (و یا سرعت جریان) وابسته هستند. نتایج شبیه‌سازی عددی جریان نشان می‌دهد، با افزایش سرعت جریان نفت در داخل شکستگی (معادل با افزایش دبی جریان و با عدد رینولدز)، مقدار دهانه هیدرولیکی شکستگی و نفوذپذیری به‌طور غیرخطی کاهش می‌یابند. در چنین شرایطی، حتی در صورت استفاده از مقادیر کالیبره شده

## ۷. سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
بردار سرعت	m/s	$u$
دانسیته سیال	Kg/ m <sup>3</sup>	$\rho$
ویسکوزیته‌دینامیک سیال	Pa.s	$\mu$
فشار هیدروستاتیک	Pa	$p$
دبی جریان	m <sup>3</sup> /s	$Q$
گرادیان فشار	Pa/m	$\nabla p$
دهانه شکستگی	m	$a$
دهانه‌هیدرولیکی شکستگی	m	$a_h$
نفوذپذیری	m <sup>2</sup>	$k$
ضریب غیردارسی یا مقاومت اینرسی	m <sup>5</sup>	$\beta$
ضریب هدررفت انرژی با مکانیسم ویسکوز	Pa.s/m <sup>4</sup>	$A$
ضریب هدررفت انرژی با مکانیسم اینرسی	kg/m <sup>8</sup>	$B$
عرض شکستگی	m	$w$
سطح مقطع شکستگی	m <sup>2</sup>	$S_f$

## مراجع

- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: Elsevier.
- Bear, J., Tsang, C.-F., & de Marsily, G. (1993). *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*. San Diego: Academic Press, Inc.
- Brown, S. R. (1987). Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness. *Journal of Geophysical Research*, 1337-1347.
- Brown, S., Stockman, H., & Reeves, S. (1995). Applicability of the Reynolds equation for modeling fluid flow between rough surfaces. *Geophys. Res. Lett.*, 2537-2540.
- Brush, D., & Thomson, N. R. (2003). Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes, and local cubic law simulations. *Water Res. Res.*, 1085-1099.
- David, C. (1993). Geometry of flow paths for fluid transport in rocks. *Journal of Geophysical Research*, 267-278.
- Elsworth, D., & Goodman, R. (1986). Characterization of Rock Fissure Hydraulic Conductivity Using

بررسی رفتار غیرخطی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای زبری با تکیه بر شبیه‌سازی سه‌بعدی معادلات ناویه-استوکس

- Idealized Wall Roughness Profiles. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 233-243.
- Ge, S. (1997). A governing equation for fluid flow in rough fractures. *Water Resour. Res.*, 53-61.
- Javadi, M. (2018). Tree-dimensional Crude Oil Flow Simulation through Rough-walled Fractures for Evaluating the Classic Geometrical Equations. *Journal of Petroleum Geomechanics*, 1-17.
- Javadi, M., Sharifzadeh, M., & Shahriar, K. (2010). A New Geometrical Model for Non-Linear Fluid Flow through Rough Fractures. *J. Hydrol.*, 18-30.
- Javadi, M., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., & Mehrjooii, M. (2012). Roughness effect on velocity domain through rock fractures. *Sharif Journal of Science and Technology, Civil Engineering*, 21-28.
- Javadi, M., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., & Mitani, Y. (2014). Critical Reynolds Number For Non-linear Flow Through Rough-walled Fractures: The Role of Shear Processes. *Water Resources Research*, 1789-1804.
- Kitandis, P., & Dykaar, B. (1997). Stokes Flow in a Slowly Varying Two-Dimensional Periodic Pore. *Transport in Porous Media*, 89-98.
- Koyama, T., Fardin, N., Jing, L., & Stephansson, O. (2006). 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*, 89-106.
- 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 Science*, 1082-1101.
- Nazridoust, K., Ahmadi, G., & Smith, D. H. (2006). A new friction factor correlation for laminar, single-phase flows through rock fractures. *Journal of Hydrology*, 315-328.
- Nelson, R. (2001). *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*. United States of America: Gulf Professional Publishing.
- Neuzil, C., & Tracy, J. (1981). Flow through fractures. *Water Resource. Res.*, 191-199.
- Nicholl, M., Rajaram, J. H., Glass, R., & Detwiler, R. (1999). Saturated flow in a single fracture: Evaluation of the Reynolds equation in measured aperture field. *Water Res., Res.*, 3361-3373.
- Oron, A. P., & Berkowitz, B. (1998). Flow in rock fractures: the local cubic law assumption reexamined. *Water Resources Research*, 2811-2824.
- Piggott, A. R., & Elsworth, D. (1993). Laboratory assesment of the equivalent apertures of a rock fracture. *Geophysical Research Letters*, 1387-1390.
- Renshaw, C. E. (1995). On the relationship between mechanical and hydraulic apertures in rough-walled fractures. *Journal of Geophysical Research*, 629-636.
- Rønningsen, H. P. (2012). Rheology of Petroleum Fluids. *ANNUAL TRANSACTIONS OF THE NORDIC RHEOLOGY SOCIETY*, 11-18.
- Sarkar, S., Toksöz, M., & Burns, D. (2002). *Fluid Flow Simulation in Fractured Reservoirs*. MIT Earth

Resources Laboratory.

- Sharifzadeh, M., & Javadi, M. (2017). Groundwater and underground excavations: From theory to practice. In X.-T. Feng, *Rock Mechanics and Engineering, Volume 3: Analysis, Modelling and Design; Editor* (pp. 299-330). CRC.
- Sharifzadeh, M., Javadi, M., & Shahriar, K. (2010). Evaluation of Non-linear fluid flow through rough-walled fractures. *Amirkabir Journal of Science and Technology, Civil Engineering*, 21-28.
- Thompson, M. E., & Brown, S. R. (1991). The effect of anisotropic surface roughness on flow and transport in fracture. *Journal of Geophysical Research*, 923-932.
- Tsang, Y. W., & Tsang, C. F. (1987). Channel Model of Flow through Fractured Media. *Water Resour. Res.*, 467-479.
- Tsang, Y., & Witherspoon, P. (1981). Hydromechanical Behavior of a Deformable Rock Fracture Subject to Normal Stress. *J. Geophys. Res.*, 9287-9298.
- Wilson, C. R., & Witherspoon, P. A. (1974). Steady state flow in rigid networks of fractures. *Water Res. Res.*, 328-335.
- Witherspoon, P., Wang, J., Iwai, K., & Gale, J. (1980). Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water Resour. Res.*, 1016-1024.
- Yeo, I. W., & Ge, S. (2005). Applicable range of the Reynolds equation for fluid flow in a rock Fracture. *Geosciences Journal*, 347-352.
- Zimmerman, R. W., Al-Yaarubi, A. H., Pain, C. C., & Grattoni, C. A. (2004). Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 163-169.
- Zimmerman, R., & Bodvarsson, G. (1996). Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in Porous Media*, 1-30.