



شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای سطوح زبر و مقایسه آن با روابط هندسی کلاسیک

مرتضی جوادی اصطهباناتی*

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

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۲ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2018.63105

چکیده

بخش عمده جریان هیدروکربن در مخازن شکافدار از طریق (داخل) شکستگی‌های دارای دیواره‌های زبر حادث شده و بنابراین ارائه مدل‌های با کارایی مناسب از رفتار مخازن هیدروکربن، نیازمند فهم عمیق‌تر از رفتار هیدرولیکی و هیدرومکانیکی شکستگی‌های سنگی خواهد بود. در این مقاله رفتار جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی زبر و با هدف بررسی تأثیر زبری و اعتبارسنجی روابط هندسی کلاسیک مطالعه شده است. بدین منظور جریان آرام و پایای نفت در داخل شکستگی‌های سه‌بعدی با سطوح زبر با روش عددی حجم محدود شبیه‌سازی و نتایج حاصل از دیدگاه‌های مختلفی مورد تحلیل قرار گرفته است. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با روابط هندسی کلاسیک جریان در شکستگی‌های سنگی و با هدف اعتبارسنجی این روابط مقایسه شده است. نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد، الف) برای شکستگی‌های باز، تأثیر زبری سطوح بر روی افت فشار استاتیک بیشتر از چیدمان دهانه مکانیکی است، ب) با افزایش عدد رینولدز، مقدار نفوذپذیری شکستگی‌ها کاهش می‌یابد، ج) روابط کلاسیک هندسی دارای خطای نسبی بین ۵ تا ۳۵٪ بوده و هرچه نفوذپذیری شکستگی‌ها کمتر باشد (افزایش زبری و تغییرات فضایی دهانه) از اعتبار روابط هندسی کلاسیک کاسته می‌شود.

واژگان کلیدی

شبیه‌سازی جریان
شکستگی‌های زبر
عدد رینولدز
نفوذپذیری
زبری سطوح

۱- مقدمه

بخش عمده‌ای از مهم‌ترین مخازن هیدروکربوری موجود در جهان و به‌ویژه ایران از نوع شکافدار (*Fractured*) بوده و سهم بسیار زیادی از نفت و گاز تولیدی جهان از این نوع مخازن استحصال می‌شود. مخازن شکافدار با توجه به نحوه اندرکنش سیال بین شکستگی‌ها و ماتریکس سنگی و همچنین نقش شکستگی‌ها در فرآیندهای هیدرولیکی مخزن به چهار دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این میان، نقش شکستگی‌ها در

مخازن تیپ (۱) و (۲) کاملاً مشهود بوده و بخش عمده جریان هیدروکربن در مخزن از طریق (داخل) شکستگی‌ها حادث می‌شود (*Nelson, 2001*). در چنین شرایطی، فهم دقیق‌تر از رفتار هیدرولیکی و هیدرومکانیکی شکستگی‌های سنگی منجر به توسعه مدل‌های دقیق‌تر از فرآیندهای هیدرولیکی مخازن هیدروکربوری شده و در نهایت کارایی این مدل‌ها افزایش خواهد یافت.

شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای سطوح زبر و مقایسه آن با روابط هندسی کلاسیک

روی تأثیر آرایش دهانه بر روی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی با دیواره‌های زبر و به‌ویژه با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی با استفاده از حل عددی معادلات ناویر استوکس انجام شده است.

این موضوع در مقاله پیش رو و باهدف اعتبارسنجی روابط هندسی کلاسیک جریان در شکستگی‌های سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، تأثیر الگوی چیدمان دهانه مکانیکی و زبری سطوح شکستگی بر روی جریان نفت در شکستگی‌های سنگی با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرحله اول صحت سنجی شبیه‌سازی عددی جریان نفت درون شکستگی سنگی سه‌بعدی با هندسه ایده آل انجام شده است. در ادامه، تأثیر زبری بر روی رفتار هیدرولیکی شکستگی سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، شبیه‌سازی جریان نفت در داخل شکستگی سه بعدی با هندسه‌های متفاوت انجام شده که هندسه شکستگی‌ها، با فرض یکسان بودن تخلخل (حجم فضای خالی) و برای شش حالت هندسی مختلف از توزیع دهانه روی پلان و همچنین زبری شکستگی‌ها باز تولید شده است. برای هر یک از شکستگی‌ها، شبیه‌سازی جریان نفت به صورت سه بعدی با روش حجم محدود انجام شده و نتایج حاصل مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی عددی جریان با روابط هندسی کلاسیک جریان در شکستگی‌های سنگی و با هدف تأثیر هندسه به‌ویژه زبری سطوح با یکدیگر مقایسه شده است.

۲- تئوری و پیش‌زمینه

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال در شکستگی

به‌طورکلی رفتار جریان یک سیال نیوتنی در داخل شکستگی‌های سنگی با استفاده از معادلات ناویر استوکس توصیف می‌شود (Javadi et al., 2014):

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

به‌طورکلی ساده‌ترین مدل برای بیان رفتار جریان سیال درون شکستگی، فرض صفحات موازی به عنوان دیواره‌های شکستگی و جریان صفحه‌ای پویزیل است (Neuzil & Tracy, 1981). این حالت، تنها موردی است که امکان حل تحلیلی معادله جریان برای آن وجود دارد (Zimmerman & Bodvarsson, 1996) که حاصل آن، تحت عنوان قانون ویا رابطه مکعب شناخته می‌شود (Witherspoon et al., 1980). رابطه مکعب معادل با رابطه داریسی یک بعدی بوده (Sharifzadeh & Javadi, 2017) که بر اساس آن مقدار نفوذپذیری شکستگی‌ها برای مقاصد شبیه‌سازی جریان سیال در مخازن هیدروکربوری شکافدار برآورد می‌شود (Sarkar et al., 2002). قانون مکعب در اصل برای جریان آرام در شکستگی با دیواره‌های صاف و موازی توسعه داده شده؛ (Witherspoon et al., 1980) ولی شکستگی‌های واقعی دارای زبری بوده و واضح است که زبری رفتار هیدرولیکی شکستگی‌ها را کنترل می‌کند (Javadi et al., 2014). به همین دلیل، محققین مختلف با استفاده از روش‌های معادل‌سازی (با به‌کارگیری فرضیات سینماتیکی و یا استفاده از نتایج شبیه‌سازی) روابط مختلفی را برای اصلاح تأثیر زبری بر روی قانون مکعب توسعه داده‌اند. بخش عمده‌ای از این مطالعات، منجر به ارائه روابط ساده (با هدف قابل استفاده بودن در مدل‌های با اندازه بزرگ و در مقیاس مخازن) معطوف شده که این روابط تحت عنوان روابط هندسی کلاسیک نامیده می‌شوند (Javadi et al., 2010).

در سالیان گذشته مطالعات بسیار گسترده‌ای بر روی رفتار جریان سیال درون شکستگی‌های سنگی انجام شده (Yu et al., 2017) که بخش زیادی از مطالعات اخیر بر روی حل عددی معادله ناویر استوکس برای جریان سیال در شکستگی‌های دارای زبری متمرکز شده است (Brush & Thomson, 2003), (Koyama et al., 2008), (Sharifzadeh et al., 2010), (Javadi et al., 2012), (Wang et al., 2015), (Liu et al., 2016), (Zou et al., 2016). با این وجود، مطالعات اندکی بر

شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای سطوح زبر و مقایسه آن با روابط هندسی کلاسیک

$$k = \frac{b^2}{12}, T = kA = \frac{Wb^3}{12}, K = \frac{k\gamma}{\mu} \quad (5)$$

که در رابطه فوق، k نفوذپذیری (مترمکعب)، K هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)، T انتقال‌پذیری (متر به توان چهار) و A سطح مقطع شکستگی (مترمربع) است.

۲-۲- اصلاح قانون مکعب با روابط هندسی

فرض دیواره‌های موازی، کاربرد قانون مکعب را برای شکستگی‌های طبیعی محدود می‌کند. سطوح شکستگی‌های طبیعی دارای زبری بوده که وجود زبری باعث تغییرات دهانه (*Aperture*) روی پلان، تغییرات سرعت جریان و پیچ و خم‌دار شدن مسیرهای جریان سیال درون شکستگی شده که به دلیل این پدیده‌ها، برآورد چگونگی جریان در شکستگی با استفاده از قانون مکعب با انحراف همراه است. با توجه به این موضوع، اصلاحاتی بر روی قانون مکعب توسط محققین مختلف انجام شده که این اصلاحات عمدتاً در قالب ترم دهانه هیدرولیکی بیان شده است. اندازه دهانه‌ای که هدایت هیدرولیکی شکستگی را به طور مناسبی بیان می‌کند تحت عنوان دهانه هیدرولیکی شکستگی شناخته شده و به صورت زیر تعریف می‌شود (*Renshaw 1995*):

$$b_h = \sqrt[3]{\frac{12Q_{ts}L\mu}{W(P_{in} - P_{out})}} \quad (6)$$

در رابطه فوق، Q_{ts} دبی جریان بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و یا روش‌های عددی حل معادلات جریان و b_h مقدار دهانه هیدرولیکی شکستگی است. مهم‌ترین روابط اصلاحی قانون مکعب در قالب دهانه هیدرولیکی و تحت عنوان روابط هندسی کلاسیک در جدول ۱ ارائه شده است.

۳- چارچوب شبیه‌سازی عددی

در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی جریان نفت در داخل شکستگی سه‌بعدی با هندسه‌های متفاوت و برای مقادیر

که در رابطه فوق، f_e نیروهای خارجی وارد بر المان سیال در حال حرکت (نیوتن)، μ ضریب لزجت مطلق یا لزجت دینامیک (نیوتن-ثانیه بر متر مربع)، ρ دانسیته سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)، V بردار سرعت جریان و P فشار کلی سیال (پاسکال) است. معادله دیفرانسیل ناویر استوکس یک معادله دیفرانسیل غیر خطی بوده که راه حل کلی ندارد و برای به دست آوردن مدل‌های تحلیلی بایستی فرضیات بیشتری لحاظ شود. با حذف ترم اینرسی (فرض جریان آرام ویسکوز) معادله جریان به صورت معادله خطی استوکس بیان می‌شود (*Kitandis & Dykaar, 1997*):

$$\nabla P = \mu \nabla^2 V \quad (7)$$

با در نظر گرفتن فرض صفحات صاف و موازی به عنوان دیواره‌های شکستگی، می‌توان معادله خطی استوکس را به صورت تحلیلی حل نمود. در این حالت، با اعمال فرض یکسان بودن مؤلفه‌های سرعت در راستای x و y ، عمود بودن بردار سرعت سیال بر راستای z و یکنواختی (خطی بودن) گرادیان فشار ∇P در معادله خطی استوکس، روابط زیر حاصل می‌شود (*Zimmerman & Bodvarsson, 1996*):

$$u(z) = \frac{\overline{\nabla P}}{2\mu} (z-b)z \quad (8)$$

$$Q_x = W \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} u(z) dz = -\frac{Wb^3}{12\mu} \left| \overline{\nabla P} \right| \quad (9)$$

که در معادلات فوق، Q_x دبی جریان عبوری از شکستگی در راستای گرادیان فشار، W عرض شکستگی، b فاصله عمودی بین دو دیواره شکستگی (دهانه مکانیکی شکستگی) و $u(z)$ پروفیل سرعت سیال در راستای z است. مطابق با رابطه (۹)، ارتباط بین دبی جریان و دهانه شکستگی به صورت توان سوم (مکعب) دهانه است که در نتیجه این رابطه تحت عنوان قانون مکعب نامیده می‌شود. با مقایسه رابطه (۹) و رابطه داری یک‌بعدی خواهیم داشت:

شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای سطوح زبر و مقایسه آن با روابط هندسی کلاسیک

مختلفی از دبی جریان (یا عدد رینولدز) انجام شده است. تشریح شده است.

شبیه‌سازی‌های انجام شده در سه بخش مختلف شامل ۱-جریان

در شکستگی ایده آل (با هدف صحت سنجی)، ۲-مدل عددی با

تعداد مش مختلف (با هدف بررسی استقلال نتایج از شبکه) و

۳- شبیه‌سازی جریان در شکستگی با دیواره‌های زبر (با هدف

بررسی تأثیر چیدمان‌های مختلف دهانه مکانیکی بر رفتار جریان و به‌عنوان هدف اصلی این پژوهش) دسته‌بندی شده است.

لازم به ذکر است، هدف اصلی در این مقاله، تأثیر الگوی چیدمان

دهانه مکانیکی و زبری سطوح شکستگی بر روی جریان نفت در

شکستگی‌های سنگی بوده و عمده نتایج پژوهش پیش رو بر

روی این موضوع تمرکز یافته است. در ادامه مهم‌ترین جنبه‌های

فرآیند شبیه‌سازی عددی جریان نفت درون شکستگی سنگی

۳-۱- هندسه شکستگی

برای انجام شبیه‌سازی عددی از دو نوع هندسه متفاوت از

شکستگی استفاده شده است. هندسه نوع اول به‌صورت یک مدل

ایده آل شامل دو صفحه صاف و موازی بوده (متشابه با هندسه

ایده آل مورد استفاده برای حل تحلیلی معادله جریان درون

شکستگی و استخراج معادله مکعب) که از این هندسه برای

صحت سنجی شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. برای حالت

ایده آل، شکستگی با عرض 5 mm و طول $12/5 \text{ mm}$ در نظر

گرفته شده (شکل ۱) و مدل‌سازی برای دو مقدار از دهانه

شکستگی شامل $0/1 \text{ mm}$ و $0/25 \text{ mm}$ انجام شده است.

جدول ۱. مهم‌ترین روابط اصلاحی قانون مکعب در قالب دهانه هیدرولیکی

ردیف	رابطه هندسی	خصوصیات و توضیحات	محققین
Eq.1	$b_h^3 = \frac{1}{\left\langle \frac{1}{b_i^3} \right\rangle_a}$	مدل هندسی سری: (دهانه فقط در جهت x متغیر است: b_i) جریان و گرادیان هیدرولیکی به صورت هم جهت و در راستای x ، b_i دهانه مربوط به سگمنت نام است (این رابطه با فرض شبکه سری به دست آمده است).	Wilson & Witherspoon 1974 Bear et al 1993
Eq.2	$b_h^3 = \left\langle b_j^3 \right\rangle_a$	مدل هندسی موازی: (دهانه فقط در جهت y متغیر است: b_j) جریان و گرادیان هیدرولیکی به صورت هم جهت و در راستای x ، افت فشار در همه مقاطع یکسان و برابر با ΔP است (این رابطه با فرض شبکه موازی به دست آمده است).	Neuzil & Tracy 1981 Elsworth & Goodman 1986
Eq.3	$b_h^3 = \left\langle b_i^3 \right\rangle_a^{\frac{1}{3}} \frac{1}{\left\langle \frac{1}{b_j^2} \right\rangle_a}$	مدل هندسی سری موازی: (دهانه در هر دو جهت x و y متغیر) جریان و گرادیان هیدرولیکی به صورت هم جهت و در راستای x ، b_i دهانه در راستای x و b_j معرف دهانه در راستای y است (این رابطه با فرض شبکه سری-موازی به دست آمده است). میانگین حسابی دهانه مکانیکی (این رابطه بر اساس مقایسه	Tsang & Witherspoon 1981
Eq.4	$b_h = \left\langle b \right\rangle_a$	نتایج حاصل از شبیه‌سازی معادله روغن‌کاری رینولدز پیشنهاد شده است).	Brown 1987
Eq.5	$b_h = \left\langle b \right\rangle_g$	میانگین هندسی دهانه مکانیکی (این رابطه با استفاده از آنالیز آشوب معادله روغن‌کاری رینولدز به دست آمده است)	Renshaw 1995
Eq.6	$b_h^3 = \sqrt{\left\langle b_i^3 \right\rangle_a \frac{1}{\left\langle \frac{1}{b_i^3} \right\rangle_a}}$	میانگین هندسی از دهانه هیدرولیک مدل هندسی سری و مدل هندسی موازی (این رابطه به‌طور تجربی از میانگین هندسی روابط تحلیلی حاصل از معادله رینولدز پیشنهاد شده است).	Zimmerman et al 1991

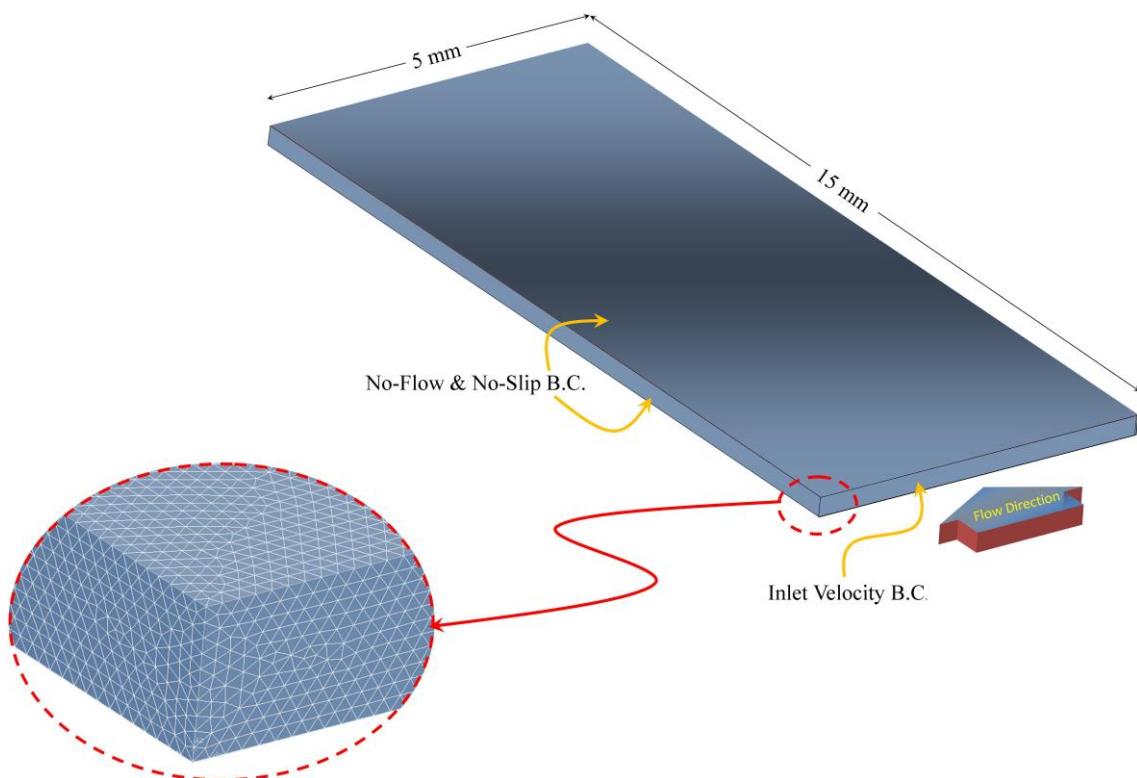
شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای سطوح زبر و مقایسه آن با روابط هندسی کلاسیک

بخشی از یک درزه واقعی استفاده شده که این داده‌ها با استفاده از پردازش نتایج اسکن لیزری سطوح به دست آمده است (برای اطلاع بیشتر در رابطه با نحوه مدل‌سازی زبری و نحوه اندازه‌گیری زبری به منابع *Sharifzadeh et al., 2006* و *Javadi et al., 2010* رجوع شود).

دهانه شکستگی از مقدار کمینه 0.35 mm تا مقدار بیشینه 0.65 mm تغییر می‌کند و مقدار متوسط و انحراف استاندارد آن به ترتیب 0.485 mm و 0.106 mm است. در هندسه نوع دوم، زبری سطوح 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.

هندسه نوع دوم به صورت یک مدل شبه واقعی از شکستگی در نظر گرفته شده که در این هندسه، دیواره‌های سطوح دارای زبری هستند (مشابه شکستگی‌های واقعی). فضای خالی سه‌بعدی شکستگی (شبه واقعی) دارای عرض 3 mm و طول $12/5 \text{ mm}$ (به ترتیب در راستای x , y) بوده و به صورت یک مجموعه از المان‌های حجمی روی صفحه $x-y$ با فواصل Δx و Δy (برابر با 0.5 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 المان‌های حجمی (در راستای z) نشان‌دهنده مقدار دهانه است (شکل ۲). به منظور تخصیص دهانه مکانیکی به هر یک از المان‌های حجمی، از داده‌های مربوط به توزیع دهانه مکانیکی



شکل ۱. نمای کلی از هندسه سه‌بعدی شکستگی ایده آل به همراه شرایط مرزی جریان و شبکه محاسباتی (مش بندی).

شکستگی، لازم است برای حل عددی معادلات جریان از مش بندی بسیار ریز استفاده شود. بدین منظور، فضای داخل شکستگی‌ها به شبکه‌های محاسباتی با حداقل تعداد ۱۲۰۰۰۰۰ مش تتراهدرا (به صورت تقریباً یکنواخت) و با استفاده از نرم‌افزار *GAMBITTM* تبدیل شده و برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است، مقدار حداقل تعداد مش با استفاده از آنالیزهای انجام شده و در نظر گرفتن استقلال از شبکه انتخاب شده که این موضوع در بخش بعد تشریح شده است. نمای کلی از دامنه محاسباتی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است.

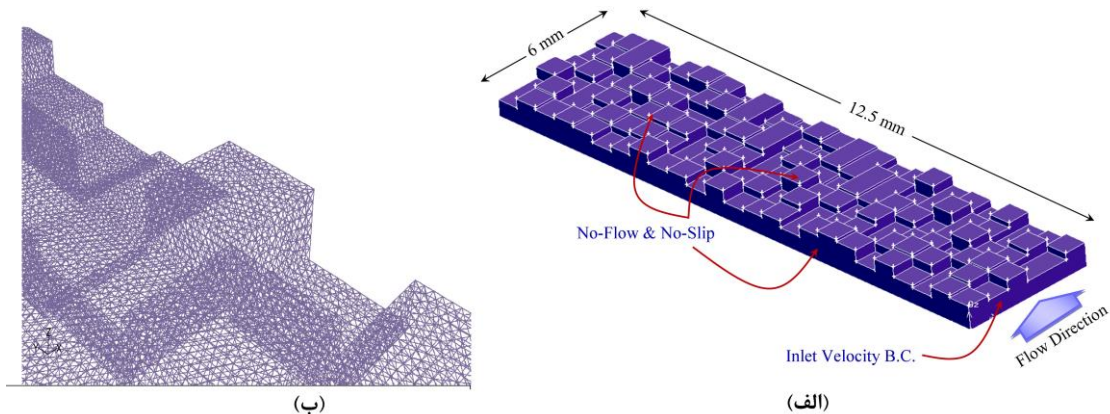
شبیه‌سازی جریان برای سیال نفت غیر اشباع با دانسیته 850 kg/m^3 و ویسکوزیته 1 cP انجام شده است. شرط مرزی سرعت ورودی (*Inlet Velocity*) به صورت یکنواخت و در راستای Y و بر روی ورودی شکستگی اعمال شده است. برای خروجی جریان در دامنه هندسی شکستگی، شرط مرزی جریان خروجی (*Out Flow*) لحاظ شده است. بقیه سطوح جامد دامنه (مرزهای شکستگی) به صورت دیواره‌های نفوذناپذیر با شرط مرزی بدون جریان تعریف شده‌اند (شکل ۲). فشار نسبی داخل شکستگی در شبیه‌سازی‌ها بیشتر از فشار نقطه حباب لحاظ شده است.

علاوه بر این، سه حالت مختلف از آرایش فضایی المان‌های حجمی در نظر گرفته شده که حالت اول منطبق بر نتایج اسکن لیزری بوده که این شکستگی تحت عنوان *CI* نام‌گذاری شده است. در حالت‌های دوم و سوم از شکستگی، آرایش المان‌های حجمی به‌طور تصادفی و با حفظ حجم فضای خالی تغییر داده شده که این دو حالت نیز تحت عنوان *CH* و *CHH* نام‌گذاری شده‌اند. در حقیقت، شکستگی‌های *CH* و *CHH* کاملاً مشابه با *CI* بوده و فقط موقعیت المان‌های حجمی به‌طور تصادفی تغییر داده شده است.

با این تفاسیر، شش مدل هندسی مختلف از شکستگی حاصل شده که این مدل‌های هندسی به صورت *CI-SMD*، *CH-SMD*، *CHH-SMD*، *CI-SYM*، *CH-SYM* و *CHH-SYM* نام‌گذاری شده‌اند.

۳-۲- شبیه‌سازی جریان

شبیه‌سازی جریان نفت در داخل شکستگی سه بعدی، به صورت حل عددی هم‌زمان معادلات ناویر استوکس و پیوستگی با روش حجم محدود و با استفاده از نرم‌افزار *FLUENTTM* انجام شده است. بدین منظور، از روش مستقیم *DNS* برای شبیه‌سازی جریان آرام استفاده شده است. با توجه به حضور ساختارهای بسیار کوچک جریان در داخل



شکل ۲. نمای کلی از شکستگی با دیواره‌های زبر: (الف) هندسه سه‌بعدی شکستگی به همراه شرایط مرزی جریان، (ب) شبکه محاسباتی (مش بندی).

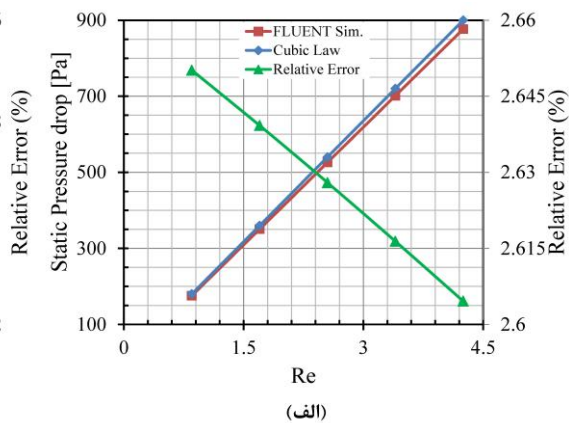
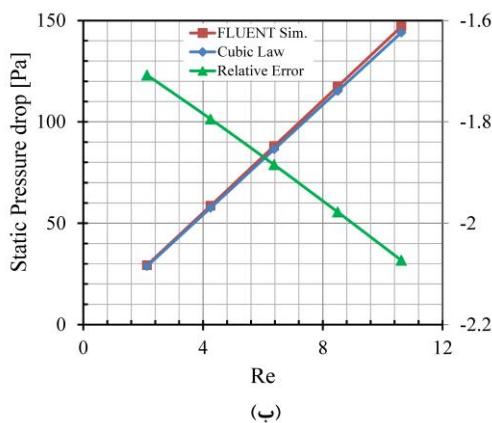
شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای سطوح زبر و مقایسه آن با روابط هندسی کلاسیک

۴- نتایج

۴-۱- صحت سنجی شبیه‌سازی

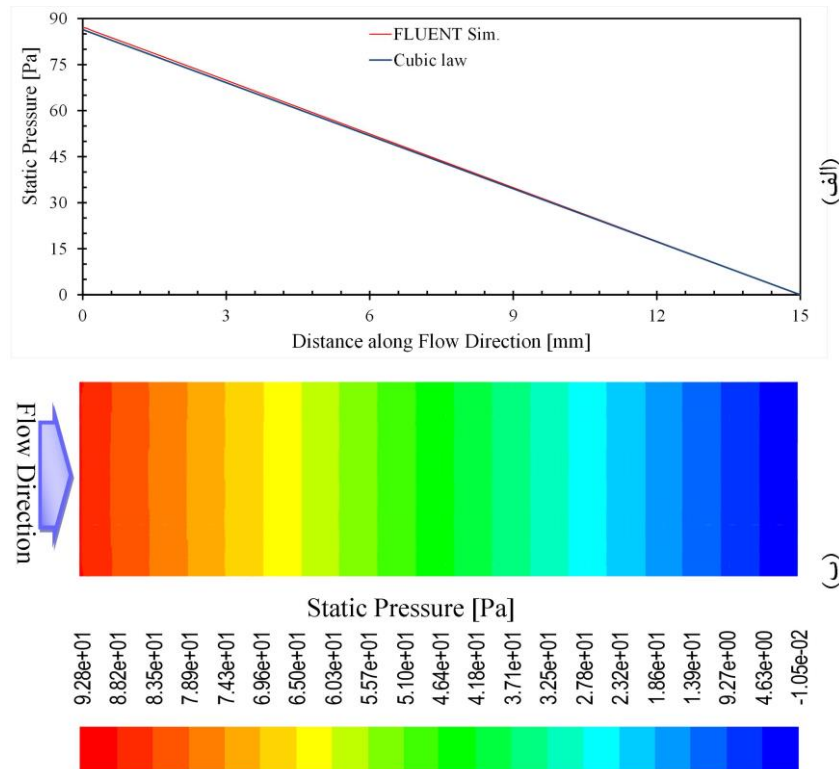
با توجه به اینکه در این مقاله از شبیه‌سازی عددی برای تحلیل‌های جریان استفاده شده، لازم است قبل از بررسی نتایج شبیه‌سازی، صحت فرآیند فوق مورد سنجش و ارزیابی قرار گیرد. صحت سنجی در دو مرحله مختلف شامل ۱- بررسی درستی محاسبات عددی و ۲- استقلال از شبکه انجام شده است. به‌منظور بررسی صحت محاسبات عددی، از مدل ایده آل استفاده شده است. هندسه مدل ایده آل منطبق با شرایط مفروض در حل تحلیلی معادله مکعب بوده که بدین منظور سطوح بالا و پایین شکستگی به‌طور کاملاً موازی و صاف در نظر گرفته شده است. فاصله بین دو دیواره معرف دهانه شکستگی بوده که شبیه‌سازی برای دو مقدار دهانه مختلف شامل دهانه ۱۰۰ و ۲۵۰ میکرون انجام شده است. در این حالت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان در شکستگی ایده آل با معادله مکعب قابل مقایسه بوده و مقایسه نتایج این دو روش، میزان صحت فرآیند شبیه‌سازی را نشان خواهد داد. برای مدل عددی، افت فشار استاتیک ناشی از جریان نفت درون شکستگی ایده آل با استفاده از تفاضل مقادیر فشار استاتیک در ورودی و خروجی شکستگی محاسبه شده است. این مقادیر افت فشار استاتیک به همراه افت فشار

محاسبه شده با قانون مکعب به صورت تابعی از عدد رینولدز در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۳، مقادیر افت فشار استاتیک ناشی از جریان نفت درون شکستگی ایده آل برای هر دو مقدار دهانه و هر دو روش بررسی (شبیه‌سازی عددی و معادله مکعب) به‌صورت خطی با عدد رینولدز افزایش می‌یابند. همچنین، مقدار افت فشار پیش‌بینی‌شده با هر دو روش شبیه‌سازی عددی و معادله مکعب بسیار نزدیک به هم بوده به‌گونه‌ای که مقدار خطای نسبی (با در نظر گرفتن رابطه تحلیلی به‌عنوان مینا) بین ۱/۵ تا ۳ درصد است. به‌منظور مقایسه بهتر، نتایج مربوط به نحوه تغییرات فشار استاتیک در طول شکستگی (با دهانه ۲۵۰ میکرون و عدد رینولدز ۶/۳) نیز برای هر دو روش تحلیلی و عددی در شکل ۴ (هم به‌صورت کانتوری و هم به‌صورت نموداری) نشان داده‌شده که این شکل حاکی از انطباق بسیار خوب بین نتایج شبیه‌سازی و حل تحلیلی است. با در نظر گرفتن تطابق بسیار خوب بین نتایج شبیه‌سازی عددی جریان درون شکستگی ایده آل و حل تحلیلی (رابطه مکعب)، می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری نمود که شبیه‌سازی عددی از صحت و دقت کافی برخوردار بوده و می‌توان از این ابزار به‌صورت کاربردی و به‌منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف شکستگی و سیال استفاده نمود.



شکل ۳. مقایسه افت فشار استاتیک شبیه‌سازی عددی و معادله مکعب به همراه خطای نسبی شبیه‌سازی عددی برای شکستگی با مقادیر مختلف دهانه: الف) دهانه ۱۰۰ میکرون، ب) دهانه ۲۵۰ میکرون.

شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای سطوح زبر و مقایسه آن با روابط هندسی کلاسیک

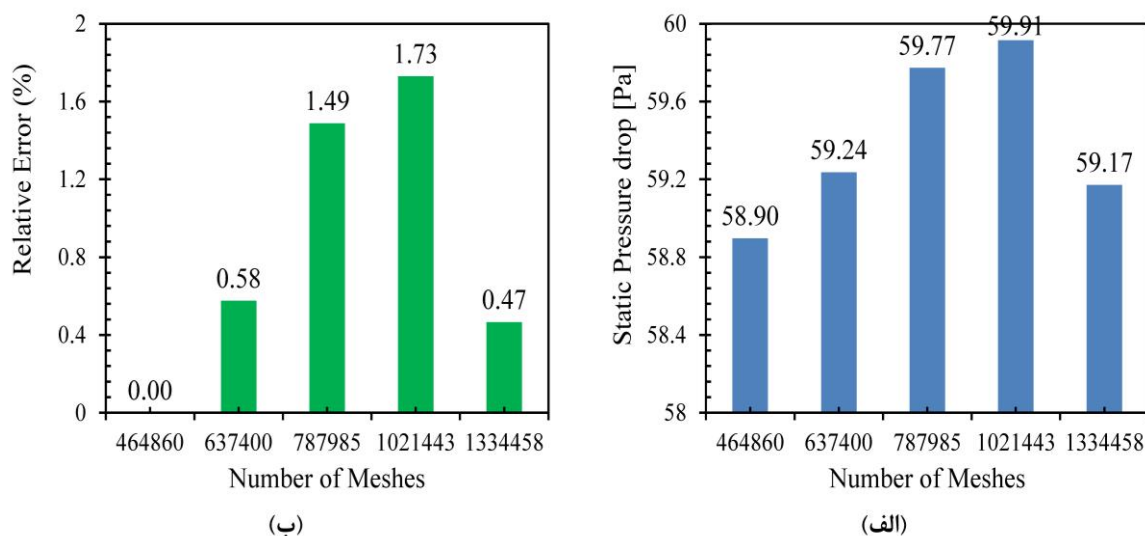


شکل ۴. تغییرات مقدار فشار استاتیک در راستای محور شکستگی، (ب) کانتور تغییرات فشار استاتیک بر روی پلان شکستگی برای شبیه‌سازی عددی.

بحث و برای مدل‌ها با تعداد مش از حدود ۴۶۰۰۰۰ تا ۱۳۳۰۰۰ در شکل ۵-الف نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که برای محدوده تغییرات تعداد المان حجمی (مش)، تغییرات افت فشار استاتیک بسیار جزئی است. به‌منظور بررسی بهتر این موضوع، مقادیر خطای نسبی بین مراحل متوالی افزایش تعداد مش نیز محاسبه و در شکل ۵-ب نشان داده شده است. مقایسه نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که مقادیر افت فشار استاتیک جریان درون شکستگی برای محدوده تغییرات تعداد المان حجمی (مش) دارای تغییرات بسیار جزئی بوده و خطای نسبی بین مدل‌های با تعداد مش مختلف کمتر از ۲٪ است. این موضوع به‌منزله کفایت تعداد مش‌های مدل عددی و استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه است.

در مرحله قبل، صحت شبیه‌سازی عددی جریان نفت درون شکستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله دوم از صحت سنجی شبیه‌سازی عددی، لازم است استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه (استقلال از نحوه مش بندی شامل تعداد و اندازه المان‌ها) مورد بررسی قرار گیرد. استقلال از شبکه برای کلیه شکستگی‌های مورد استفاده در این مقاله انجام شده که نتایج مشابهی به دست آمده است. با توجه به کثرت تعداد شکستگی‌ها، در این بخش تنها نتایج مربوط به استقلال شبکه مربوط به شکستگی *CI-SMD* ارائه شده است. برای شکستگی مورد بحث، دامنه هندسی برای حالات مختلفی از تعداد المان بندی شده و برای هر یک از مش بندی‌های مختلف، شبیه‌سازی جریان با شرایط مرزی یکسان انجام شده است. نتایج مربوط به افت فشار استاتیک در شکستگی مورد

شبه‌سازی سه‌بعدی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای سطوح زبر و مقایسه آن با روابط هندسی کلاسیک

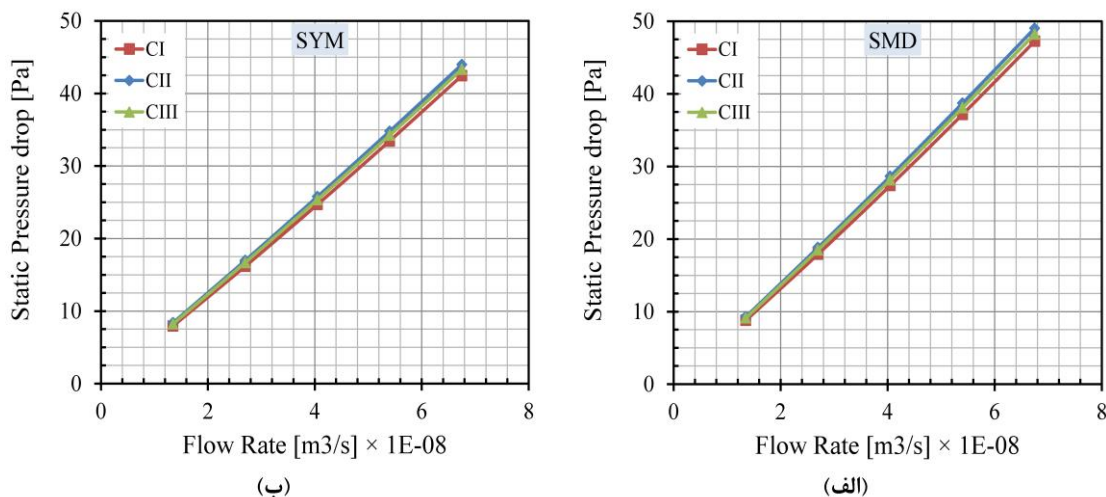


شکل ۵. تأثیر تعداد المان حجمی درون شکستگی بر نتایج شبه‌سازی: الف) افت فشار استاتیک، ب) خطای نسبی افت فشار بین مراحل متوالی افزایش تعداد المان.

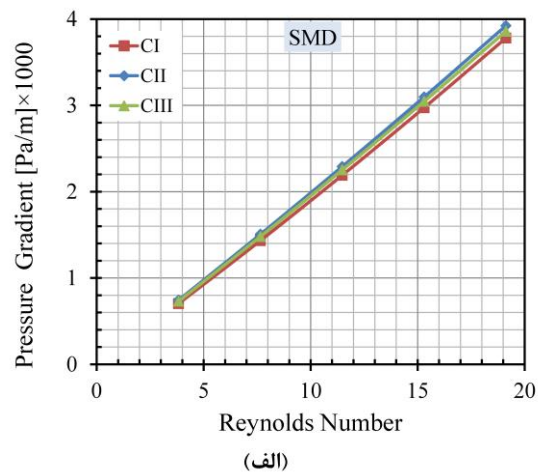
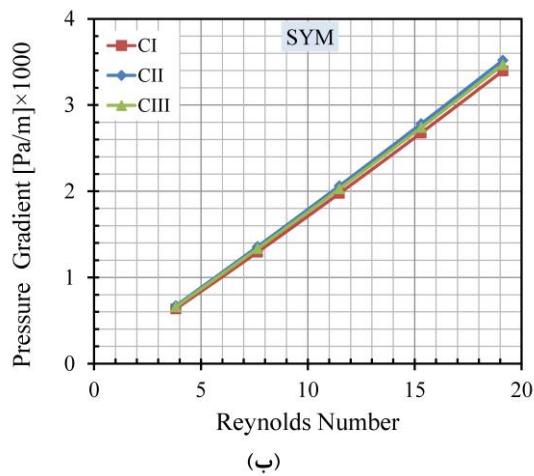
حالت هندسی شکستگی‌ها (مدل‌های هندسی *SMD* و *SYM*) به‌طور جداگانه ترسیم و در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین، به‌منظور مقایسه بهتر، نتایج حاصل از شبه‌سازی عددی حجم محدود به‌صورت گرادیان افت فشار (در واحد طول شکستگی) و عدد بی‌بعد رینولدز نیز محاسبه و در شکل ۷ ترسیم شده است.

۴-۲- تأثیر زبری و چیدمان دهانه

به‌منظور بررسی اولیه نتایج شبه‌سازی، مقادیر افت فشار استاتیک ناشی از جریان نفت درون هر یک از شکستگی‌ها با استفاده از تفاضل مقادیر فشار استاتیک در ورودی و خروجی شکستگی محاسبه شده است. این مقادیر افت فشار استاتیک به صورت نموداری و نسبت به دبی جریان نفت برای هر دو



شکل ۶. تغییرات افت فشار استاتیک ناشی از جریان عبوری نفت در مدل‌های هندسی شکستگی: الف) *SMD*، ب) *SYM*.



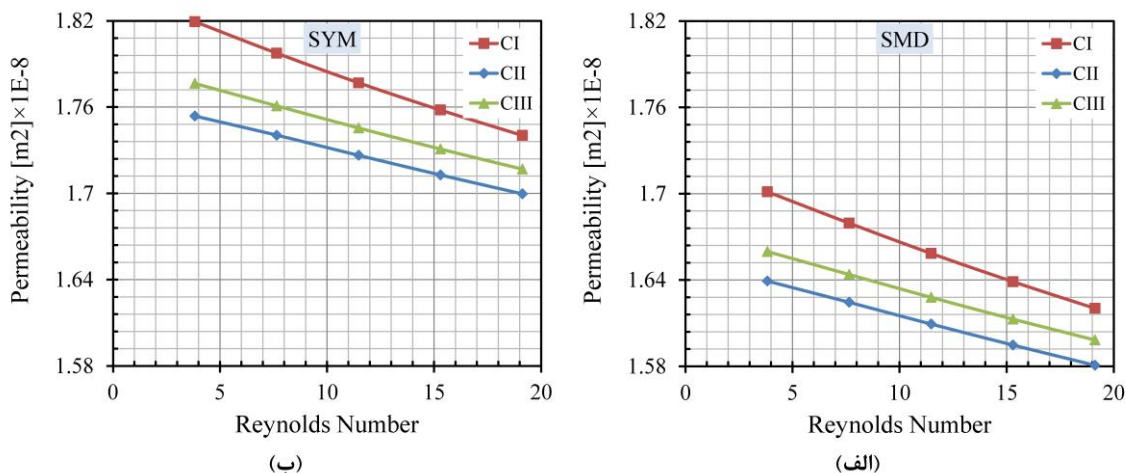
شکل ۷. گرادیان افت فشار استاتیک و عدد رینولدز برای جریان نفت در مدل‌های هندسی شکستگی: الف) SMD، ب) SYM.

می‌دهد، نفوذپذیری شکستگی‌های SYM در عمده مقادیر عدد رینولدز مورد بررسی بیشتر از شکستگی‌های SMD است. برای هر دو حالت هندسی نیز، بیشترین و کمترین مقدار نفوذپذیری به ترتیب متعلق به چیدمان دهانه CI و CII است. همچنین، نفوذپذیری شکستگی‌ها تابعی از عدد رینولدز (و یا دبی جریان عبوری) است.

نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز، مقدار نفوذپذیری کاهش می‌یابد. کاهش مقدار نفوذپذیری شکستگی‌ها با افزایش عدد رینولدز به معنای غیرخطی شدن جریان بوده و روند کاهشی نیز به معنای افزایش وابستگی افت فشار به دبی جریان (انحراف از رابطه خطی مکعب) است. به‌منظور بررسی اثر زبری سطوح و الگوی چیدمان دهانه مکانیکی، از مقادیر بی بعد شده (Normalized) نتایج افت فشار بررسی شده است. در مرحله اول، نسبت بین افت فشار استاتیک شکستگی‌های SMD به SYM محاسبه و نتایج آن برای حالت‌های مختلف چیدمان دهانه مکانیکی CI، CII و CIII و تابعی از عدد بی بعد رینولدز در شکل ۹ نشان داده شده است.

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، برای هر دو حالت هندسی SMD و SYM، بیشترین افت فشار استاتیک مربوط به CII و کمترین افت فشار استاتیک مربوط به CI است. همچنین، برای مقادیر یکسان از دبی جریان عبوری (و یا مقادیر یکسان عدد رینولدز)، افت فشار استاتیک جریان در شکستگی‌های با دیواره‌های متقارن (SYM) کمتر از شکستگی با یک دیواره صاف و دیواره زبر (SMD) است. همچنین، برای تمامی مدل‌های هندسی، مقدار افت فشار استاتیک (و گرادیان افت فشار) به صورت تقریباً غیر خطی با دبی جریان عبوری نفت در داخل شکستگی (و یا عدد رینولدز) افزایش می‌یابد. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، تغییرات نفوذپذیری به‌عنوان تابعی از عدد رینولدز نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور محاسبه نفوذپذیری شکستگی‌ها، ابتدا دهانه هیدرولیکی با استفاده از مقادیر گرادیان فشار و دبی جریان و با استفاده از رابطه (۶) محاسبه و سپس با استفاده از رابطه (۵) به مقدار نفوذپذیری تبدیل شده است. مقدار نفوذپذیری شکستگی‌ها در مقادیر مختلف عدد رینولدز محاسبه شده و نتایج آن در شکل ۸ ترسیم شده است. بررسی این نتایج نشان

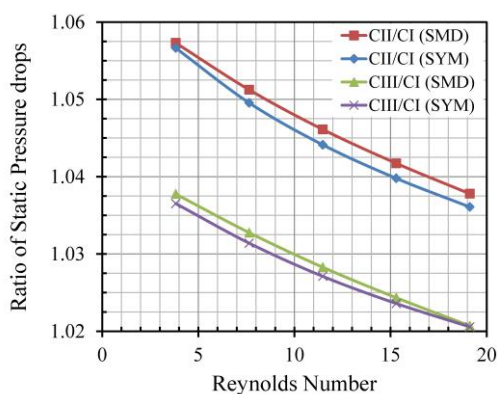
شبه‌سازی سه‌بعدی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای سطوح زبر و مقایسه آن با روابط هندسی کلاسیک



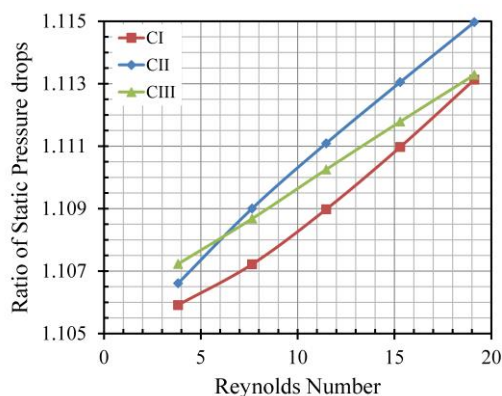
شکل ۸. تغییرات نفوذپذیری بر حسب عدد رینولدز برای جریان نفت در مدل‌های هندسی شکستگی: الف) SMD، ب) SYM.

در مرحله دوم و به منظور ارزیابی تأثیر چیدمان و یا پراکنش دهانه مکانیکی بر روی پلان شکستگی، نتایج مربوط به شکستگی CI به‌عنوان مبنای بی بعد سازی در نظر گرفته شده و نتایج دو شکستگی دیگر (شکستگی‌های بازسازی شده CII و CIII) بر اساس این مقدار مبنای بی بعد شده‌اند. نتایج بی بعد شده افت فشار استاتیک برای شکستگی‌ها با چیدمان‌های CII و CIII به‌صورت تابعی از عدد رینولدز در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد، نوع زبری سطوح شکستگی (با حفظ سایر پارامترهای مربوط به پراکنش و توزیع دهانه مکانیکی) باعث تغییرات قابل توجهی در افت فشار استاتیک جریان می‌شود. کمترین مقدار نسبت افت فشار بین دو حالت حدی از زبری شکستگی‌ها (SMD به SYM) بیش از ۱/۱ است. همچنین، با افزایش دبی جریان و عدد رینولدز، اختلاف بین افت فشار استاتیک شکستگی‌های SMD به SYM به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰. نسبت افت فشار استاتیک شکستگی‌های باز تولید شده (CII و CIII) به شکستگی اصلی (CI).

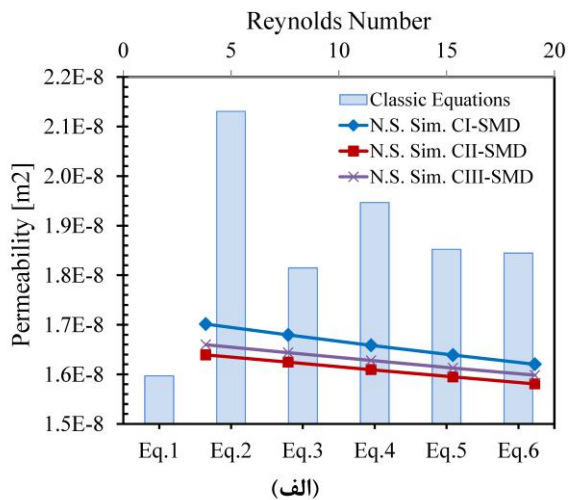
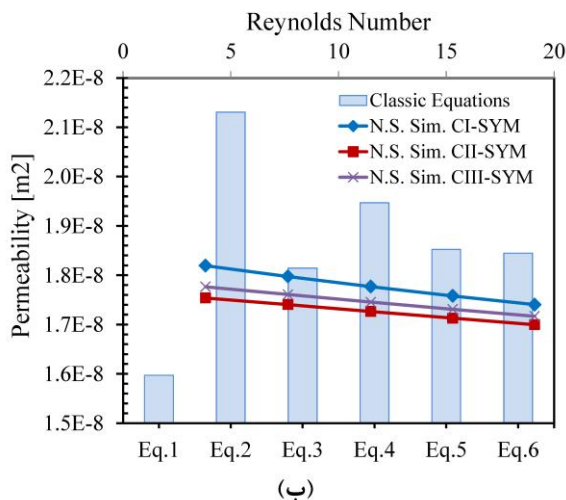


شکل ۹. نسبت افت فشار استاتیک شکستگی‌های SMD به SYM.

هندسی کلاسیک (جدول ۱) و مشخصات هندسی شکستگی‌ها محاسبه شده و با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی عددی به روش حجم محدود مقایسه است. نتایج این مقایسه، در شکل ۱۱ و به‌طور به تفکیک شده برای شکستگی‌های *SMD* به *SYM* ترسیم شده است. لازم به ذکر است، مقادیر نفوذپذیری پیش‌بینی شده با روابط هندسی کلاسیک برای همه شکستگی‌های *SMD* و *SYM* و همچنین چیدمان‌های مختلف دهانه مکانیکی روی پلان شکستگی یکسان بوده و با تغییر این دو پارامتر، تغییری در مقادیر نفوذپذیری پیش‌بینی شده با این روابط ایجاد نمی‌شود. همچنین، مقادیر نفوذپذیری حاصل از نتایج شبیه‌سازی تابعی از مقدار عدد رینولدز بوده درحالی‌که مقادیر نفوذپذیری پیش‌بینی شده با روابط هندسی کلاسیک مستقل از شدت جریان و یا عدد رینولدز است.

مطابق با شکل ۱۰، هر دو شکستگی بازسازی شده *CII* و *CIII* دارای افت فشار بیشتر از شکستگی مینا هستند که این اختلاف برای شکستگی *CII* بیشتر از *CIII* است. مقدار افت فشار شکستگی‌های بازسازی شده در حدود ۲ تا ۶ درصد بیشتر از شکستگی مینا است. همچنین، با افزایش عدد رینولدز، مقدار اختلاف افت فشار بین شکستگی‌های بازسازی شده و شکستگی مینا به‌صورت غیرخطی به‌گونه‌ای کاهش می‌یابد که نرخ تغییرات نیز با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد.

به‌منظور بررسی تأثیر زبری بر روی انحراف از قانون مکعب و همچنین ارزیابی دامنه اعتبار روابط هندسی کلاسیک (روابط اصلاحی قانون مکعب)، نتایج شبیه‌سازی با مهم‌ترین روابط موجود مقایسه شده است. بدین منظور، ابتدا دهانه هیدرولیکی هر یک از شکستگی‌ها با استفاده از روابط



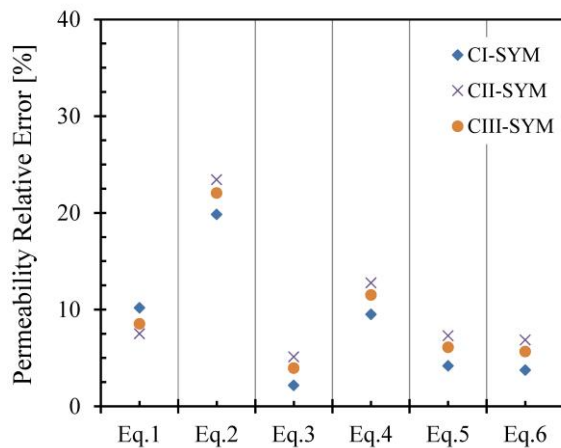
شکل ۱۱. مقایسه نفوذپذیری حاصل از روابط کلاسیک هندسی و شبیه‌سازی عددی برای شکستگی‌های: الف) *SMD*، ب) *SYM*.

محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته است. بدین منظور، مقدار نفوذپذیری حاصل از شبیه‌سازی عددی به‌عنوان مینا در نظر گرفته شده و مقدار اختلاف بین نتایج دو روش مورد بررسی نسبت به این مقدار مینا بی بعد شده است. برای هر یک از

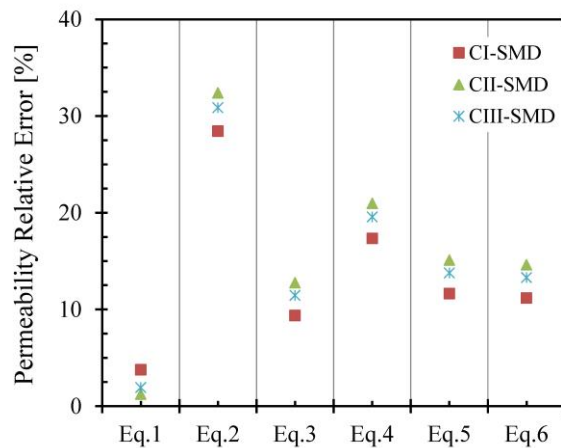
مطابق با شکل ۱۱، عمده روابط هندسی کلاسیک، مقدار نفوذپذیری را بیشتر از شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی می‌کند. به‌منظور بررسی اختلاف بین این دو روش، مقدار خطای نسبی بین مقادیر پیش‌بینی شده نفوذپذیری با دو روش مورد بررسی

است. دلیل اصلی این موضوع، مقدار نفوذپذیری شکستگی است. در حقیقت، با توجه به کمتر بودن افت فشار شکستگی‌های *SYM* و *CI* (بیشتر بودن نفوذپذیری) نسبت به سایر حالات دیگر، مقادیر پیش‌بینی شده نفوذپذیری با روابط هندسی کلاسیک (در عمده موارد) انطباق بیشتری با نتایج شبیه‌سازی شکستگی‌های *SYM* و *CI* دارد. همچنین، بیشترین انطباق نتایج شبیه‌سازی برای شکستگی‌های *SMD* و *SYM* به ترتیب برای مدل‌های هندسی مستخرج شده از الگوی جریان سری و سری-موازی (روابط *Eq.1* و *Eq.3*) مشاهده می‌شود.

حالت‌های هندسی از شکستگی‌ها، متوسط مقادیر قدر مطلق اختلاف نسبی نفوذپذیری برای اعداد رینولدز مختلف محاسبه و نتایج آن به تفکیک برای شکستگی‌های *SMD* به *SYM* در شکل ۱۲ ترسیم شده است. ارزیابی شکل ۱۲ نشان می‌دهد، روابط کلاسیک هندسی دارای خطای نسبی بین ۵ تا ۳۵٪ هستند. در بیشتر موارد، کمترین خطای نسبی بین نفوذپذیری حاصل از روابط کلاسیک هندسی و شبیه‌سازی عددی مربوط به چیدمان دهانه *CI* و بیشترین اختلاف مربوط به *CII* است. همچنین، در عمده موارد، خطای نسبی روابط کلاسیک هندسی برای شکستگی‌های *SMD* بیشتر از *SYM*



(ب)



(الف)

شکل ۱۲. متوسط خطای نسبی بین نفوذپذیری روابط کلاسیک هندسی و شبیه‌سازی عددی برای شکستگی‌های: الف) *SMD*، ب) *SYM*.

جریان سیال درون شکستگی‌ها و در مقیاس میکروسکوپی با استفاده از معادلات مشتقات جزئی غیر خطی ناویر استوکس بیان می‌شود که حل تحلیلی این معادلات همچنان به‌عنوان یکی از چالش‌های بزرگ در علوم مکانیک سیالات و فیزیک مطرح است. به همین دلیل، در سالیان اخیر، استفاده از روش‌های حل عددی این معادله به‌طور گسترده‌ای توسعه یافته است. در حال حاضر، دینامیک سیال محاسباتی (*CFD*) و روش‌های عددی حل معادلات ناویر استوکس به‌عنوان ابزاری

۵- بحث

به‌طور کلی مدل‌های ریاضی (از قبیل معادلات تعادل جرم، شرایط اولیه سیال و شرایط مرزی روی مسیرهای جریان سیال) برای بیان مسائل انتقال و جریان سیال در دامنه مورد مطالعه برای هر نقطه در داخل سیال (فاز) قابل ارائه هستند. این توصیف‌های ریاضی که تحت عنوان "سطح میکروسکوپی" بیان می‌شوند، رفتار سیال را در هر نقطه‌ای در داخل دامنه که سیال در آنجا حضور داشته باشد بررسی می‌کنند. رفتار

بیشتر از ۱۰٪ است) و با افزایش دبی جریان و عدد رینولدز، اختلاف بین افت فشار استاتیک شکستگی‌های *SMD* به *SYM* به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد، برای شکستگی‌های باز، تأثیر زبری سطوح بر روی افت فشار استاتیک بیشتر از چیدمان دهانه مکانیکی بوده و هر چه عدد رینولدز بیشتر باشد، این اثرات (بیشتر بودن تأثیر زبری نسبت به تأثیر آرایش دهانه مکانیکی) نیز مشهودتر خواهد شد.

نفوذپذیری یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی شکستگی‌های سنگی در مباحث مربوط به مخازن نفتی و مدل‌سازی هیدرولیکی آن است. با توجه به اهمیت این ویژگی در مباحث مهندسی هیدرولیک مخزن، نتایج شبیه‌سازی از این دیدگاه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای تمامی شکستگی‌های مورد بررسی، مقدار افت فشار استاتیک (و گرادیان افت فشار) با دبی جریان عبوری نفت در داخل شکستگی (و یا عدد رینولدز) به‌صورت غیر خطی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، نفوذپذیری شکستگی‌ها تابعی از عدد رینولدز (و یا دبی جریان عبوری) بوده و با افزایش عدد رینولدز، مقدار نفوذپذیری کاهش می‌یابد. کاهش مقدار نفوذپذیری شکستگی‌ها با افزایش عدد رینولدز به معنای غیرخطی شدن جریان بوده و روند کاهشی نیز به معنای افزایش وابستگی افت فشار به دبی جریان (انحراف از رابطه خطی به سمت روابط با توان بیش از یک) است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی جریان و روابط هندسی کلاسیک جریان در شکستگی‌ها نشان می‌دهد، عمده روابط هندسی کلاسیک، مقدار نفوذپذیری را بیشتر از شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی می‌کند.

روابط کلاسیک هندسی دارای خطای نسبی بین ۵ تا ۳۵٪ بوده و هرچه نفوذپذیری شکستگی‌ها کمتر باشد (به

سودمند برای بررسی مسائل مرتبط با دینامیک سیال مطرح که در مقاله حاضر نیز از این روش استفاده شده است. استفاده کاربردی از روش عددی حل معادلات ناویر استوکس نیازمند صحت سنجی^۱ و اعتبارسنجی^۲ خواهد بود. در این پژوهش، صحت سنجی شبیه‌سازی عددی با مقایسه نتایج مربوط به شکستگی ایده آل انجام شد که نتایج این مرحله حاکی از صحت محاسبات عددی است. با در نظر گرفتن صحت محاسبات عددی، می‌توان از این ابزار برای مقاصد پژوهشی و به‌منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف شکستگی و سیال استفاده نمود. 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 می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد اصلی در مطالعات آینده در نظر گرفته شود.

بخش عمده‌ای از شبیه‌سازی‌های عددی جریان نفت با هدف ارزیابی تأثیر دو پارامتر اصلی شامل ۱- زبری سطوح شکستگی و ۲- تأثیر الگوی چیدمان دهانه مکانیکی (بر روی پلان شکستگی) انجام شده است. تأثیر این دو پارامتر به‌طور جداگانه (مستقل از هم) و با استفاده از مقادیر بی‌بعد شده نتایج افت فشار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، مقدار افت فشار شکستگی‌های بازسازی‌شده در حدود ۲ تا ۶ درصد بیشتر از شکستگی مبنا بوده و با افزایش عدد رینولدز، مقدار اختلاف افت فشار بین شکستگی‌های بازسازی شده و شکستگی مبنا به‌صورت غیر خطی کاهش می‌یابد. همچنین، برای مقادیر یکسان از دبی جریان عبوری (و یا مقادیر یکسان عدد رینولدز)، افت فشار استاتیک جریان در شکستگی‌های با دیواره‌های متقارن (*SYM*) کمتر از شکستگی با یک دیواره صاف و دیواره زبر (*SMD*) بوده (اختلاف مقادیر افت فشار در این دو حالت

¹ Verification

² Validation

معنای زبری بیشتر سطوح شکستگی، تغییرات فضایی بیشتر دهانه مکانیکی بر روی پلان شکستگی)، از اعتبار روابط هندسی کلاسیک کاسته می‌شود. از طرف دیگر، مقادیر نفوذپذیری حاصل از نتایج شبیه‌سازی تابعی از زبری سطوح، نحوه چیدمان دهانه مکانیکی و عدد رینولدز بوده، در حالی که روابط هندسی کلاسیک مستقل از ویژگی‌ها بوده و این روابط در اعمال این ویژگی‌ها در رفتار جریان نفت در شکستگی‌ها دچار نقایص زیادی هستند. اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و روابط کلاسیک عمدتاً به دلیل زبری سطوح و جریان کانالیزه است.

در حقیقت، هر چه زبری سطوح شکستگی افزایش می‌یابد، انحراف از قانون مکعب بیشتر شده و کار آبی روابط هندسی کلاسیک نیز کاهش می‌یابد. در حقیقت، با افزایش زبری (ناشی از هر دو پارامتر نحوه چیدمان دهانه مکانیکی بر روی پلان و نحوه اعمال زبری به سطوح شکستگی) افت فشار جریان در داخل شکستگی افزایش یافته و انحراف از حالت ایده آل (قانون مکعب) و همچنین روابط هندسی کلاسیک بیشتر می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی زبر و باز مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. هدف از این مقاله، بررسی تأثیر دو پارامتر اصلی ۱- زبری سطوح شکستگی و ۲- تأثیر الگوی چیدمان دهانه مکانیکی بر روی رفتار جریان و همچنین، اعتبارسنجی روابط هندسی کلاسیک جریان نفت در شکستگی‌های سنگی است. شبیه‌سازی عددی جریان نفت در داخل شکستگی‌های سه بعدی (برای هندسه‌های مختلف) به صورت حل عددی هم‌زمان معادلات ناویر استوکس و

پیوستگی با روش حجم محدود و با استفاده از نرم‌افزار *FLUENTTM* انجام شده و نتایج شبیه‌سازی عددی از دیدگاه‌های مختلفی مورد تحلیل قرار گرفته است. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با روابط هندسی کلاسیک جریان در شکستگی‌های سنگی و با هدف اعتبارسنجی این روابط مقایسه شده است. بر اساس ارزیابی‌های انجام شده در مراحل مختلف این مقاله، موارد زیر به‌عنوان مهم‌ترین نتایج این پژوهش حاصل شده است:

۱. نتایج شبیه‌سازی عددی جریان درون شکستگی ایده آل تطابق بسیار خوبی با حل تحلیلی داشته و این انطباق نشان دهنده صحت و دقت روش عددی حجم محدود برای شبیه‌سازی جریان است. با توجه به نتایج صحت‌سنجی، شبه سازی عددی جریان به روش حجم محدود را می‌توان به‌عنوان یک ابزار مناسب برای مقاصد پژوهشی به‌ویژه در مباحث مرتبط با ژئومکانیک نفت مورد استفاده قرار داد.

۲. مقادیر نفوذپذیری حاصل از نتایج شبیه‌سازی تابعی از زبری سطوح، نحوه چیدمان دهانه مکانیکی و عدد رینولدز بوده، در حالی که روابط هندسی کلاسیک مستقل از ویژگی‌ها بوده و این روابط در اعمال این ویژگی‌ها در رفتار جریان نفت در شکستگی‌ها دچار نقایص زیادی هستند.

۳. روابط کلاسیک هندسی دارای خطای نسبی بین ۵ تا ۳۵٪ بوده و هرچه نفوذپذیری شکستگی‌ها کمتر باشد (به معنای زبری بیشتر سطوح شکستگی، تغییرات فضایی بیشتر دهانه مکانیکی بر روی پلان شکستگی)، از اعتبار روابط هندسی کلاسیک کاسته می‌شود. همچنین، روابط کلاسیک مبتنی بر فرضیات جریان سری و جریان سری-موازی بیشترین انطباق را با نتایج شبیه‌سازی دارند.

۷- مراجع

- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: Elsevier.
- 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 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., 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., 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.
- Liu, R., Li, B., & Jiang, Y. (2016). Critical hydraulic gradient for nonlinear flow through rock fracture networks: The roles of aperture, surface roughness, and number of intersections. *Advances in Water Resources*, 53-65.
- 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.
- 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.
- Sharifzadeh, M., Mitani, Y., & Esaki, T. (2006). Rock Joint surfaces measurement and analysis of aperture distribution under different normal and shear loading using GIS. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 299–323.
- 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.
- Wang, L., Cardenas, M., Slotke, D., Ketcham, R., & Sharp, J. (2015). Modification of the Local Cubic Law of fracture flow for weak inertia, tortuosity, and roughness. *Water Resour. Res.*, doi:10.1002/2014WR015815.
- 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.
- Yu, L., Liu, R., & Jiang, Y. (2017). A Review of Critical Conditions for the Onset of Nonlinear Fluid Flow in Rock Fractures. *Geofluids*, Article ID 2176932. <https://doi.org/10.1155/2017/2176932>.
- Zimmerman, R. W., Kumar, S., & Bodvarsson, G. S. (1991). Lubrication Theory Analysis of the Permeability of Rough-walled Fractures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 233-243.
- Zimmerman, R., & Bodvarsson, G. (1996). Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in Porous Media*, 1–30.
- Zou, L., Jing, L., & Cvetkovic, L. (2015). Roughness decomposition and nonlinear fluid flow in a single rock fracture. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 118-102.

شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای سطوح زبر و مقایسه آن با روابط هندسی کلاسیک