



مقاله پژوهشی

بررسی عددی اثر نسبت ناهمسانگردی، زوایای لایه بندی و طول ترک بر ضریب شدت تنش در سنگ فیلیت

وحید عباسی^۱، مرتضی احمدی^{۱*}، احسان محترمی^۲

۱- گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- گروه ژئومکانیک، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

(دریافت: آبان ۱۴۰۱، پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۲)

چکیده

بررسی رفتار سنگ تحت تنش یکی از موارد مهم در طراحی سازه های سنگی است. ناهمسانگردی یکی از شاخصه های سنگ های رسوبی و دگرگونی است که در پایداری سازه های روباز و زیرزمینی تأثیرگذار است. سنگ های ناهمسانگرد خواص مکانیکی متفاوتی در جهت های مختلف دارند که در طراحی سازه های سنگی بایستی مدنظر قرار گیرد. به جهت اهمیت این موضوع، بررسی های گسترده ای برای شناسایی اثر ناهمسانگردی در رفتار مکانیکی سنگ شده است. روش های عددی که قادر به شبیه سازی فرایند ترک خوردگی در سنگ هستند، می توانند شکست، تمرکز و گسترش ریزترک ها را در اطراف فضای زیرزمینی پیش بینی کنند. بررسی تغییرات ضریب شدت تنش در سنگ های ناهمسانگرد و زوایای ترک با محور بارگذاری که در آن کشش و برش خالص و حالت ترکیبی رخ می دهد، سؤال اصلی این تحقیق است. در این تحقیق از روش المان محدود و نرم افزار آباکوس به دلیل توانایی آن در شبیه سازی سنگ ناهمسانگرد برای بررسی تغییرات ضریب شدت تنش استفاده شد، بدین منظور اثر نسبت ناهمسانگردی بر ضریب شدت تنش نمونه های ایزوتروپ عرضی در زوایای مختلف لایه بندی موردتحقیق قرار گرفت. با در دست داشتن مشخصات مدل های دیسکی CCNBD متعلق به سنگ فیلیت مطابق با استانداردهای ISRM نمونه هایی با نسبت ناهمسانگردی ($E/E' = 1.8$ و $E/E' = 4$) در زوایای مختلف لایه بندی ($0^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 75^\circ - 90^\circ$) و در زوایای مختلف ترک با امتداد بارگذاری (β) و در طول ترک های مختلف ($12 - 24 - 36$ میلی متر) با مدل سازی عددی موردبررسی قرار گرفت. در همه حالت های بررسی شده در طول ترک های مختلف و در نسبت ناهمسانگردی های مختلف برای یک زاویه لایه بندی یکسان ضریب شدت تنش مود کشش در مقدار $\beta = 0$ حداکثر بوده و در $\beta = 90^\circ$ حداقل است و ضریب شدت تنش مود برشی در $\beta = 0$ و $\beta = 90^\circ$ حداقل و بین 30 تا 40 درجه حداکثر است. تغییر زاویه ترک نسبت به محور بارگذاری (β) در همه حالت های طول ترک و نسبت ناهمسانگردی تأثیر محسوسی در ضریب شدت تنش مود کشش و برش دارد. درواقع حالت کشش خالص در زوایای مختلف لایه بندی لزوماً در زاویه صفر درجه با محور بارگذاری ($\beta = 0$) رخ نمی دهد و این زاویه کاملاً متأثر از زوایای لایه بندی (Ψ) شیبستویته است.

کلمات کلیدی

ضریب شدت تنش، ناهمسانگردی، ایزوتروپ عرضی، چقرمگی شکست و تحلیل عددی

*عهده دار مکاتبات: moahmadi@modares.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2023.19114.1575

۲- نسبت ناهمسانگردی

۱- مقدمه

اگرچه برای تعیین نسبت ناهمسانگردی سنگ‌ها اغلب از مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده می‌شود، اما برای این منظور می‌توان از مقادیر تنش‌های اصلی، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون مقاومت کششی و یا کرنش در لحظه‌ی شکست نیز استفاده کرد. مطالعات انجام‌شده توسط محققین مختلف نشان می‌دهد که صرف‌نظر از نوع ناهمسانگردی (ذاتی یا القایی)، مقاومت فشارشی شکست در زوایای صفر یا ۹۰ درجه حداکثر و در حدود ۳۰ درجه حداقل است، سنگ‌های دارای صفحه ضعف مقاومت‌های فشارشی متفاوتی را در زوایای مختلف از خود نشان می‌دهند. هرچند مقادیر مقاومت فشارشی در سنگ‌های ناهمسانگرد مختلف، متفاوت است ولی نسبت مقاومت‌های حداکثر به حداقل در محدوده‌ی معینی تغییر می‌کند. رامامورتی در سال ۱۹۹۳ نسبت ناهمسانگردی را به‌صورت زیر تعریف کرد [۹].

$$R_t = \frac{\sigma_{c \max}}{\sigma_{c \min}} \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق R_t نسبت ناهمسانگردی، $\sigma_{c \max}$ حداکثر مقاومت فشارشی تک‌محوری سنگ، $\sigma_{c \min}$ حداقل مقاومت فشارشی تک‌محوری سنگ در مقادیر مختلف زاویه ناپیوستگی است.

آنچه بیان شد نسبت ناهمسانگردی سنگ‌ها بر اساس مقاومت فشارشی بود درحالی‌که ناهمسانگردی سنگ‌ها در حالت کشش بیشتر مشهود است. به‌عبارت‌دیگر همان‌طور که توسط هوک بیان شده است. ساده‌ترین آزمایش برای تعیین نسبت ناهمسانگردی از نسبت مقاومت کششی نمونه سنگ در حالت عمود و موازی با لایه‌بندی تعیین می‌شود.

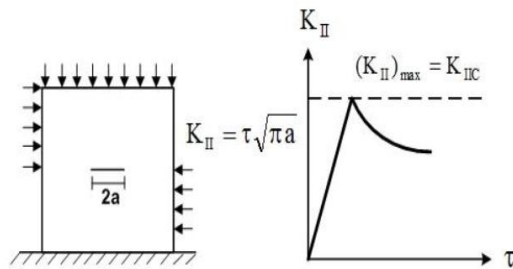
$$R_t = \frac{\sigma_{t \max}}{\sigma_{t \min}} \quad (2)$$

$\sigma_{t \max}$ مقاومت کششی نمونه در حالت تنش عمود بر شیش‌توزیته و $\sigma_{t \min}$ مقاومت کششی نمونه در حالت تنش موازی با شیش‌توزیته و R_t نسبت ناهمسانگردی است. نسبت ناهمسانگردی به‌دست‌آمده از مقاومت کششی عموماً بیشتر از حالت فشارشی است [۱۰].

تسیدزی در سال ۱۹۹۰ با ارائه اندیس بار نقطه‌ای استاندارد آزمون برزلی جدول ۱ را برای طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس نسبت ناهمسانگردی به‌صورت زیر ارائه کرد [۱۱].

بررسی رفتار سنگ تحت تنش یکی از موارد مهم در طراحی سازه‌های سنگی است. دانستن خصوصیات مکانیکی محیط سنگی در طراحی بسیار مهم است. خصوصیات مکانیکی نظیر مقاومت سنگ بکر، مقاومت برشی سطح ناپیوستگی، مدول تغییر شکل‌پذیری باید به‌دقت ارزیابی شود. یکی از عواملی که باید در این بررسی موردتوجه قرار گیرد، ناهمسانگردی در سنگ‌ها است که بررسی توأمان رفتار مقاومتی و مکانیزم شکست در این گونه از سنگ‌ها را می‌طلبد [۱]. یک سنگ وقتی ناهمسانگرد نامیده می‌شود که مقدار یک خاصیت یا یک پارامتر آن در دو جهت مختلف متفاوت باشد. به‌عبارت‌دیگر سنگ ناهمسانگرد سنگی است که خواص آن به جهت مطالعه یا اندازه‌گیری بستگی دارد. در غیر این صورت سنگ همسانگرد خوانده می‌شود [۲]. بررسی اثر ناهمسانگردی در پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر همسانگرد توسط افراد مختلف به‌صورت آزمایشگاهی و عددی انجام شده است [۳، ۴]. چقرمگی به میزان توانایی ماده جهت تحمل بارهای وارده در حضور یک ترک اطلاق می‌شود. برای موادی که رفتار ارتجاعی خطی دارند، این خاصیت معمولاً برحسب کمیتی به نام مقدار بحرانی ضریب تمرکز تنش بیان می‌شود که در یک درجه حرارت معین تابعی از ضخامت قطعه ترک‌دار است [۵]. چقرمگی شکست به‌عنوان یک ویژگی ذاتی ماده، نقش اصلی و بحرانی را در آنالیز شکست مواد ایفا می‌کند و از نقطه‌نظر شکست، مبنای ارزیابی مقاومت مواد را فراهم می‌کند. این پارامتر با علامت K نشان داده می‌شود [۵]. یکی از عوامل تأثیرگذار بر نرخ فرسایش تیغه حفاری دستگاه حفاری تونل و میزان انرژی لازم جهت ایجاد ترک مقدار ضریب شدت تنش سنگ است [۶]. فرآیند شکست عمدتاً توسط تعداد درزه‌ها و زاویه درزه اداره می‌شود. ضریب شدت تنش مقاومت فشاری و استحکام کششی نمونه‌ها به الگوی شکست و مکانیسم شکست ناپیوستگی‌ها مرتبط است. استحکام نمونه‌ها با افزایش تعداد درزه‌ها و زاویه درزه و تخلخل کاهش می‌یابد [۷، ۸]. در این تحقیق بررسی تغییرات ضریب شدت تنش در سنگ‌های ناهمسانگرد (زاویه شیش‌توزیته) با تغییر زاویه ترک با محور بارگذاری که در آن کشش و برش خالص و حالت ترکیبی رخ می‌دهد، سؤال اصلی است.

اگر ترک در یک جسم در حالت مود برشی خالص قرار بگیرد (شکل ۲)، ضریب تمرکز تنش از رابطه $K_{II} = \tau\sqrt{\pi a}$ قابل محاسبه است. با افزایش تنش برشی اعمالی بر جسم، ضریب تمرکز تنش برشی نیز افزایش می‌یابد. حداکثر ضریب تمرکز تنش برشی که منجر به رشد ترک می‌شود، جز خواص مواد بوده و ضریب تمرکز تنش بحرانی یا چقرمگی شکست مود برشی نامیده می‌شود [۵].



شکل ۲: مود برش خالص [۵].

۴- روش‌های عددی

با توجه به وجود نمونه‌های مختلف جهت تعیین ضریب شدت تنش و به دلیل پیچیدگی و دشواری ارائه‌ی یک حل تحلیلی مناسب برای تعیین ضریب شدت تنش نمونه‌هایی با شکل‌های پیچیده، مدل‌سازی عددی یکی از روش‌هایی است که اخیراً جهت تعیین ضریب شدت تنش سن‌ها ارائه شده است. اغلب روش‌های عددی مورد استفاده در مکانیک پیوسته بر این اصل استوار هستند که با استخراج معادلات و روابط حاکم بر رفتار اجزای کوچک یک مسئله می‌توان رفتار کلی آن را برآورد کرد. در این روش‌ها با تقسیم پیکره به تعداد زیادی از اجزای کوچک و سپس ارتباط دادن و جمع کردن اثر این بخش‌های کوچک، امکان برآورد مقادیری همانند تنش و تغییر شکل با دقت مناسب بر روی دامنه‌ی مورد نظر وجود دارد. با افزایش تعداد این اجزای کوچک دقت محاسبات نیز افزایش می‌یابد. از مهم‌ترین ویژگی‌های محیط‌های سنگی وجود صفحات ناپیوستگی (درز و ترک) و لایه‌بندی (شیستوزیته) که منجر به تشکیل یک محیط ناپیوسته، ناهمسانگرد و ناهمگن می‌شود. بر اساس فرضیات مختلفی که درباره مواد دربرگیرنده وجود دارد، روش‌های عددی مختلفی برای محیط‌های پیوسته و ناپیوسته توسعه پیدا کرده است [۱۲]. حل مسائل عملی مهندسی با درجه مناسبی از دقت، بدون استفاده از روش‌های عددی و تنها استفاده از روش‌های تحلیلی تقریباً غیرممکن است. اغلب روش‌های عددی

$$I_{s50} = \frac{I_{s50\perp}}{I_{s50\parallel}} \quad (3)$$

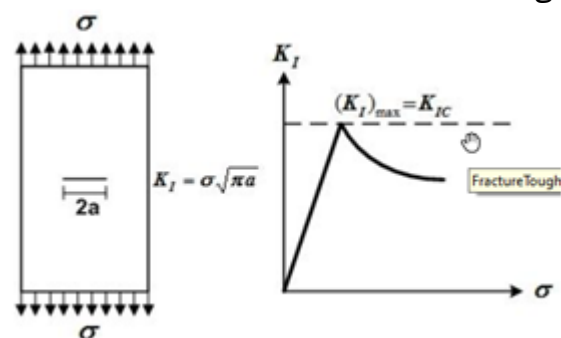
$I_{s50\perp}$ اندیس بار نقطه‌ای در جهت عمود بر لایه‌بندی و $I_{s50\parallel}$ اندیس با نقطه‌ای در جهت موازی لایه‌بندی است.

جدول ۱: طبقه‌بندی سنگ ناهمسانگرد بر اساس اندیس بار نقطه‌ای I_{s50} [۱۱]

طبیعت سنگ	نسبت ناهمسانگردی براساس اندیس با نقطه‌ای I_{s50}	رده (طبقه)
تورق بسیار کم یا بدون تورق	کمتر از ۱/۱	همسانگرد
تورق کم	۱/۱-۵/۱	ناهمسانگردی پایین
تورق متوسط	۲/۵-۱/۵	ناهمسانگردی متوسط
تورق زیاد	۳/۵-۲/۵	ناهمسانگردی بالا
تورق خیلی زیاد	بالا تر از ۳/۵	ناهمسانگردی بسیار بالا

۳- ضریب تمرکز تنش

مطابق شکل ۱ برای یک صفحه به ضخامت واحد با یک ترک مرکزی به طول $2a$ که تحت بار کششی یکنواخت قرار گرفته است، مقدار ضریب تمرکز تنش از رابطه $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ قابل محاسبه است. با افزایش تنش اعمالی، مقدار ضریب تمرکز تنش نیز افزایش می‌یابد. ولی از آنجایی که سنگ دارای تحمل محدودی است و پس از تحمل مقداری تنش، تسلیم می‌شود. منطقی است که حدی برای ضریب تمرکز تنش موجود داشته باشد که بتوان آن را از مشخصات ماده دانست. در حالت مود کششی مقدار حداکثر ضریب تمرکز تنش را چقرمگی شکست مود I نامیده و با نماد K_{IC} نشان می‌دهند [۵].

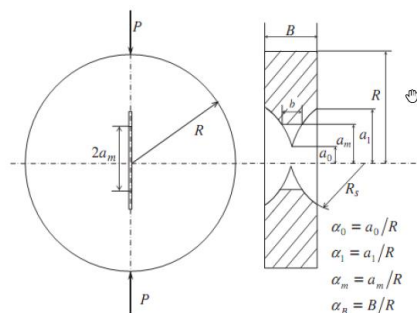


شکل ۱: مود کشش خالص [۳].

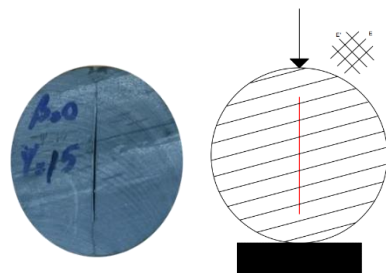
گسترده از یک تحلیل خطی نسبتاً ساده تا تحلیل‌های غیرخطی بسیار پیچیده را حل کند [۱۶].

۵-۲- هندسه، شرایط مرزی و مدل‌سازی

به‌منظور مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها، تمام مدل‌ها به‌صورت دوبعدی ساخته شده و شرایط تنش صفحه‌ای برای مسئله در نظر گرفته شده است. به‌منظور مدل‌سازی نمونه‌های دیسکی با ترک مرکزی در زوایای مختلف نسبت به محور بارگذاری، تحت بارگذاری فشارشی تک‌محوری قرار داده شد. قطر نمونه‌ها ۵۴ میلی‌متر مطابق با شرایط ISRM آزمون‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. نمونه سنگ مدل‌سازی شده سنگ ناهمسانگرد فیلیت متعلق به تکیه‌گاه سد آزاد کردستان است و خواص مکانیکی نمونه برداشت‌شده از عبادت (۱۳۹۳) است [۱۷]. جدول ۲ نشان‌دهنده خواص مکانیکی سنگ فیلیت مدل‌سازی شده است. شکل ۳ نشان‌دهنده هندسه و مشخصات نمونه مدل‌سازی شده مطابق استاندارد بین‌المللی مکانیک سنگ و در شکل ۴ نمونه سنگ فیلیت ارائه شده است.



شکل ۳: هندسه و مشخصات نمونه CCNBD.



شکل ۴: نمونه واقعی سنگ فیلیت (سمت چپ) و مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار آباکوس (سمت راست).

جدول ۲: خواص مکانیکی سنگ ناهمسانگرد فیلیت [۱۷]

$E_1(\text{GPa})$	$E_2(\text{GPa})$	ν_{12}	ν_{23}	$E_{12}(\text{GPa})$
۴,۱۶	۶,۸۸	۰,۲۵	۰,۲	۱,۶۶

مورد استفاده در مکانیک پیوسته بر این اصل استوار هستند که با استخراج معادلات و روابط حاکم بر رفتار اجزای کوچک یک مسئله می‌توان رفتار کلی آن را برآورد کرد [۱۳]. دسته‌بندی کلی روش‌های عددی به روش‌های پیوسته شامل روش تفاضل محدود (FDM)، روش المان محدود (FEM)، روش المان محدود توسعه‌یافته (XFEM) و روش المان مرزی (BEM)، روش‌های گسسته شامل روش المان مجزا (DEM) و روش شبکه شکستگی‌های مجزا، روش‌های ترکیبی شامل ترکیب FEM/DEM یا BEM/DEM و یا FEM/BEM است [۱۴].

۴-۱- روش المان محدود FEM

اصطلاح FEM نخستین بار برای مسائل تنش صفحه‌ای توسط کلاف ۱۹۶۰ ارائه شد. این روش به‌سرعت در بسیاری از زمینه‌های علمی و مهندسی اتخاذ و ترویج داده شد. همان‌گونه که در کتاب زنگویچ و بته مورد اشاره قرار گرفته است، درواقع در این روش با استفاده از معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسئله، روابط جبری محلی که معرف رفتار المان‌ها است نوشته می‌شود. از تجميع معادلات محلی که بر اساس روابط بین المان‌ها و گره‌های مجاور است، معادلات جبری کلی سیستم نوشته می‌شود و با اعمال شرایط مرزی در مدل و حل معادلات جبری پارامترهای مجهول به دست می‌آیند. یکی از مزایای FEM در مواجهه با تحلیل مواد غیر همگن و غیرخطی است. نرم‌افزارهای ABAQUS، PLAXIS، ANSYS از شناخته‌شده‌ترین نرم‌افزارهای این روش می‌باشند [۱۰].

۵- مدل‌سازی عددی نمونه ناهمسانگرد فیلیت

۵-۱- نرم‌افزار آباکوس

نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق جهت بررسی تغییرات ضرایب شدت تنش سنگ‌های ناهمسانگرد، نرم‌افزار المان محدود آباکوس است [۱۵]. آباکوس مجموعه‌ای از برنامه‌های شبیه‌سازی قدرتمند مهندسی است که بر پایه روش اجزای محدود بنا نهاده شده و می‌تواند مسائلی با طیف گسترده از یک تحلیل خطی نسبتاً ساده تا تحلیل‌های غیرخطی بسیار پیچیده را حل کند. آباکوس مجموعه‌ای از برنامه‌های شبیه‌سازی قدرتمند مهندسی است که بر پایه روش اجزای محدود بنا نهاده شده و می‌تواند مسائلی با طیف

جدول ۳ نشان‌دهنده مؤلفه‌های ماتریس سختی مدل ساخته‌شده است که با استفاده از خواص مکانیکی نمونه سنگ فیلیت (جدول ۲) و روابط ارائه‌شده، محاسبه شده‌اند.

جدول ۳: مؤلفه‌های ماتریس سختی سنگ فیلیت

γ (kg/m ³)	D1111	D1122	D2222	D1212
۱,۳۱۷	۵,۲۶۴	۲,۶۲۴	۸,۴۷۱	۱,۶۶۴
D1133	D2233	D3333	D1313	D2323
۲,۲۳۹	۲,۵۳۲	۸,۰۳۲	۴,۰۸۰	۴,۱۲۸

۶- بررسی تأثیر زاویه (Ψ) و زاویه (β)

در مدل‌سازی انجام‌شده ابتدا به بررسی تغییرات صورت گرفته در مقدار ضریب شدت تنش در موده‌های کشش و برش و ترکیبی پرداخته شده است. درواقع با تغییر دادن زاویه لایه‌بندی (Ψ) و زوایای ترک با محور بارگذاری (β) تغییرات ضریب شدت تنش در هر یک از حالت‌ها محاسبه و مقایسه گردید.

همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده زوایای β متناسب با موده‌های کششی و برشی، در زوایای مختلف لایه‌بندی به دست آمد که در ادامه، نمودارها و جداول نشان‌دهنده نتیجه به دست آمده می‌باشد.

به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل عددی، نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی توسط عبادت (۱۳۹۶) با خروجی مدل‌های عددی مقایسه شد [۱۷]. مقایسه ضرایب شدت تنش در حالت کشش خالص و برش خالص در شکل ۵ و ۶ ارائه شده است.

اختلاف مقادیر حاصله از آزمایشگاه و روش عددی کمتر از ۵ درصد است و این مقدار نشان‌دهنده صحت مدل‌سازی انجام شده است.

نمودار شکل ۷ نشان‌دهنده تغییرات ضریب شدت تنش کششی نمونه در زوایای مختلف لایه‌بندی (Ψ) است و منحنی‌های شکل متعلق به زوایای مختلف ترک با محور بارگذاری (β) می‌باشند. شکل ۸ نشان‌دهنده تغییرات ضریب شدت تنش برشی در زوایای مختلف لایه‌بندی و زوایای مختلف ترک با محور بارگذاری (β) می‌باشند.

پس از تشکیل یک قطعه دیسکی شکل دوبعدی تغییر شکل‌پذیر به قطر ۵۴ میلی‌متر در بخش part نرم‌افزار، مشخصات مکانیکی نمونه به مدل اختصاص داده می‌شود که در این نمونه ایزوتروپ عرضی در نظر گرفته شد و با یکسان فرض کردن بعد دوم و سوم (دوبعدی) نمونه درواقع تبدیل به ایزوتروپ عرضی خواهد شد. ماتریس سختی مواد ایزوتروپ عرضی و مؤلفه‌های ماتریس سختی سنگ ناهمسانگرد در ادامه اشاره شده است.

مؤلفه‌های ماتریس سختی زیر بر اساس معرفی مدول الاستیسیته و ضریب پواسون و مدول برشی محاسبه خواهند شد [۱۸].

در مدل‌سازی صورت گرفته نمونه به‌صورت ایزوتروپ عرضی (دارای سه صفحه تقارن که خواص در دو امتداد آن برابر است) در نظر گرفته شد و هندسه نمونه مطابق با شرایط استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای نمونه CCNBD انتخاب شده است [۱۸]. در ادامه ماتریس سختی مواد ناهمسانگرد و مؤلفه‌های آن اشاره شده است.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix}$$

$$D_{1111} = E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})\gamma$$

$$D_{2222} = E_2(1 - \nu_{13}\nu_{31})\gamma$$

$$D_{3333} = E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21})\gamma$$

$$D_{1122} = E_1(\nu_{21} - \nu_{31}\nu_{23})\gamma$$

$$D_{1133} = E_1(\nu_{31} - \nu_{21}\nu_{32})\gamma$$

$$D_{2233} = E_2(\nu_{32} - \nu_{12}\nu_{13})\gamma$$

$$D_{1212} = G_{12}$$

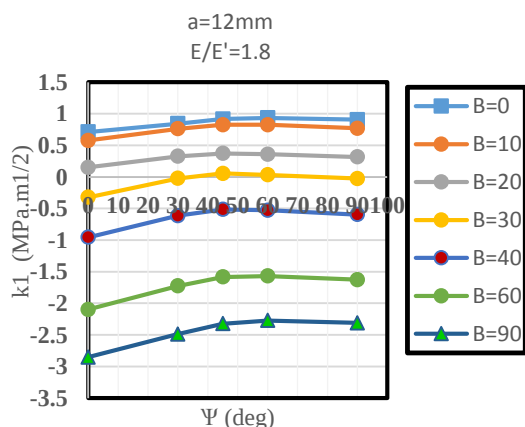
$$D_{1313} = G_{13}$$

$$D_{2323} = G_{23}$$

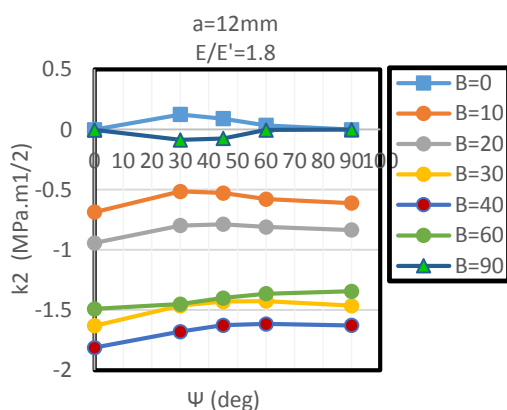
$$\gamma = \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}$$

۷- بررسی تاثیر نسبت ناهمسانگردی

مطابق جدول ۱، نسبت ناهمسانگردی ۱٫۸ در دسته ناهمسانگردی متوسط و نسبت ناهمسانگردی ۴ در دسته ناهمسانگردی بسیار بالا قرار دارد. با ثابت نگاه داشتن طول ترک (۱۲ میلی‌متر)، با افزایش نسبت ناهمسانگردی از $E/E'=1.8$ به $E/E'=4$ تأثیر این پارامتر در ضریب شدت تنش در حالت‌های مختلف بررسی و مقایسه شد. شکل ۷ و ۹ مربوط به مود کشش و شکل ۸ و ۱۰ مربوط به مود برش است.



شکل ۹: ضریب شدت تنش مود کشش برای $E/E'=1.8$ و طول ترک ۱۲ میلی‌متر.

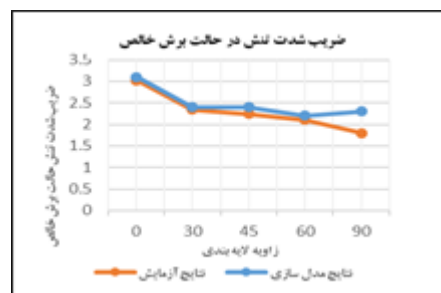


شکل ۱۰: ضریب شدت تنش مود برش برای $E/E'=1.8$ و طول ترک ۱۲ میلی‌متر.

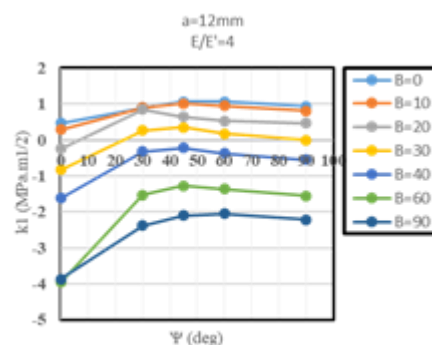
با توجه به نمودارها شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ زاویه لای بندی (Ψ) و زاویه ترک با محور بارگذاری β و تغییر نسبت ناهمسانگردی تأثیر محسوسی در مقدار ضریب شدت تنش مود I و مود II دارند. به عنوان مثال در حالت زاویه ترک با



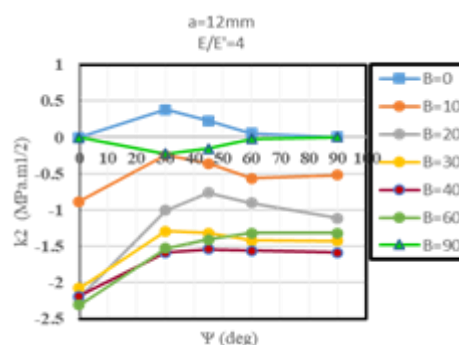
شکل ۵: نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی ضریب شدت تنش مود کشش خالص برای $E/E'=1.8$ و طول ترک ۲۴ میلی‌متر.



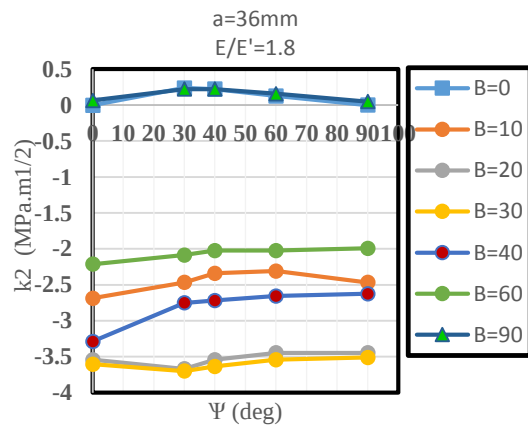
شکل ۶: نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی ضریب شدت تنش مود برش برای $E/E'=1.8$ و طول ترک ۲۴ میلی‌متر.



شکل ۷: ضریب شدت تنش مود کشش برای $E/E'=4$ و طول ترک ۱۲ میلی‌متر.



شکل ۸: ضریب شدت تنش مود برش برای $E/E'=4$ و طول ترک ۱۲ میلی‌متر.



شکل ۱۲: ضریب شدت تنش مود برش برای $E/E'=1.8$ و طول ترک ۳۶ میلی‌متر.

۹- بررسی تغییر زاویه ترک با محور بارگذاری متناسب با حالت‌های کشش خالص و برش خالص و حالت ترکیبی

جدول ۴، ۵ و ۶ نشان‌دهنده تغییرات مقادیر زاویه ترک با محور بارگذاری در حالت‌های کشش خالص و برش خالص و ترکیبی به ترتیب است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در زوایای مختلف لایه‌بندی و در نسبت‌های مختلف ناهمسانگردی، می‌توان نتیجه گرفت زاویه ترک با محور بارگذاری (β) متناسب با حالت کشش خالص و برش خالص در زوایای مختلف لایه‌بندی متفاوت است. درواقع حالت کشش خالص در زوایای مختلف لایه‌بندی لزوماً در زاویه صفر درجه با محور بارگذاری ($\beta=0^\circ$) اتفاق نمی‌افتد و این زاویه کاملاً متأثر از زوایای لایه‌بندی (Ψ) است و همچنین برای حالت کشش خالص نیز مطابق نتایج از مقادیر β متأثر از زاویه لایه‌بندی و نسبت ناهمسانگردی و طول ترک است. در حالت کشش خالص شدت تنش مود II مقدار صفر است و در حالت برش خالص ضریب شدت تنش مود I مقدار صفر است و در حالت ترکیبی مقادیر ضرایب شدت تنش مود I و مود II برابر می‌باشند.

یعنی هنگام مدل‌سازی در زوایای مختلف لایه‌بندی وقتی ضریب شدت تنش مود ۲ صفر می‌شود درواقع حالت کشش خالص رخ داده است و وقتی ضریب شدت تنش مود ۱ صفر می‌شود یعنی حالت برش خالص رخ داده و وقتی این دو ضریب مود ۱ و ۲ باهم برابر می‌شوند، یعنی حالت ترکیبی رخ داده است.

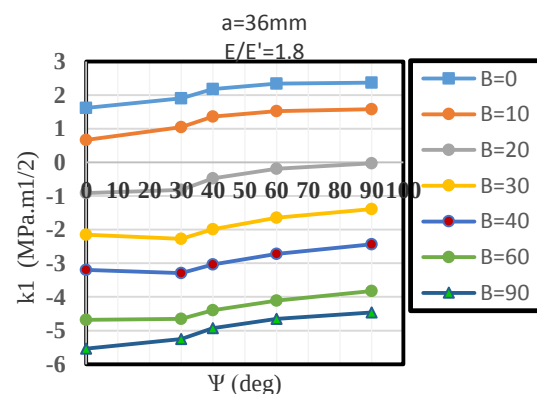
محور بارگذاری صفر ($\beta=0$) و در زاویه لایه‌بندی صفر ($\Psi=0$)، مقدار ضریب شدت تنش $5 \text{ MPa.m}^{1/2}$ است.

درحالی‌که در زاویه لایه‌بندی 45° درجه ($\Psi=45^\circ$) این مقدار نزدیک به $1 \text{ MPa.m}^{1/2}$ است. با توجه به نمودارهای شکل ۷ و شکل ۹ در حالت $\beta=0$ تغییرات ضریب شدت تنش کشش محسوس نیست. درحالی‌که برای مقادیر بزرگ‌تر از 20° تغییرات مقادیر ضریب شدت تنش کششی محسوس می‌باشند. با توجه به نمودارهای شکل ۸ و ۱۰ مقادیر ضرایب تنش برش در حالت‌های مختلف لایه‌بندی و زاویه ترک با محور بارگذاری، تأثیر نسبت ناهمسانگردی مشخص می‌باشند و تأثیر نسبت ناهمسانگردی بر ضرایب شدت تنش مود برشی بیشتر از مود کشش می‌باشند.

۸- بررسی تأثیر طول ترک

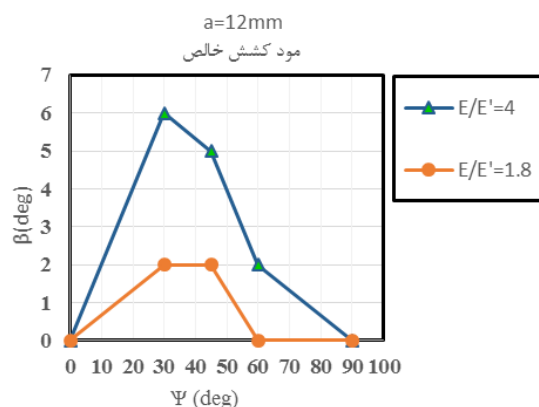
سه طول ترک a ۱۲ و ۲۴ و ۳۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد و اثر این پارامتر موردبررسی قرار گرفت. شکل‌های ۷ و ۹ و شکل ۱۲ نشان‌دهنده تغییرات ضریب شدت تنش در ترک با طول ۱۲ میلی‌متر برای مود کشش و شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰ نشان‌دهنده تغییرات ضریب شدت تنش در ترک با طول ۱۲ میلی‌متر برای مود برش است.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان‌دهنده تغییرات ضریب شدت تنش در طول ترک برابر با ۳۶ میلی‌متر برای مود کشش و مود برش است تأثیر طول ترک در زوایای مختلف لایه‌بندی متفاوت است. با مقایسه نمودارهای ذکرشده می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش طول ترک ضریب شدت تنش کششی و برشی نیز افزایش پیدا می‌یابد.

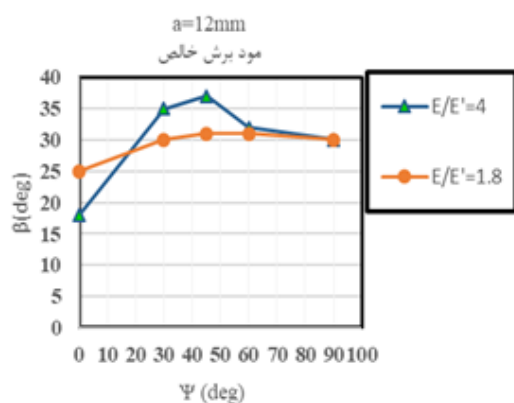


شکل ۱۱: ضریب شدت تنش مود کشش برای $E/E'=1.8$ و طول ترک ۳۶ میلی‌متر.

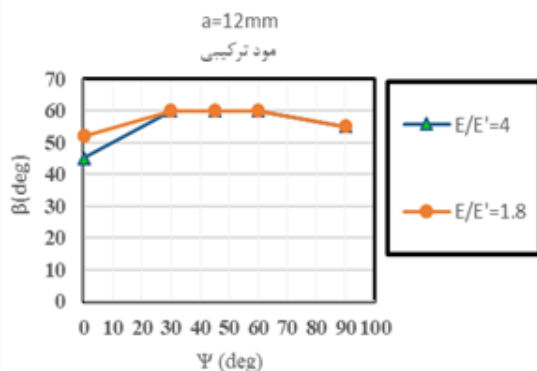
لایه‌بندی ۳۰ درجه در حالت $\beta = 2^\circ$ رخ می‌دهد و در نسبت ناهمسانگردی ۴ در $\beta = 6^\circ$ حالت کشش خالص رخ می‌دهد. شکل ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ نشان‌دهنده تأثیر طول ترک بر زاویه β در حالت‌های کشش خالص و برش خالص و حالت ترکیبی در نسبت ناهمسانگردی ۱٫۸ به ترتیب است.



شکل ۱۳: تأثیر نسبت ناهمسانگردی بر زاویه ترک با محور بارگذاری در حالت کشش خالص در طول ترک ۱۲ میلی‌متر.



شکل ۱۴: تأثیر نسبت ناهمسانگردی بر زاویه ترک با محور بارگذاری در حالت برش خالص در طول ترک ۱۲ میلی‌متر.



شکل ۱۵: تأثیر نسبت ناهمسانگردی بر زاویه ترک با محور بارگذاری در حالت ترکیبی در طول ترک ۱۲ میلی‌متر.

جدول ۴: تغییرات زاویه ترک با محور بارگذاری (β) در حالت کشش خالص

درجه	تغییرات زاویه ترک با محور بارگذاری (β) در حالت کشش خالص				
	a=12mm		E/E'=1.8		
	E/E'=1.8	E/E'=1.8	a=12 mm	a=24 mm	a=36 mm
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳۰	۲	۶	۲	۲	۰
۴۵	۲	۵	۲	۱	۰
۶۰	۰	۲	۰	۰٫۵	۰
۹۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۵: تغییرات زاویه ترک با محور بارگذاری (β) در حالت برش خالص

درجه	تغییرات زاویه ترک با محور بارگذاری (β) در حالت برش خالص				
	a=12mm		E/E'=1.8		
	E/E'=1.8	E/E'=1.8	a=12 mm	a=24 mm	a=36 mm
۰	۲۵	۱۸	۲۵	۲۰	۱۲
۳۰	۳۰	۳۵	۳۰	۲۲	۱۵
۴۵	۳۱	۳۷	۳۱	۲۶	۱۸
۶۰	۳۱	۳۲	۳۱	۲۷	۲۰
۹۰	۳۰	۳۰	۳۰	۲۶	۲۰

جدول ۶: تغییرات زاویه ترک با محور بارگذاری (β) در حالت ترکیبی

درجه	تغییرات زاویه ترک با محور بارگذاری (β) در حالت ترکیبی				
	a=12mm		E/E'=1.8		
	E/E'=1.8	E/E'=1.8	a=12 mm	a=24 mm	a=36 mm
۰	۵۲	۴۵	۵۲	۵۰	۴۰
۳۰	۶۰	۶۰	۶۰	۵۰	۴۰
۴۵	۶۰	۶۰	۶۰	۵۰	۴۲
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۵۰	۴۵
۹۰	۵۵	۵۵	۵۵	۵۰	۴۵

شکل ۱۳ و ۱۴ و ۱۶ نشان‌دهنده تأثیر نسبت ناهمسانگردی بر زاویه ترک با محور بارگذاری در حالت‌های کشش خالص و برش خالص و حالت ترکیبی در طول ترک ۱۲ میلی‌متر به ترتیب می‌باشند. مطابق نتایج به‌دست‌آمده در زوایای مختلف لایه‌بندی در نسبت ناهمسانگردی‌های مختلف، زاویه β متفاوت است، به‌طوری‌که حالت کشش خالص در زاویه لایه‌بندی ۳۰ درجه و نسبت ناهمسانگردی ۴ برابر ۶ درجه است. حال آنکه این مقدار برای نسبت ناهمسانگردی ۱٫۸ برابر با ۲۰ درجه است. درواقع حالت کشش خالص برای نسبت ناهمسانگردی ۱٫۸ در زاویه

ترتیب مدل نمونه CCNBD با طول ترک ۱۲ و ۲۴ و ۳۶ میلی‌متر در زوایای مختلف لایه‌بندی ($\psi = 0^\circ - 30^\circ - 45^\circ$) و زاویه‌های مختلف ترک با محور بارگذاری ($\beta = 60^\circ - 75^\circ - 90^\circ$) برای نسبت ناهمسانگردی ($E/E' = 1.8$ و $E/E' = 4$) ساخته و با نرم‌افزار آباکوس اجرا انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق عبارت است از:

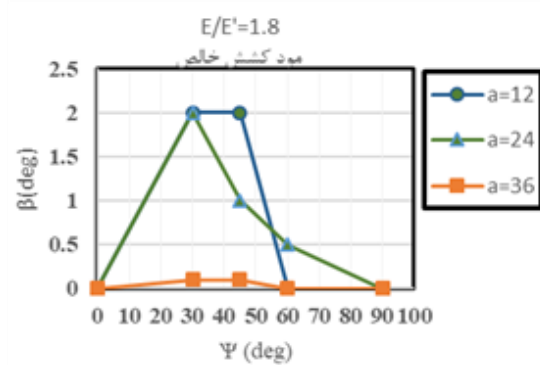
۱- زاویه لایه‌بندی ψ و زاویه ترک با محور بارگذاری β و تغییر طول ترک و تغییر نسبت ناهمسانگردی تاثیر محسوسی در مقادیر ضریب شدت تنش مودکشی و مود برشی دارد. در همه حالت‌های بررسی‌شده در طول ترک‌های مختلف و در نسبت ناهمسانگردی‌های مختلف برای یک زاویه لایه‌بندی ثابت، ضریب شدت تنش مود کشش در مقدار $\beta = 0^\circ$ حداکثر بوده و در $\beta = 90^\circ$ حداقل است و ضریب شدت تنش مود برشی در $\beta = 0^\circ$ و $\beta = 90^\circ$ حداقل و β بین ۳۰ تا ۴۰ درجه حداکثر است.

۲- تغییر زاویه ترک نسبت به محور بارگذاری β در همه حالت‌های طول ترک و نسبت ناهمسانگردی تاثیر محسوسی در ضریب شدت تنش مود کشش و برش دارد. درواقع حالت کشش خالص در زوایای مختلف لایه‌بندی (ψ) لزوماً در زاویه صفر درجه با محور بارگذاری ($\beta = 0^\circ$) اتفاق نمی‌افتد و این زاویه کاملاً متأثر از زوایای لایه‌بندی (ψ) است و همچنین برای حالت برش خالص نیز مطابق نتایج از مقادیر β متأثر از زاویه لایه‌بندی و نسبت ناهمسانگردی و طول ترک است.

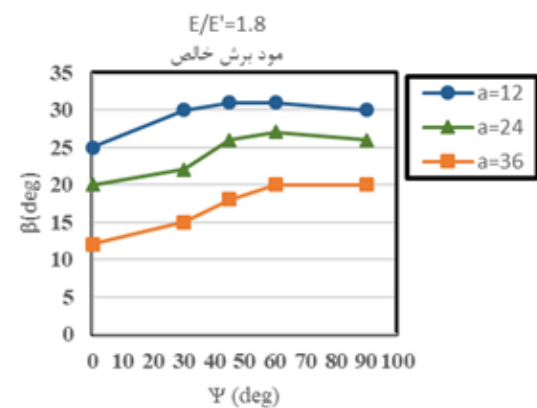
۳- تغییر طول ترک و نسبت ناهمسانگردی تاثیر محسوسی در زاویه ترک با محور بارگذاری β متناسب با حالت کشش خالص و برش خالص و مود ترکیبی دارد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده در زوایای مختلف لایه‌بندی در نسبت ناهمسانگردی‌های مختلف، زاویه β متفاوت است، به‌طوری‌که حالت کشش خالص در زاویه لایه‌بندی ۳۰ درجه و نسبت همسانگردی ۴ برابر ۶ است. حال آنکه این مقدار برای نسبت ناهمسانگردی ۱/۸ برابر با ۲ درجه است. درواقع حالت کشش خالص برای نسبت ناهمسانگردی ۱/۸ در زاویه لایه‌بندی ۳۰ درجه در حالت $\beta = 2^\circ$ درجه رخ می‌دهد و در نسبت ناهمسانگردی ۴ در $\beta = 6^\circ$ درجه حالت کشش خالص رخ می‌دهد.

مراجع

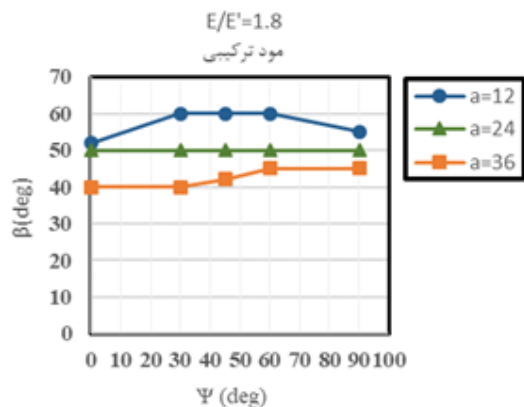
- [1] Xing, Yan, P. H. S. W. Kulatilake, and L. A. Sandbak. "Effect of rock mass and discontinuity mechanical properties and delayed rock supporting on



شکل ۱۶: تاثیر نسبت ناهمسانگردی بر زاویه ترک با محور بارگذاری در حالت کشش خالص و طول ترک‌های مختلف.



شکل ۱۷: تاثیر نسبت ناهمسانگردی بر زاویه ترک با محور بارگذاری در حالت برش خالص و طول ترک‌های مختلف.



شکل ۱۸: تاثیر نسبت ناهمسانگردی بر زاویه ترک با محور بارگذاری در حالت ترکیبی و طول ترک‌های مختلف.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر نسبت ناهمسانگردی، زاویه لایه‌بندی، زاویه بارگذاری و طول ترک بر روی ضریب شدت تنش در سنگ ناهمسانگرد مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. بدین

- [9] Y. Tien and M. Kuo, "A failure criterion for transversely isotropic rocks," *Int. J. Rock Mech. Min.*, vol. 38, no. January, pp. 399-412, 2001.
- [10] Sabatakakis, N., and G. Tsiambaos. "Anisotropy of Central Macedonia Phyllite and its effect on the uniaxial compressive strength." *Bull PWRC* 1 (1983): 2-6.
- [11] Tsidzi, Kwami Edwin Noble. "The influence of foliation on point load strength anisotropy of foliated rocks." *Engineering Geology* 29.1 (1990): 49-58.
- [12] Alkılıçgil, Çiğdem. "Development of a new method for mode I fracture toughness test on disc type rock specimens", MSc. thesis. 2006..
- [13] Clough, R. W. (1960). "The finite element method in plane stress analysis", In *Proceedings of 2nd ASCE Conference on Electronic Computation*, Pittsburgh Pa., Sept. 8 and 9, 1960.
- [14] Jing, L. (2003). "A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(3), 283-353.
- [15] Wang, Q., et al., "The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004. 41(2): p. 245-253.
- [16] Huang, Y., "A user-material subroutine in cooperating single crystal plasticity in the ABAQUS finite element program ", 1991: Harvard Uni.
- [17] Abadat A., "Investigating on fracture toughness changes of anisotropic rock", MSc thesis Tarbiat Modares Uni., 1393(In Persian).
- [18] Hibbitt, K.S., *ABAQUS/CAE USUr's Manual*. 2000.
- tunnel stability in an underground mine." *Engineering Geology* 238 (2018): 62-75..
- [2] Song, Honghua, et al. "Scale effects and strength anisotropy in coal." *International Journal of Coal Geology* 195 (2018): 37-46.
- [3] Jalalifar H., Jafari mohamadabadi B., Shahriar K. and Ahangari K., "Numerical simulation to predict the anisotropy of Faryab chromite rock using PFC software", *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, Volume 11, Issue 28, October 2021, Pages 23-35(In Persian).
- [4] Behnia M., Azizian F. and Ghazvinian A., "Numerical Modeling of Failure Mechanism of Transversely Isotropic Under Triaxial Loading By Discrete Element Method", *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, Volume 6, Issue 12, Mar. 2014, Pages 67-76. (In Persian).
- [5] Javid Rad F., "Fracture mechanics and its applications in engineering", Publisher Aerospace industries, 1384(In Persian).
- [6] Hadi H., Shahriar K., Fatehi Marji M., 2015, "Simulating the effect of disc erosion in TBM disc cutters by a semi-infinite DDM", *Arabian Journal of Geosciences* volume 8, pages3915–3927.
- [7] Abdollahipour A., Fatehi Marji M., Yarahmadi Bafghi A., Gholamnejad J., 2016, "Time-dependent crack propagation in a poroelastic medium using a fully coupled hydromechanical displacement discontinuity method" *International Journal of Fracture* No. 199, Pages 71–87.
- [8] Haeri H., Sarfarazi V., Ebneabbasi P., Shahbazian A., Nazari Maram A., Shahbazian A. Fatehi Marji M. and Mohamadi A. R., 2020, "XFEM and experimental simulation of failure mechanism of non-persistent joints in mortar under compression", *Construction and Building Materials*, Volume 236, 10 March 2020, 117500.