

توزیع تنش در مخازن شکاف‌دار: اثر تراکم شکستگی، بارگذاری زاویه‌دار و پارامترهای سنگ و شکستگی

میثم خدایی، ابراهیم بی‌نیاز دلجانی*، مستانه حاجی‌پور و کسری کروب‌بی
گروه مهندسی نفت، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲

چکیده

حضور شکستگی‌های طبیعی در مخازن شکاف‌دار نقش مهمی در تعیین وضعیت تنش که تحت تأثیر تنش‌های تکتونیکی و آشفته‌گی محلی قرار دارد، ایفا می‌کند. جهت شکستگی، پایداری چاه و ناهمسانگردی تراوایی از جمله موارد وابسته به تغییرات تنش محلی هستند. امروزه برای درک بهتر رفتار ژئومکانیکی مخازن، اکثر مدل‌سازی‌های رفتار مکانیکی و هیدرولیکی با تغییرات تنش کوپل می‌شوند. در این پژوهش به منظور بررسی ارتباط بین تراکم شکستگی (به‌عنوان یکی از خواص هندسی شبکه شکستگی) و نیز بارگذاری تنش تکتونیکی زاویه‌دار، با تغییرپذیری تنش و کرنش برشی، ابتدا با استفاده از رویکرد تصادفی، شبکه شکستگی مجزا (DFN) ایجاد گردید. سپس با در نظر گرفتن ماهیت تانسوری تنش، میدان تنش با استفاده از نرم‌افزار FLAC^{2D} بر پایه روش تفاضل محدود، تعیین شد. در نهایت داده‌های تنش با استفاده از روابط ریاضی مبتنی بر تانسور، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در ادامه تأثیر چهار پارامتر مقاومت کششی سنگ، چسبندگی سنگ، سفتی نرمال شکستگی و زاویه اتساع شکستگی بر پراکندگی تنش در بارگذاری تحت زوایای مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که آشفته‌گی تنش و واریانس مؤثر که معرف پراکندگی توزیع تنش است، با تراکم شکستگی که به‌صورت تعداد شکستگی بر واحد سطح با استفاده از رویکرد نمونه‌برداری پنجره‌ای تعریف می‌شود، رابطه مستقیم دارد. همچنین مشاهده شد که جهت بارگذاری در تغییرپذیری تنش کل تأثیرگذار بوده و واریانس مؤثر، در زاویه بارگذاری ۵۰° دارای بیشترین و در ۱۷۰° دارای کمترین مقدار است. در میان پارامترها، مشخص گردید که سفتی نرمال بیشترین تأثیر را در توزیع تنش داشته و تأثیر پارامترهای سنگ بسیار ناچیز است. به‌طور کل می‌توان گفت توزیع و پراکندگی تنش در یک شبکه شکستگی متراکم با سفتی نرمال ۵۰۰ GPa/m و زاویه بارگذاری ۵۰°، دارای مقدار بیشینه است.

کلمات کلیدی: تغییرپذیری تنش، آشفته‌گی تنش محلی، واریانس مؤثر، بارگذاری زاویه‌دار، تراکم شکستگی

مقدمه

یکی از موارد مهم در مطالعات مکانیک سنگ و مباحث ژئومکانیکی در مهندسی مخازن هیدروکربوری نظیر: طراحی مهندسی سنگ، شکافت هیدرولیکی، ناپایداری دیواره چاه، تعیین تراوایی توده سنگ و تعیین فشار بهینه گل، جلوگیری از تولید ماسه و ریزش دیواره چاه، انتخاب استراتژی مناسب جهت تکمیل چاه، میزان برداشت مخزن و همچنین ارزیابی پتانسیل زمین لرزه، تعیین تنش‌های برجا و عوامل مؤثر بر آشفستگی تنش است [۱-۳]. ارزیابی تنش‌های برجا در میداین نفتی در عملیات حفاری، بهره‌برداری، تکمیل و نگهداری چاه و نیز در مباحث ژئومکانیک نفت بسیار حائز اهمیت است. همچنین در نظر گرفتن شرایط و وضعیت تنش برای پیش‌بینی دقیق رفتار مکانیکی توده سنگ‌های درزه‌دار اهمیت بسیاری دارد [۴].

بیش از چند دهه است که تلاش‌های فراوانی برای اندازه‌گیری تنش‌های برجا و بررسی نقش شکستگی‌ها و جهت بارگذاری در توزیع و آشفستگی تنش‌های تکتونیک صورت گرفته است [۵-۹]. مارتین و چندلر [۵] با استفاد از یک تحقیق آزمایشگاهی نشان دادند که در نزدیکی ساختارهای زمین‌شناسی بزرگی و جهت تنش متفاوت است و بزرگی تنش به‌طور قابل توجهی می‌تواند افزایش یا کاهش یابد و جهت تنش زمانی که ساختارهای زمین‌شناسی به‌صورت عرضی هستند می‌تواند تا 90° چرخش کند. مک نامارا و همکاران [۶] مشخصات هندسی ساختارهای مخزنی زمین‌گرمایی و رابطه آن‌ها با جهت میدان تنش را در میدان زمین‌گرمایی روتوکاوا^۱ در نیوزلند را برای درک جریان سیال در این نوع مخازن بررسی کردند. در این میدان درحالی‌که شکستگی در کل شمال غرب- جنوب شرق امتداد یافته است، ناهمگنی^۲ در جهت شیب شکستگی مشهود است. تغییرات آزمون تنش که ناشی از لغزش در سطوح شکستگی‌ها است، به‌وسیله تغییر آزمون شکستگی‌های کششی ناشی از حفاری در

هر دو طرف شکستگی‌های طبیعی نشان داده شدند. همبستگی خواص شکستگی و الگوهای تراوایی چاه نشان داد که شکستگی‌ها نقش مهمی در جریان سیال در مخازن زمین‌گرمایی روتوکاوا ایفا می‌کنند. در این مطالعه مشخص شد که محدوده‌های تراوا معمولاً دارای شکستگی با بازشدگی‌های عریض و تراکم شکستگی زیاد هستند. برونو و وینترستین [۷] با استفاده از داده‌های میدانی به‌صورت تحلیلی و مدل‌سازی اجزا محدود، تغییرات قابل توجه آزمون تنش افقی حداکثر^۳ در یک مخزن با عمق و موقعیت یک ساختار زیر سطحی را نشان دادند. دی‌لویس و همکاران [۸] راستای تنش فشاری افقی حداکثر را به‌عنوان تابعی از عمق در دو چاه تحقیقاتی در نزدیکی گسل سن اندریس^۴ در مرکز و جنوب کالیفرنیا بررسی کردند. آنها دریافتند که جهت تنش، نوسانات مقیاس- ثابت^۵ در فواصل ده سانتی متری تا چند کیلومتری گسل نشان می‌دهد. شباهت بین مقیاس نوسانات جهت تنش و مقیاس فرکانس زمین‌لرزه با اندازه گسل نشان داد که این نوسانات توسط آشفستگی تنش که خود ناشی از لغزش گسل‌ها در اندازه‌های مختلف در پوسته تحت تنش بحرانی در مجاورت گسل‌ها است، کنترل می‌شود. رجبی و همکاران [۹] اولین تجزیه و تحلیل تنش تکتونیک در حوضه کلارنس- مارتون^۶ در منطقه نیوسات والز^۷ استرالیا را انجام دادند، مشاهدات آن‌ها نشان داد که ساختارها می‌توانند نقش مهمی در کنترل تنش‌ها داشته باشند به‌طوری‌که آشفستگی تنش‌ها در نتیجه گسل‌ها و شکستگی‌ها، نقش مهمی در پایداری دیواره چاه و تراوایی مخازن به‌ویژه مخازن گازی برای استخراج ایمن و پایدار گاز متان در این منطقه ایفا می‌کند.

1. Rotokawa
2. Heterogeneity
3. Maximum Horizontal Stress
4. San Andreas Fault
5. Scale-Invariant Fluctuations
6. Clarence-Moreton Basin
7. New South Wales

ارزیابی (۱) تأثیر تنش مرزی فشاری، (۲) ترک خوردگی به وسیله گسیختگی کششی در توده سنگ و شکستگی و (۳) جابه‌جایی برشی در طول شکستگی‌ها در تراوایی معادل آن‌ها، استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند که نواحی گسیختگی منجر به (۱) ایجاد اتصال جدید برای جریان سیال در بین شکستگی‌ها، (۲) ایجاد تغییرات ناهمسانگردی مهم در مسیره‌های جریان سیال و (۳) کاهش چشمگیر گرادیان فشار سیال منفذی می‌گردد. همچنین دریافتند که تراوایی معادل توده سنگ شکافدار بسیار حساس به سفتی نرمال شکستگی‌ها، تراوایی نواحی گسیختگی کششی و نمای قانون توانی ۹ تغییر تراوایی است.

در این پژوهش‌ها مطالعه آشفتگی تنش براساس رویکردهای عددی/ بردار که به‌صورت جداگانه به تجزیه و تحلیل بزرگی و جهت تنش‌های اصلی می‌پردازد، صورت گرفته است، در صورتی که تنش به‌صورت یک تانسور در طبیعت است و هر دو ویژگی بزرگی و جهت تنش باید مدنظر قرار بگیرد، که در این مطالعه پس از ایجاد شبکه شکستگی به روش تصادفی، با ترکیب تحلیل عددی و ریاضی، تغییرپذیری تنش محلی و کرنش برشی در سنگ‌های شکافدار در سه مقدار مختلف تراکم شکستگی و نیز تحت شرایط مختلف بارگذاری استاتیکی زاویه‌دار تنش، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در مطالعات گذشته، تحقیقات کمی درخصوص تأثیر پارامترهای مختلف سنگ و شکستگی بر روی آشفتگی میدان تنش صورت گرفته است که در این پژوهش چهار پارامتر مختلف شامل: مقاومت کششی سنگ، چسبندگی سنگ، سفتی نرمال شکستگی و زاویه اتساع شکستگی مورد ارزیابی قرار گرفت.

1. Discrete Fracture Network (DFN)

2. Stochastic

3. Finite Element Method (FEM)

4. Finite Difference Method (FDM)

5. Percolation

6. Sellafeld Area

7. Representative Elementary Volume (REV)

8. Crack Tensor

9. Power Law Exponent

پژوهش‌های زیادی درخصوص ایجاد شبکه شکستگی مجزا^۱ با استفاده از رویکرد تصادفی^۲ به منظور بررسی رفتار ژئومکانیکی و هیدرومکانیکی سنگ‌های شکافدار و نیز به‌کار بردن مدل‌های پیوسته (روش اجزا محدود^۳ و روش تفاضل محدود^۴) به‌عنوان روش عددی و مدل‌سازی ژئومکانیکی، صورت گرفته است. رویکرد تصادفی توسط بالبرگ و بینن بوم [۱۰] و روبینسون [۱۱] با هدف مطالعه تراوش^۵ تجمع شکستگی با اندازه محدود، و توسط لانگ و همکاران [۱۲] و اندرسون و همکاران [۱۳] با هدف بررسی جریان سیال در شبکه‌های شکستگی پیچیده آغاز شد. مین و همکاران [۱۴] یک الگوی شکستگی تصادفی دو بعدی را با استفاده از داده‌های میدانی در منطقه سلافیلد^۶، بریتانیا برای تعیین تانسور نفوذپذیری معادل توده سنگ شکافدار ایجاد کردند. باغبانان و جینگ [۱۵] شبکه شکستگی مجزا را با فرض اینکه پارامترهای هندسی شکستگی‌ها به‌صورت آماری در شبکه توزیع شده‌اند، به‌منظور بررسی رفتار هیدرولیکی و هیدرومکانیکی وابسته به اندازه توده سنگ (بررسی خواص هیدرولیکی و تراوایی وابسته به تنش با در نظر گرفتن همبستگی بین طول و بازشدگی شکستگی‌ها) و تخمین حجم اولیه معرف^۷، ایجاد کردند. ادا و همکاران [۱۶] یک رابطه تنش/ کرنش الاستیک با استفاده از روش تانسور ترک^۸ برای تعیین تأثیر درزه‌ها بر رفتار الاستیک توده سنگ در یک محیط سه بعدی روش اجزا محدود ایجاد کردند. روت کوویست و همکاران [۱۷] با استفاده از مدل پیوسته و رویکرد تانسور ترک مدل کوپل ژئومکانیکی و جریان و انتقال سیال در سنگ شکافدار را بررسی کردند. فیگوئردو و همکاران [۱۸] رفتار هیدرومکانیکی یک سنگ شکافدار در عمق ۱۰۰۰ m را به‌عنوان تابعی از مقادیر مختلف فشار سیال منفذی مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش دسته درزه‌ها براساس نقشه رخنمون ساخته شد و از مدل پیوسته (روش تفاضل محدود) به‌عنوان مدل عددی به‌منظور

مراحل پژوهش

ایجاد شبکه شکستگی مجزا (DFN)

نشان می‌دهد، درحالی‌که شدت شکستگی، بیانگر مجموع طول شکستگی بر واحد حجم، سطح و طول است که در این مطالعه تراکم شکستگی با استفاده از رویکرد نمونه‌برداری پنجره‌ای^۱ که به‌صورت تعداد شکستگی بر واحد سطح تعریف می‌شود، محاسبه گردید [۲۲]:

$$P_{20} = P_{WS} = \frac{N}{A}, A = L^2 \quad (2)$$

در این رابطه N تعداد شکستگی، A سطح و L اندازه مدل است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار مهندسی شبکه شکستگی مجزای القلندیس^{۱۱} [۲۳] شبکه شکستگی مجزا به روش تصادفی با در نظر گرفتن اندازه مدل $L = 1 \text{ m}$ ساخته شد [۱۸]. موقعیت شکستگی با استفاده از تابع توزیع یکنواخت و جهت شکستگی‌ها با استفاده از تابع توزیع فیشر به‌صورت کاملاً تصادفی و طول شکستگی‌ها با استفاده از مدل قانون توانی با محدوده $l_{\min} = 0.02 \text{ m}$ و $l_{\max} = 50 \text{ m}$ ایجاد شد. با در نظر گرفتن نمای طول قانون توانی $1/5$ و سه مقدار تراکم شکستگی 8.0 m^{-2} ، 16.0 m^{-2} و 32.0 m^{-2} شبکه شکستگی مجزا ایجاد گردید. در شکل ۱ شبکه شکستگی مجزا به روش تصادفی با در نظر گرفتن بلوک ۱۰ در ۱۰ برای ترسیم میدان تراکم شکستگی، نشان داده شده است.

مدل‌سازی ژئومکانیکی

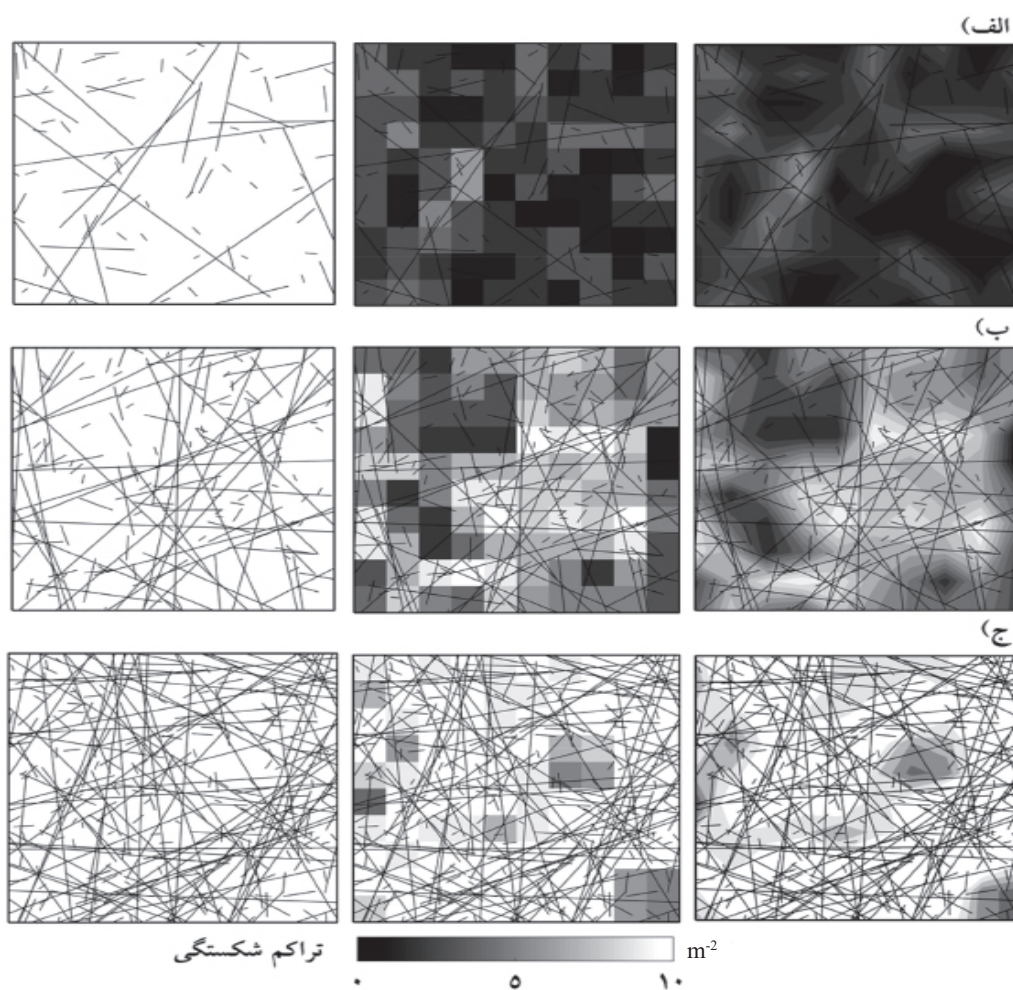
در این پژوهش از نرم‌افزار FLAC^{2D} [۲۴] به‌عنوان روش تفاضل محدود برای تعیین توزیع تنش در پاسخ به بارگذاری تنش تکنونیک در زوایای مختلف (صفر، ۱۰°، ۲۰°، ... و ۱۷۰°) در نسبت تنش ۳ با در نظر گرفتن ۳۰ MPa و ۱۰ MPa (شکل ۲)، استفاده گردید.

با توجه به مشکلات اندازه‌گیری دقیق سیستم‌های شکستگی طبیعی سه بعدی، رویکرد تصادفی ساخت شبکه شکستگی مجزا با استفاده از داده‌های آماری توسعه داده شدند و به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. در رویکرد تصادفی، شکستگی‌ها در مدل دو بعدی به‌صورت خطوط راست، و در مدل سه بعدی به‌صورت صفحه مسطح/چندضلعی و خواص هندسی مانند: موقعیت، فرکانس^۱، طول، جهت و بازشدگی شکستگی‌ها به‌عنوان متغیرهای تصادفی مستقل در نظر گرفته می‌شوند. داده‌های جهت می‌تواند با استفاده از توابع توزیع فیشر^۲، نرمال^۳، یا یکنواخت^۴ پردازش گردد [۱۹]، همچنین طول شکستگی‌ها نیز ممکن است توزیع‌های نمایی منفی^۵، لاگ نرمال^۶، گاما^۷ و یا قانون توانی را نشان دهند [۲۰]. بازشدگی شکستگی نیز می‌تواند از توزیع‌های لاگ نرمال یا قانون توانی پیروی کند [۲۱]. در این مقاله طول شبکه شکستگی با استفاده از قانون توانی طبق رابطه زیر ساخته شد [۲۰]:

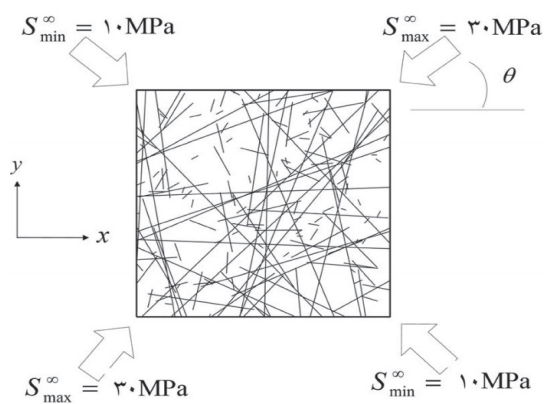
$$n(l) = \alpha l^{-a} = \frac{\alpha}{l^a}, l \in [l_{\min}, l_{\max}] \quad (1)$$

که در این روابط $n(l)$ تعداد شکستگی، a نمای طول قانون توانی، α ترم تراکم، l طول شکستگی، l_{\min} و l_{\max} کوچکترین و بزرگترین طول شکستگی هستند. در تئوری، برای مدل دو بعدی در بازه $[1, \infty]$ و بازه $[2, \infty]$ برای مدل سه بعدی محدود می‌شود، با این حال اندازه‌گیری‌های گسترده براساس نقشه‌های پیمایش نشان می‌دهد که در سیستم‌های شکستگی طبیعی به‌طور کلی a بین $1/3$ تا $3/5$ متغیر است. ترم تراکم α وابسته به تعداد کل شکستگی‌ها در سیستم بوده و به‌عنوان تابعی از جهت‌های شکستگی متفاوت است. فرکانس شکستگی را می‌توان از دو منظر تراکم شکستگی^۸ و شدت شکستگی^۹ توصیف کرد. تراکم شکستگی، تعداد شکستگی بر واحد حجم، سطح و طول را

1. Frequency
2. Fisher
3. Normal
4. Uniform
5. Negative Exponential
6. Lognormal
7. Gamma
8. Fracture Density
9. Fracture Intensity
10. Window Sampling
11. Alghalandis Discrete Fracture Network Engineering (ADFNE)



شکل ۱ شبکه شکستگی مجزا و میدان تراکم شکستگی. الف: تراکم شکستگی $۸۰ m^2$ ، ب: تراکم شکستگی $۱۶۰ m^2$ و ج: تراکم شکستگی $۳۲۰ m^2$



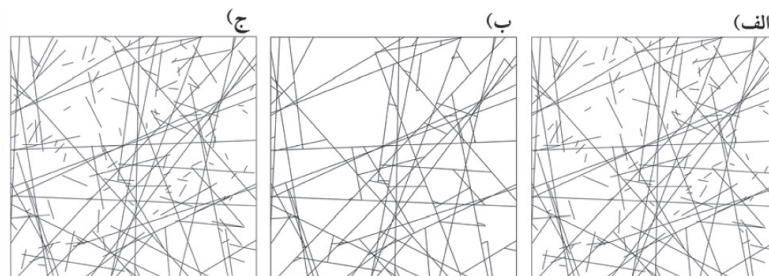
شکل ۲ بارگذاری تنش تکتونیکی

استفاده از رابطه زیر که در آن d اندازه المان مش است را نشان می‌دهد، محاسبه می‌شود [۱۷، ۱۸ و ۲۵]:

$$\frac{1}{E_F} = \frac{1}{E_R} + \frac{1}{k_n d} \quad (۳)$$

شکستگی‌ها با مواد پرکننده یا با انتقال تنش از طریق سطوح تماس در نظر گرفته شده‌اند. این مسئله یک روند واقع بینانه است که باعث می‌شود، تغییرات در بازشدگی شکستگی که خود ناشی از تغییرات در تنش نرمال مؤثر در شکستگی‌هاست، در نظر گرفته شود. شکستگی‌ها می‌تواند مواد پرکننده و چسبندگی صفر داشته باشد و در عین حال هنوز هم انتقال تنش برشی نیز وجود داشته باشد که توسط زاویه اصطکاک کنترل می‌شود. مقاومت کششی نیز معمولاً یک مقدار کاملاً کوچک برای یک سنگ بکر است که این مقدار حتی برای سنگ پرشده با مواد کوچکتر است [۱۷ و ۱۸].

مهم‌ترین مزیت این نرم‌افزار حفظ کامل انتهای بسته شکستگی‌ها و عدم نگهداری تنها بدنه اصلی^۱ بعد از مش‌بندی است. شکل ۳ مقایسه شبکه شکستگی بعد از مش‌بندی در روش تفاضل محدود (نرم‌افزار FLAC^{2D}) و حالت بدنه اصلی را نشان می‌دهد که در برخی روش‌های عددی (مانند نرم‌افزار UDEC به‌عنوان روش بلوکی اجزا منفصل) فقط بدنه اصلی بعد از مش‌بندی حفظ می‌شود. برای سنگ بکر و رفتار تنش/ کرنش برشی شکستگی، مدل موهر-کلمب مورد استفاده قرار گرفت که خواص مکانیکی سنگ آن مشخصات یک نمونه سنگ آهک است. در جدول ۱ پارامترهای اصلی سنگ و شکستگی برای مدل ژئومکانیکی ارائه شده است. شکستگی‌ها با پرشدگی‌های مواد می‌تواند به‌عنوان یک مدل معادل مواد جامد در نظر گرفته شود. مدل الاستیک شکستگی با



شکل ۳ شبکه شکستگی مجزا. الف) ایجاد شده به روش تصادفی، ب) حالت بدنه اصلی و ج) بعد از مش‌بندی در نرم‌افزار FLAC^{2D}

جدول ۱ پارامترهای اصلی سنگ و شکستگی [۱۸]

۲۰ GPa	مدول الاستیک E_R	سنگ
۰/۳	نسبت پواسون ν	
۵ MPa	مقاومت کششی σ_{IR}	
۳۰ MPa	چسبندگی C_R	
۲۵°	زاویه اصطکاک ϕ_R	
۴ GPa	مدول الاستیک E_F	شکستگی
۰/۱۸	نسبت پواسون ν	
صفر	مقاومت کششی σ_{IF} ، زاویه اتساع ψ_F و چسبندگی C_F	
۲۵°	زاویه اصطکاک ϕ_F	
۱۰۰۰ GPa/m	سفتی نرمال k_n	

سنگ‌های شکافدار توسط فیگورددو و همکاران [۱۸] را نشان می‌دهد. در هر دو مطالعه برای اندازه مدل $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ، تعداد مش ۴۰۰۰۰ (مش‌بندی 200×200) با طول المان مش 0.5 m در نظر گرفته شد. در مطالعه فیگورددو و همکاران [۱۸] مطابق شکل ۵ یک تنش مرزی $\sigma_{xx}^b = 50\text{ MPa}$ در جهت محور x اعمال شد. تغییرات بین تنش نرمال σ_{xx} و تنش مرزی σ_{xx}^b با فاصله c در $r/2$ در طول خط $x=0$ و $y=0$ دور از شکستگی، اندازه‌گیری و با راه حل تحلیلی مقایسه گردید. نتایج مقایسه در شکل ۶ نشان داده شده است. نمودار نشان می‌دهد که تفاوت بین مدل ساخته شده با راه حل تحلیلی کمتر از 5% بوده و این مدل برای محاسبات توزیع تنش و تمرکز تنش در اطراف شکستگی کاملاً مناسب است.

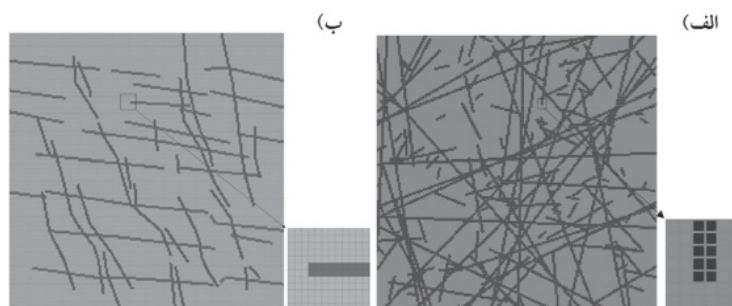
روابط ریاضی مبتنی بر تانسور

در این مطالعه میدان تنش از شبیه‌سازی ژئومکانیکی به‌دست آمد که در آن تمام مولفه‌های تانسور تنش دوم کوشی در هر گره تعیین می‌شود. برای تجزیه و تحلیل داده‌های تنش از فرمول‌های ریاضی مبتنی بر تانسور که اخیراً توسعه داده شده است، استفاده شد [۲۶-۲۸].

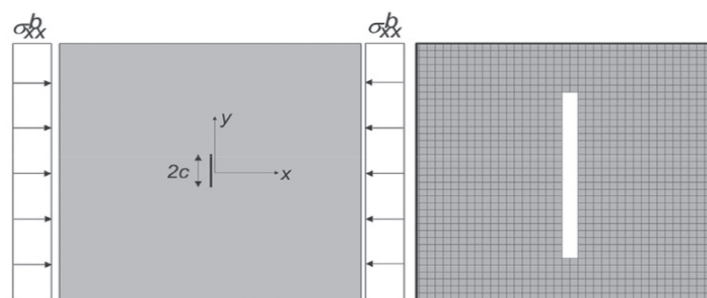
در این مقاله با توجه به بررسی تأثیر ۴ پارامتر مختلف سنگ و شکستگی بر توزیع تنش، چسبندگی سنگ C_R در مقادیر 15 MPa ، 20 MPa و 30 MPa ، مقاومت کششی سنگ σ_{IR} در مقادیر 5 MPa ، 10 MPa و 20 MPa ، سفتی نرمال k_n در مقادیر 500 GPa/m ، 1000 GPa/m و 2000 GPa/m [۱۸] و زاویه اتساع شکستگی ψF ، در صفر و 15° مورد ارزیابی قرار گرفت.

صحت سنجی

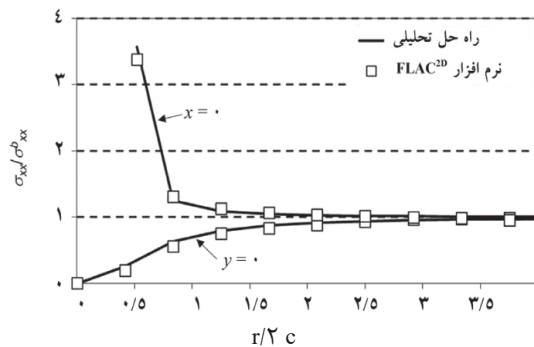
فیگورددو و همکاران [۱۸] برای بررسی استفاده از اندازه و تعداد المان مش، به منظور تخمین درست از تنش، یک مدل ساده با یک شکستگی عمودی به طول 2 c معادل 0.12 m ایجاد کردند. فرض بر این بود که شکستگی بدون پرشدگی مواد یا کاملاً باز و بدون هیچ سفتی نرمال یا تنش انتقالی از سطح تماس باشد. هندسه و اندازه المان مش به‌کار رفته در پژوهش آن‌ها با مدل ساده برای ارزیابی یکسان در نظر گرفته شد. شکل ۴ (الف) هندسه و مش‌بندی در مدل تفاضل محدود به‌کار رفته در پژوهش حاضر و شکل ۴ (ب) هندسه و مش‌بندی در مدل تفاضل محدود در مطالعه رفتار هیدرومکانیکی



شکل ۴ هندسه و مش‌بندی در مدل تفاضل محدود به‌کار رفته. (الف) در پژوهش حاضر و (ب) در پژوهش فیگورددو و همکاران [۱۸]



شکل ۵ جزئیات مش در مطالعه رفتار یک شکستگی عمودی با طول 2 c [۱۸]



شکل ۶ تغییرات بین تنش نرمال و تنش مرزی با فاصله $r/2c$ در مدل ساخته شده و روش تحلیلی [۱۸]

جایی که $Vech(\cdot)$ تابع هف- وکتوریزیشن^۲ است. هرچه واریانس مؤثر بیشتر باشد پراکندگی میدان تنش نیز بیشتر است.

نتایج و تحلیل داده‌ها

شکل ۸ توزیع آشفتگی تنش محلی در سنگ شکافدار در تراکم شکستگی‌های مختلف تحت زاویه بارگذاری صفر، و شکل ۹ توزیع آشفتگی تنش محلی برای نمونه تراکم شکستگی $m^{-2} 160$ تحت زوایای مختلف تنش تکتونیک اعمال شده را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، آشفتگی تنش محلی در نوک و فصل مشترک (تقاطع) شکستگی‌ها جایی که برهمکنش مکانیکی و گسیختگی شکننده می‌تواند اتفاق بیفتد، مشهود است. مطابق شکل ۸ توزیع آشفتگی تنش محلی $(d(S, \bar{S}))$ با تراکم شکستگی $(p_0 20)$ رابطه مستقیم داشته و با افزایش تراکم، توزیع آشفتگی تنش نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۰ مقادیر واریانس مؤثر (V_e) که معرف پراکندگی تنش در کل میدان است، در زوایای مختلف بارگذاری تنش (از صفر تا 170°) در سه مقدار تراکم شکستگی را نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش تراکم شکستگی از $m^{-2} 80$ تا $m^{-2} 320$ ، میزان پراکندگی توزیع تنش نیز در زوایای مختلف افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در زوایای مشابه، میزان واریانس مؤثر برای تراکم شکستگی $m^{-2} 320$ بیشترین مقدار و برای $m^{-2} 80$ کمترین مقدار است.

در مدل‌های دو بعدی میدان تانسور تنش S ، که از n جز اندازه تنش تشکیل شده است، تانسور تنش جز i ام به این صورت نوشته می‌شود:

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{xx,i} & S_{xy,i} \\ \text{symmetric} & S_{yy,i} \end{bmatrix} \quad (4)$$

میدان تنش میانگین نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n S_{xx,i} & \sum_{i=1}^n S_{xy,i} \\ \text{symmetric} & \sum_{i=1}^n S_{yy,i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

برای تعیین فاصله یا اختلاف بین تانسور تنش محلی S_i و تانسور تنش میانگین \bar{S} از فاصله اقلیدس استفاده شد:

$$d(S_i, \bar{S}) = \|S_i - \bar{S}\|_F \quad (6)$$

جایی که $\|\cdot\|$ نشانگر نرم اقلیدسی^۱ است. در شکل ۷ مثالی از شرایط بارگذاری تنش تعیین تانسور تنش محلی در دو موقعیت مختلف نشان داده شده است. برای محاسبه واریانس مؤثر که پراکندگی تنش در یک سنگ شکافدار را توصیف می‌کند داریم:

$$V_e(S) = \frac{1}{2^{p(p+1)}} \sqrt{|\Omega|} \quad (7)$$

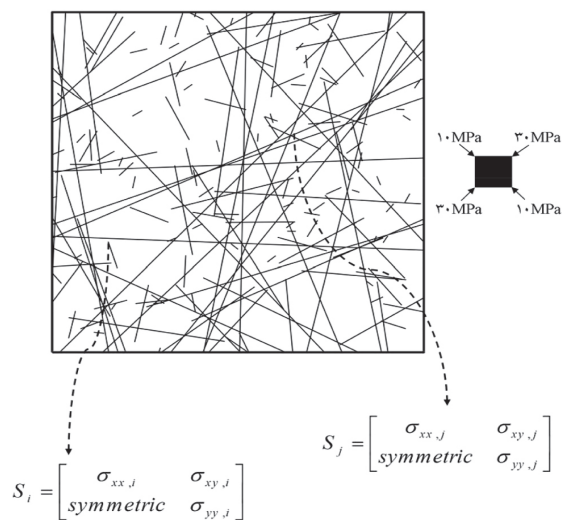
جایی که $|\cdot|$ دترمینان ماتریس Ω ، p بعد تانسور تنش (در اینجا $p=2$) (با توجه به اینکه مدل دو بعدی است)، \bar{S} میانگین بردار تنش و Ω ماتریس کوواریانس بردار تنش است.

(۸)

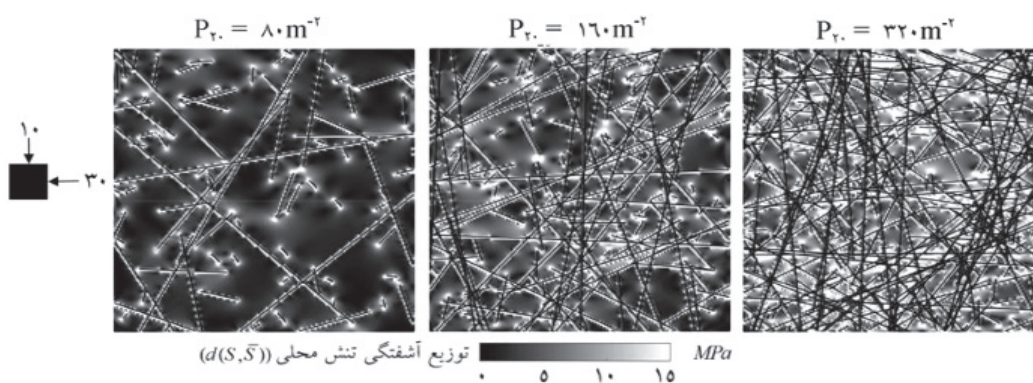
$\Omega = \text{cov}(s, s) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(s_i - \bar{s})(s_i - \bar{s})^T]$ ، $\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i$ برای تانسور تنش S_i ، فرم اجزای متمایز یک بردار تنش S_i به صورت زیر است:

$$s_i = \text{vech}(S_i) = [S_{xx,i} \quad S_{xy,i} \quad S_{yy,i}]^T = [S_{xx,i} \quad S_{yx,i} \quad S_{yy,i}]^T \quad (9)$$

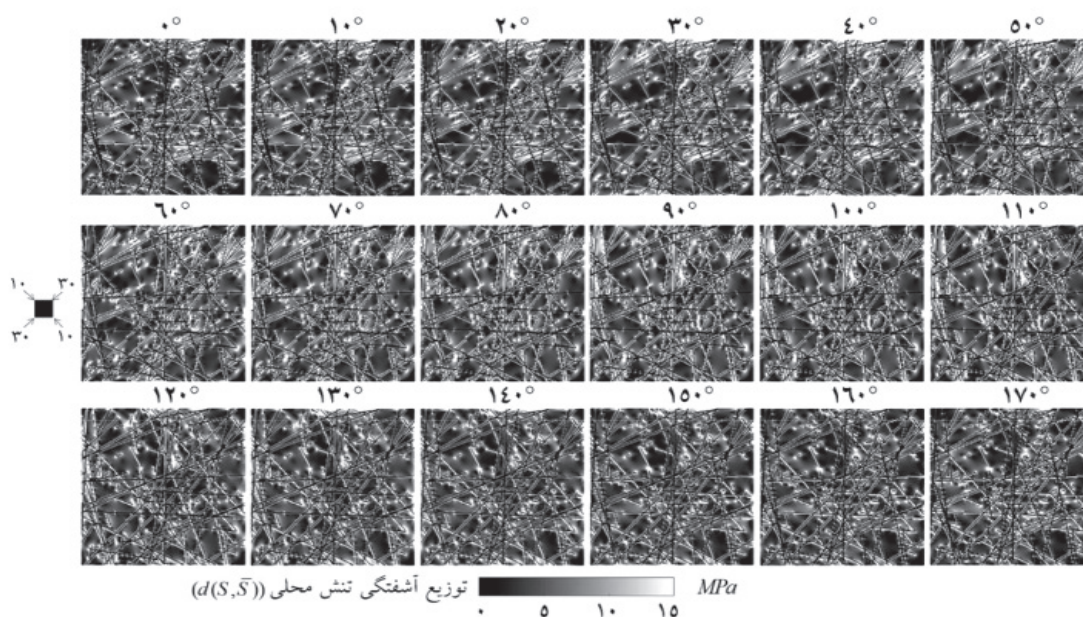
1. Euclidean Norm
2. Half-Vectorization



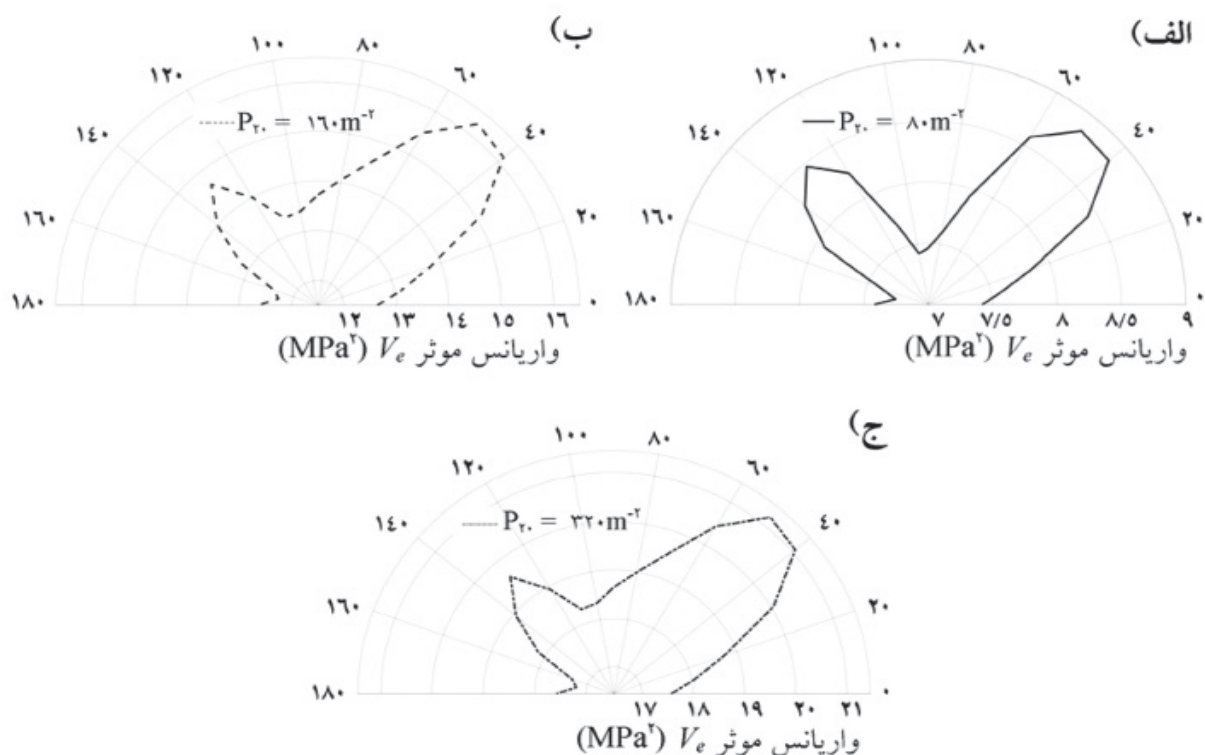
شکل ۷ شرایط بارگذاری تنش تکتونیک و تعیین تانسور تنش محلی در دو موقعیت مختلف



شکل ۸ توزیع آشفته‌گی تنش محلی در سنگ شکاف‌دار در تراکم شکستگی‌های مختلف تحت زاویه بارگذاری صفر



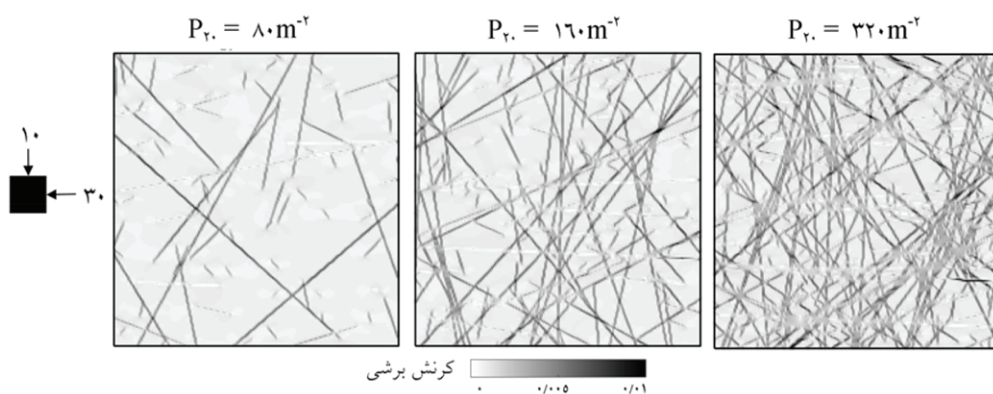
شکل ۹ توزیع آشفته‌گی تنش محلی در سنگ شکاف‌دار تحت بارگذاری تنش تکتونیک در زوایای مختلف در نمونه تراکم شکستگی 160 m^{-2}



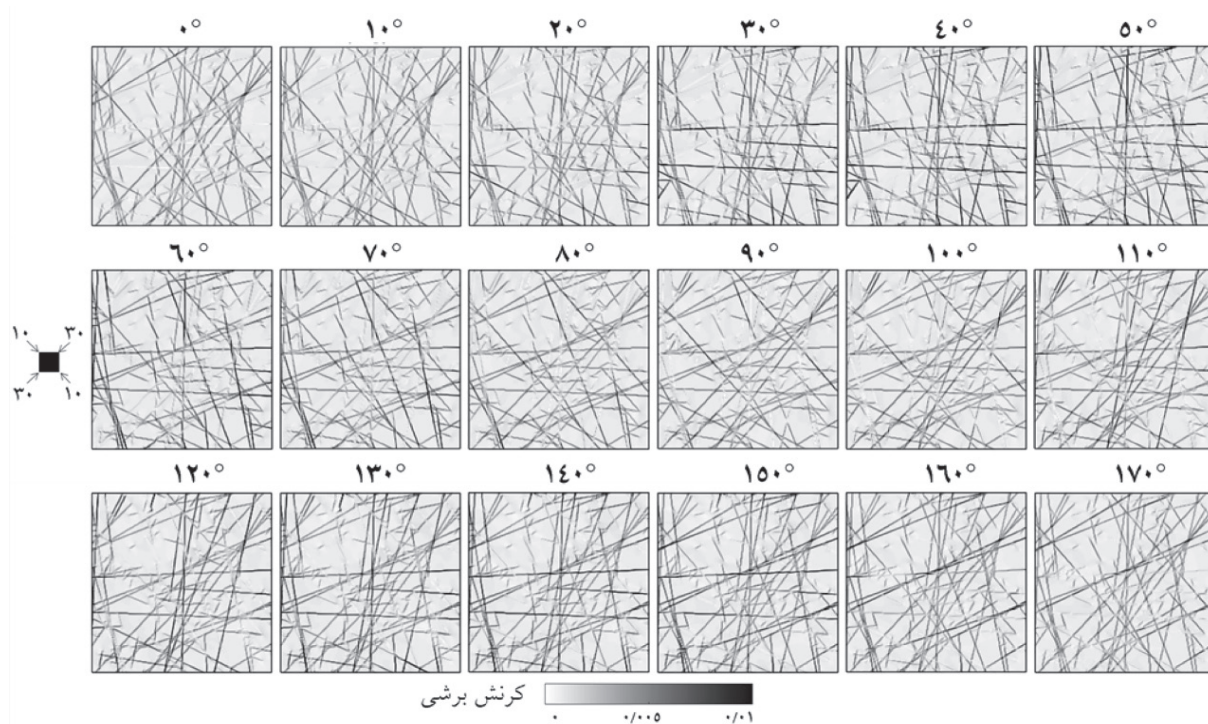
شکل ۱۰ واریانس مؤثر در زوایای مختلف بارگذاری تنش در پارامترهای اصلی. الف) تراکم شکستگی 80 m^{-2} ، ب) تراکم شکستگی 160 m^{-2} ، ج) تراکم شکستگی 320 m^{-2} و د) تراکم شکستگی 160 m^{-2}

زاویه بارگذاری، شکستگی‌هایی که در جهت زاویه بارگذاری قرار دارند (شکستگی‌های هم راستا با جهت بارگذاری)، مقدار کرنش برشی در آنها کمتر است. اما شکستگی‌هایی که دارای زاویه با جهت بارگذاری هستند، مقدار کرنش برشی بیشتری دارند. شکل ۱۳ واریانس مؤثر برای مقادیر مختلف k_{\parallel} به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر بر رفتار شکستگی (که تنش نرمال در هر المان را به جابه‌جایی نرمال مرتبط می‌کند)، در زوایای مختلف بارگذاری در نمونه تراکم شکستگی 160 m^{-2} را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که این پارامتر تأثیر مهمی بر پراکندگی تنش داشته و به‌طور کلی با افزایش k_{\parallel} ، مقادیر V_e کاهش می‌یابد. در شکل ۱۴ توزیع آشفته‌گی تنش محلی در مقادیر مختلف سفتی نرمال (به‌عنوان مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر بر توزیع و پراکندگی تنش) در زاویه بارگذاری صفر و نمونه تراکم شکستگی 160 m^{-2} ، نشان داده شده است.

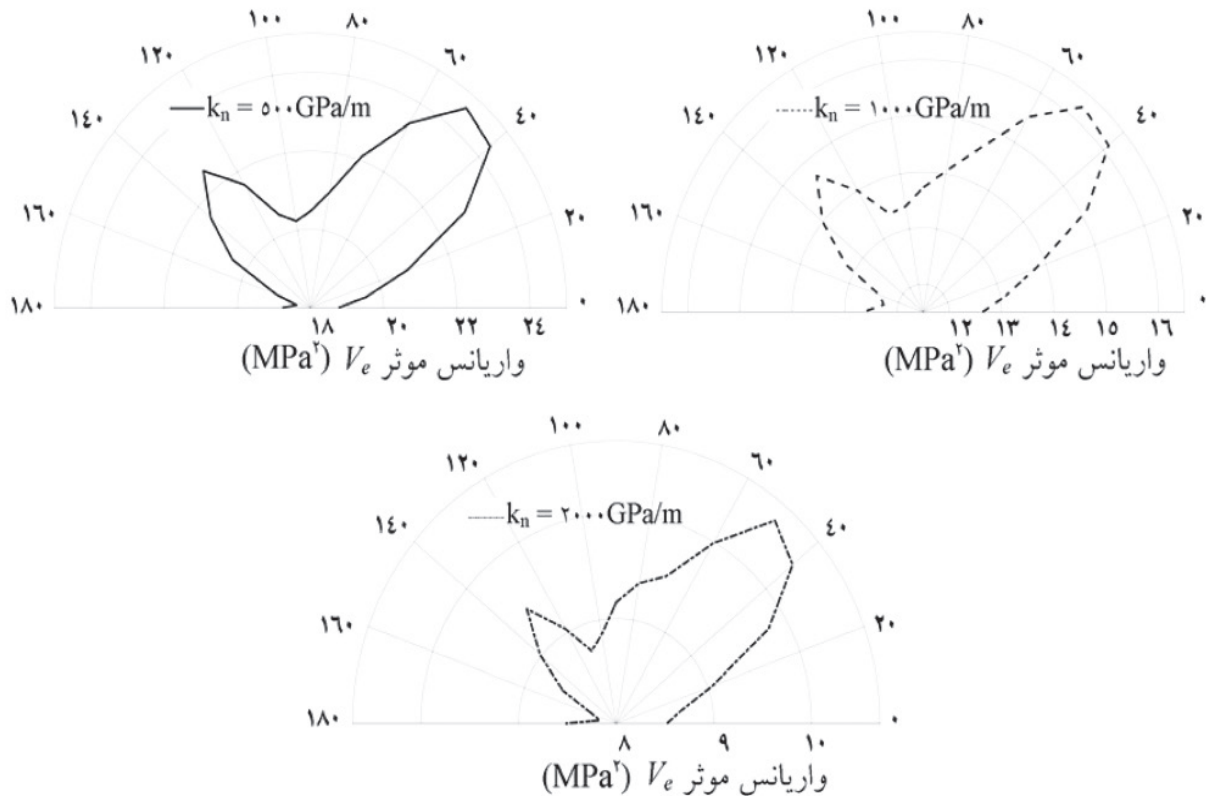
همچنین مشاهده می‌شود که جهت تنش تأثیر قابل توجهی بر توزیع تنش محلی و تغییرپذیری تنش در سنگ‌های شکافدار دارد، به‌طوری‌که واریانس مؤثر (V_e) زمانی که زاویه بارگذاری برابر 50° باشد دارای بیشترین مقدار و در زاویه 170° دارای کمترین مقدار است. شکل ۱۱ و ۱۲ توزیع کرنش برشی در سنگ شکافدار به‌ترتیب در تراکم شکستگی‌های مختلف تحت زاویه بارگذاری صفر، و در نمونه تراکم شکستگی 160 m^{-2} تحت زوایای مختلف تنش تکتونیکی، را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که کرنش برشی در امتداد شکستگی‌های بزرگتر (دارای طول بیشتر) قابل توجه است. همچنین با توجه به شرایط تنش تکتونیکی ناهمسانگرد (10° – 30°) که در این مقاله در نظر گرفته شده است، توزیع تنش و الگوی کرنش برشی غیر یکنواخت بوده و دارای نوسانات است. با توجه به اینکه بارگذاری تکتونیکی به‌صورت شرایط مرزی در نظر گرفته شده است، مطابق شکل ۱۲ با تغییر



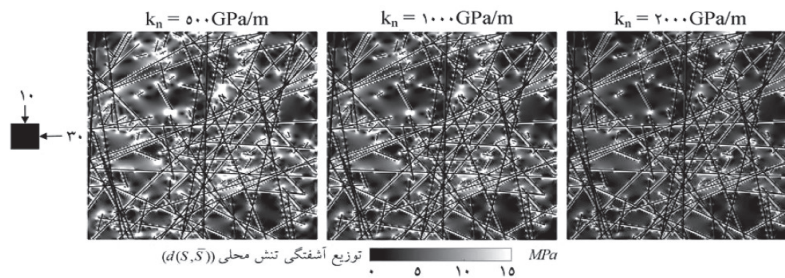
شکل ۱۱ توزیع کرنش برشی در سنگ شکافدار در تراکم شکستگی‌های مختلف تحت زاویه بارگذاری صفر



شکل ۱۲ توزیع کرنش برشی در سنگ شکافدار تحت بارگذاری تنش تکتونیکی در زوایای مختلف برای نمونه تراکم شکستگی 160 m^{-2}



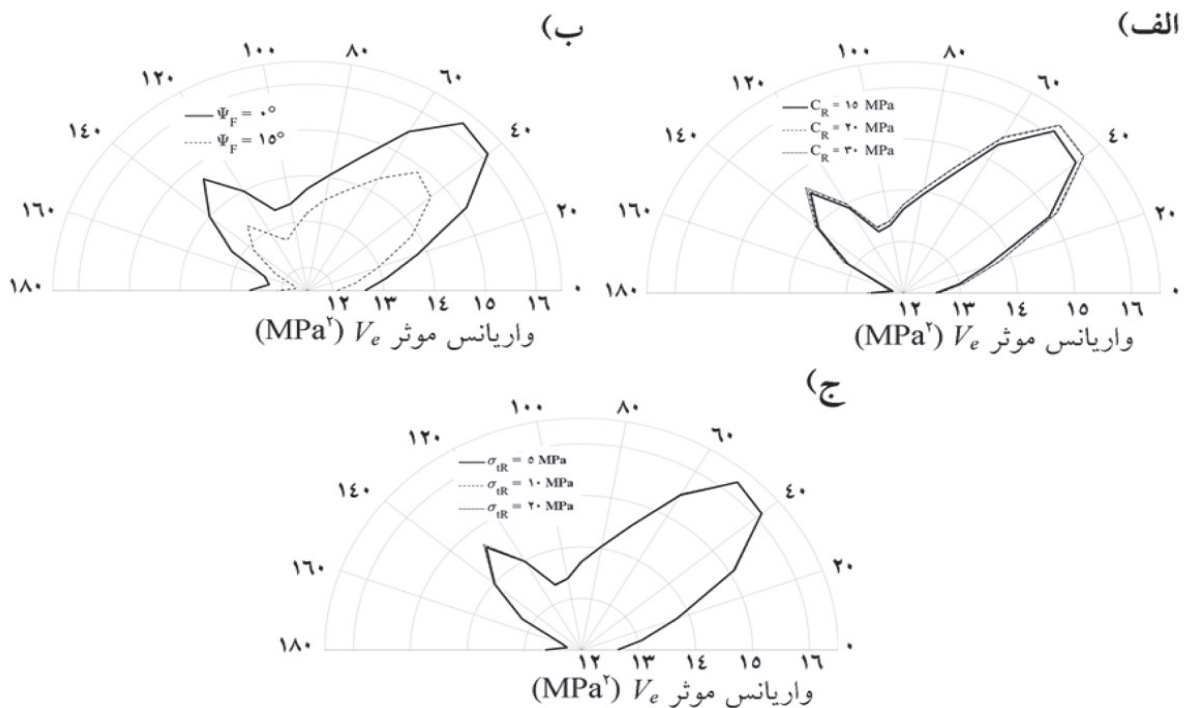
شکل ۱۳ مقادیر واریانس مؤثر در زوایای مختلف بارگذاری تنش در مقادیر مختلف سفتی نرمال در نمونه تراکم شکستگی ۱۶۰ m^{-2}



شکل ۱۴ توزیع آشفته‌گی تنش محلی در مقادیر مختلف سفتی نرمال در زاویه بارگذاری صفر در نمونه تراکم شکستگی ۱۶۰ m^{-2}

کرد. اما می‌توان گفتن با افزایش C_R ، مقادیر V_e به‌طور ناچیزی افزایش می‌یابد. همچنین به‌طور کلی می‌توان گفت که زاویه اتساع شکستگی با واریانس مؤثر رابطه عکس داشته و با افزایش ψ_F ، مقادیر V_e کاهش می‌یابد. در این مقاله همچنین با تغییر مقاومت کششی شکستگی σ_{IF} از صفر تا ۵ MPa (در نظر گرفتن مقادیر صفر، ۲ MPa و ۵ MPa) هیچ تغییری در مقادیر V_e در تمام زوایای بارگذاری تنش مشاهده نشد.

دامنه تغییرات واریانس مؤثر $(V_{e, \theta=0^\circ} - V_{e, \theta=170^\circ})$ برای سفتی نرمال ۵۰۰ GPa/m و ۲۰۰۰ GPa/m به‌ترتیب برابر $۶/۲۵$ و $۲/۳۵$ است که این مقادیر هرچه مقدار k_n افزایش می‌یابد، کمتر می‌شود. شکل ۱۵ واریانس مؤثر برای مقادیر مختلف C_R ، ψ_F و σ_{IR} در زوایای مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که دو پارامتر توده سنگ شامل C_R و σ_{IR} تأثیر بسیار ناچیزی در تغییرات V_e دارند، به‌طوری‌که می‌توان از تأثیر σ_{IR} چشم‌پوشی



شکل ۱۵ مقادیر واریانس مؤثر در زوایای مختلف بارگذاری تنش در در نمونه تراکم شکستگی 160 m^{-2} در مقادیر مختلف. (الف) چسبندگی سنگ، (ب) زاویه اتساع شکستگی و (ج) مقاومت کششی سنگ

نتیجه‌گیری

تراکم شکستگی، زاویه بارگذاری تنش‌های تکتونیک و پارامترهای مختلف سنگ و شکستگی تأثیر مهمی در رفتار مکانیکی و هیدرولوژیکی سنگ‌های شکاف‌دار دارد. در این پژوهش بیشتر به بررسی تأثیر آن‌ها بر توزیع تنش و کرنش برشی در مخازن شکاف‌دار پرداخته شد. براساس مطالعات انجام شده و با توجه به فرضیات مورد استفاده در این تحقیق از جمله توزیع تصادفی شکستگی‌ها و پارامترها و خصوصیات مکانیکی در نظر گرفته شده برای سنگ و شکستگی در مدل، مهم‌ترین نتایج حاصل به شرح ذیل است:

۱- کرنش برشی در امتداد شکستگی‌ها با طول زیاد و آشفته‌گی تنش در نوک و فصل مشترک شکستگی‌ها، بیشتر مشهود است.

۲- مشاهده شد که در نسبت تنش ۳، در یک شبکه شکستگی متراکم (320 m^{-2})، زاویه بارگذاری $\theta = 50^\circ$ و مقدار $k_n = 500 \text{ GPa/m}$ (به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر

تأثیرگذار بر توزیع تنش)، آشفته‌گی تنش محلی بیشتر است.

۳- توزیع آشفته‌گی تنش محلی $(d(S, \bar{S}))$ و واریانس مؤثر V_e (به‌عنوان دو پارامتر معرف تغییرپذیری و پراکندگی تنش کل در مدل) و کرنش برشی، با افزایش تراکم شکستگی (از 80 m^{-2} تا 320 m^{-2}) رابطه مستقیم داشته، به‌طوری‌که در نمونه زاویه بارگذاری صفر (با در نظر گرفتن پارامترهای اصلی)، مقادیر V_e برای تراکم شکستگی 80 m^{-2} ، 160 m^{-2} و 320 m^{-2} به ترتیب $7/42 \text{ MPa}^2$ ، $12/63 \text{ MPa}^2$ و $17/57 \text{ MPa}^2$ است.

۴- در بررسی تأثیر چهار پارامتر مختلف سنگ و شکستگی مشاهده شد که k_n تأثیر قابل توجهی بر توزیع تنش دارد. پارامترهای سنگ شامل C_R و σ_{IR} تأثیر ناچیزی در تغییرات V_e دارند. به‌طور کلی با افزایش k_n و ψ_F مقادیر V_e کاهش می‌یابد. در نمونه تراکم شکستگی 160 m^{-2} با جهت بارگذاری صفر، با چهار برابر شدن مقدار k_n ، مقدار V_e تقریباً به نصف

تغییرپذیری تنش در سنگ‌های شکافدار دارد، به‌طوری‌که روندهای مشاهده شده در تمامی حالت‌ها نشان می‌دهد که V_e در زاویه بارگذاری $\theta = 50^\circ$ مقدار بیشینه و در $\theta = 170^\circ$ دارای مقدار کمینه است.

می‌توان گفت اختلاف کاهش V_e از $k_n = 500 \text{ GPa/m}$ تا $k_n = 1000 \text{ GPa/m}$ بیشتر از $k_n = 1000 \text{ GPa/m}$ تا $k_n = 2000 \text{ GPa/m}$ است. ۵- درخصوص بارگذاری زاویه‌دار مشاهده شد که جهت تنش تأثیر قابل توجهی در توزیع و

مراجع

- [1]. Zoback MD (2010) Reservoir geomechanics, Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [2]. Farsimadan M, Dehghan AN, Khodaei M (2020) Determining the domain of in situ stress around Marun Oil Field's failed wells, SW Iran, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 1-10.
- [۳]. دهقان ع. ن و خدایی م.، (۱۳۹۶) مطالعه آزمایشگاهی تأثیر شکاف از پیش موجود بر گسترش شکافت هیدرولیکی تحت تنش‌های سه محوری واقعی، پژوهش نفت، ۲۷(۴-۹۶)، ۷۱-۸۰.
- [4]. Latham JP, Xiang J, Belayneh M, Nick HM, Tsang CF, Blunt M J (2013) Modelling stress-dependent permeability in fractured rock including effects of propagating and bending fractures, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 57: 100-112.
- [5]. Martin CD, Chandler NA (1993) Stress heterogeneity and geological structures, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 30, 7: 993-999.
- [6]. Mcnamara D D, Massiot C, Lewis B, & Wallis IC (2015) Heterogeneity of structure and stress in the Rotokawa Geothermal Field, New Zealand Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120: 1243-1262.
- [7]. Bruno MS, Winterstein DF (1994) Some influences of stratigraphy and structure on reservoir stress orientation. Geophysics, 59, 6: 954-962.
- [8]. Day-Lewis A, Zoback M, Hickman S (2010) Scale-invariant stress orientations and seismicity rates near the San Andreas Fault, Geophysical Research Letters, 37: L24304.
- [9]. Rajabi M, Tingay M, King R, Heidbach O (2017) Present-day stress orientation in the Clarence-Moreton Basin of New South Wales, Australia: A new high density dataset reveals local stress rotations, Basin Research, 29: 622-640.
- [10]. Balberg I, Binenbaum N (1983) Computer study of the percolation threshold in a two-dimensional anisotropic system of conducting sticks. Physical Review B, 28, 7: 3799.
- [11]. Robinson PC (1984) Numerical calculations of critical densities for lines and planes, Journal of Physics A: Mathematical and General, 17, 14: 2823.
- [12]. Long JC, Billaux DM (1987) From field data to fracture network modeling: an example incorporating spatial structure, Water Resources Research, 23, 7: 1201-1216.
- [13]. Andersson J, Dverstorp B (1987) Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures, Water Resources Research, 23, 10: 1876-1886.
- [14]. Min KB, Jing L, Stephansson O (2004) Determining the equivalent permeability tensor for fractured rock masses using a stochastic REV approach: method and application to the field data from Sellafield, UK. Hydrogeology Journal, 12, 5: 497-510.
- [15]. Baghbanan A, Jing L (2008) Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45, 8: 1320-1334.
- [16]. Oda M, Yamabe T, Ishizuka Y, Kumasaka H, Tada H, Kimura K (1993) Elastic stress and strain in jointed rock masses by means of crack tensor analysis, Rock Mechanics and Rock Engineering, 26, 2: 89-112.
- [17]. Rutqvist J, Leung C, Hoch A, Wang Y, Wang Z (2013) Linked multicontinuum and crack tensor approach for modeling of coupled geomechanics, fluid flow and transport in fractured rock, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 5, 1: 18-31.
- [18]. Figueiredo B, Tsang CF, Rutqvist J, Niemi AA (2015) Study of changes in deep fractured rock permeability due to coupled hydro-mechanical effects, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 79: 70-85.
- [19]. Einstein HH, Baecher GB (1983) Probabilistic and statistical methods in engineering geology. Rock Mechanics and Rock Engineering, 16, 1: 39-72.
- [20]. Bonnet E, Bour O, Odling NE, Davy P, Main I, Cowie P, Berkowitz B (2001) Scaling of fracture systems in geological media, Reviews of Geophysics, 39, 3: 347-383.
- [21]. Barton CA, Zoback MD (1992) Self-similar distribution and properties of macroscopic fractures at depth in crystalline rock in the Cajon Pass Scientific Drill Hole, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97, B4: 5181-5200.
- [22]. Zeeb C, Gomez-Rivas E, Bons PD, Blum P (2013) Evaluation of sampling methods for fracture network characterization

using outcrops. AAPG Bulletin, 97, 9, 1545-1566.

[23]. Alghalandis YF (2017) ADFNE: Open source software for discrete fracture network engineering, two and three dimensional applications, Computers & Geosciences, 102: 1-11.

[24]. Itasca Consulting Group Inc. FLAC (Version 7.0) manual. Minneapolis (USA); 2017.

[25]. Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D (Version 5.0) manual. Minneapolis (USA); 2012.

[26]. Gao K (2017) Contributions to tensor-based stress variability characterisation in rock mechanics (doctoral dissertation), PhD diss., University of Toronto (Canada).

[27]. Gao K, Harrison JP (2016) Mean and dispersion of stress tensors using Euclidean and Riemannian approaches. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 85: 165-173.

[28]. Gao K, Harrison JP (2018) Multivariate distribution model for stress variability characterisation, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 102: 144-154.



Stress Distribution in Fractured Reservoirs: Effects of Fracture Density, Oblique Loading and Parameters of Rock and Fracture

Meysam Khodaei, Ebrahim Biniiaz Delijani*, Mastaneh Hajipour and Kasra Karroubi

Department of Petroleum Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

biniiaz@srbiau.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2020.3979.2811

Received: November/14/2019

Accepted: July/23/2020

Introduction

The studies conducted in the past on rock mechanics and geomechanical areas of hydrocarbon reservoir engineering have shown that the determination of in-situ stresses and the factors that affect the stress perturbation highly influence these matters [1-2]. Moreover, the consideration of the stress state is vital to predict the mechanical behavior of the fractured rock masses accurately. Numerous researches have been conducted on the determination of in-situ stresses and the effect of fractured media on tectonic stress distribution and perturbation. As the role of stress is critical to understand the geomechanical behavior of reservoirs better, the most modelings of mechanical and hydraulic behavior are coupled with stress variations. One of the recent ways that have been utilized regarding this matter is by generating a discrete fracture network (DFN) using a stochastic approach. In past studies, the evaluation and study of stress perturbation are solely based on vector approaches that individually analyze the magnitude and direction of the principal stresses [3-4]. However, in nature, the stress is seen in the form of a tensor, both the magnitude and the orientation of stress must be considered simultaneously. In this study, after a discrete fracture network was generated stochastically, local stress variability and shear strain in fractured rocks were examined at three fracture densities under various conditions of oblique tectonic stress loading by the approaches, i.e. by combining numerical and

mathematical analyses and the tensorial mathematical equations with each other. Also, since limited research has been done on the effect of different parameters of rock and fracture on the stress field perturbation in previous studies, four different parameters of (1) rock tensile strength, (2) rock cohesion, (3) fracture normal stiffness, and (4) fracture dilation angle on stress dispersion in loading at different angles were evaluated.

Materials and Methods

The discrete fracture network was stochastically generated with the model size of $L = 1$ m. The fractures were distributed using the uniform distribution function, and the orientation of the fractures was determined using the Fisher distribution function in a completely random manner. The length of fractures was determined using the power-law model with the range of $l_{min} = 0.02$ m and $l_{max} = 50$ m. Considering the length exponent of the power-law, 1.5, and three fracture densities of 80 m⁻², 160 m⁻², and 320 m⁻², a discrete fracture network was generated. Using FLAC^{2D} software as a finite difference method, stress distribution in response to tectonic stress loading at different angles (0°, 10°, 20°, ... and 170°) in the stress ratio of 3 using 30 MPa and 10 MPa tectonic loading was determined. For the four parameters of rock and fracture, at least three different values were considered. For intact rock behavior and stress/strain shear fracture, the Mohr-Coulomb model was used,

which its mechanical properties are the profile of limestone rock.

Afterwards, the previously mentioned tensor-based mathematical equations were used to analyze the stress data. Also, the Euclidean distance was used to determine the distance/difference between the local stress tensor (S_i) and the mean stress tensor (\bar{S}). Based on the tensor-based equations, the higher the variance is, the more dispersed the stress field is.

Results and Discussion

Based on the analyzed data, the local stress perturbation distribution ($d(S, \bar{S})$) is directly related to the fracture density, and by increasing density, the stress perturbation distribution also increases, which it is seen in Figure 1.

According to the results, by increasing fracture density from 80 m^{-2} to 320 m^{-2} , the dispersion of stress distribution also increases in different angles, so that in similar angles, effective variance (V_e) for fracture density of 320 m^{-2} is the highest, and for 80 m^{-2} is

the minimum value (as seen in Figure 2). It is also observed that stress orientation has a significant effect on the local stress distribution and stress variability in fractured rocks.

Considering the anisotropic tectonic stress conditions (30 MPa - 10 MPa) considered in this paper, the stress distribution and shear strain pattern are non-uniform and fluctuate. It is observed that shear strain is considerable along the longer fractures (greater length). Moreover, it is observed that the two rock mass parameters including C_R and σ_{iR} have very small effects on the changes in V_e , in a way that the effect of σ_{iR} can be even neglected. Nevertheless, it can be said that by increasing C_R , V_e values increase by a slight margin. In general, the angle of fracture dilation is inversely related to the effective variance, and by increasing ψ_F , the values of V_e decrease. In this study, by changing the tensile strength of fracture (σ_{iF}) from zero to 5 MPa (taking into account the values of zero, 2 MPa , and 5 MPa), no change in each of V_e values was observed in all stress loading angles.

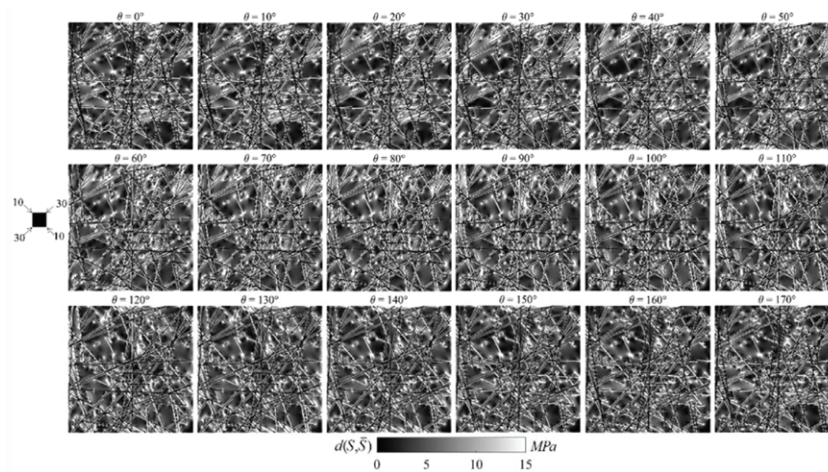


Fig. 1 Distribution of local stress perturbation in the fractured rock under tectonic stress loading at different angles for fracture density sample of $P_{20} = 160 \text{ m}^{-2}$.

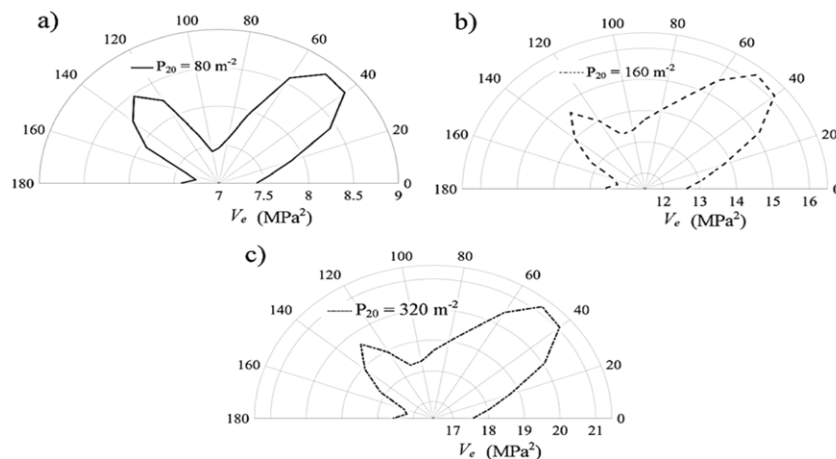


Fig. 2 Values of effective variance at different stress loading angles at a) fracture density of 80 m^{-2} , b) fracture density of 160 m^{-2} , and c) fracture density of 320 m^{-2} .

Conclusions

In this study, the effects of (1) fracture density, (2) loading angle of tectonic stresses, and (3) different rock and fracture parameters on the distribution of stress and shear strain in fractured reservoirs were investigated. Based on the studies which have been carried out and according to the hypotheses used in this research, it was evident that the distribution of local stress perturbation ($d(S, \bar{S})$) and effective variance (V_e) (as two parameters representing the variability and dispersion of total stress in the model) and shear strain are directly related to an increase in fracture density (from $P_{20} = 80 \text{ m}^{-2}$ to $P_{20} = 320 \text{ m}^{-2}$). In the study of the effect of four different parameters of rock and fracture, it was observed that kn has a significant effect on stress distribution. Moreover, rock parameters, including C_R and σ_{tR} have small effects on V_e changes. Finally, regarding oblique loading, it was observed that stress orientation has a significant effect on the distribution and variability of stress in fractured rocks.

Nomenclatures

DFN: Discrete fracture network

V_e : Effective variance

References

1. Dehghan AN, Khodaei M (2017) The experimental comparative study of the effect of pre-existing fracture on hydraulic fracture propagation under true tri-axial stresses, *Petroleum Research*, 27, 95: 71-80.
2. Latham JP, Xiang J, Belayneh M, Nick HM, Tsang CF, Blunt MJ (2013) Modelling stress-dependent permeability in fractured rock including effects of propagating and bending fractures, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 57: 100-112
3. Gao K, Harrison JP (2016) Mean and dispersion of stress tensors using Euclidean and Riemannian approaches, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 85: 165-173.
4. Gao K, Harrison JP (2018) Multivariate distribution model for stress variability characterization, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 102: 144-154.