

مطالعه عددی مکانیزم شکست سنگ‌های دارای همسانگردی عرضی تحت تنش

همه‌جانبه با روش المان مجزا

فاطمه عزیزیان^۱، عبدالهادی قزوینیان^۲، محمود بهنیا^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: دی ۱۳۹۴، پذیرش: دی ۱۳۹۵)

چکیده

ناهمسانگردی یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های سنگ‌های رسوبی و دگرگونی است که در پایداری فضاهای روباز و زیرزمینی تأثیر گذار بوده و باید در طراحی‌ها در نظر گرفته شود. به همین منظور مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای با هدف بررسی تأثیر ناهمسانگردی بر رفتار مکانیکی و مقاومت نهایی چنین سنگ‌هایی انجام شده است. مدلسازی عددی یک ابزار مهم در طراحی ساختارها و تحلیل پایداری آنها به شمار می‌رود. با توجه به قابلیت‌های موجود در روش‌های عددی با مبنای المان مجزا در مدلسازی فرآیند شکست نمونه‌های دارای ناهمسانگردی و همچنین توانایی این روش‌ها در رفتار نگاری شکست سنگ‌ها تحت فشارهای تک‌محوره و سه‌محوره، در این تحقیق با استفاده از روش المان مجزا (نرم‌افزار *PFC*) رفتار سنگ دارای همسانگردی عرضی تحت فشار سه‌محوره مورد بررسی قرار گرفت تا با استفاده از این روش عددی، رفتار سنگ‌های دارای ناهمسانگردی عرضی تحت شرایط مختلف بارگذاری مدلسازی شود و بنابراین قابلیت این روش در پیش‌بینی رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی و برجا سنجیده شود. در این راستا نمونه‌هایی با زوایای مختلف لایه‌بندی (از ۰ تا ۹۰ درجه) با استفاده از روش المان مجزا مدل و تحت فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف بارگذاری شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش المان مجزا قابلیت مدلسازی این نوع ناهمسانگردی‌ها را داشته و تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که مقاومت حداکثر در سنگ دارای همسانگردی عرضی به جهت صفحه‌ی ناهمسانگردی بستگی دارد و تغییرات آن نسبت به زاویه‌ی لایه‌بندی موجود، منحنی‌هایی U شکل با شانه‌هایی نابرابر است که در زاویه‌ی لایه‌بندی صفر درجه، حداکثر مقدار و در زاویه‌ی ۳۰ درجه کمترین مقدار را دارد. نتایج همچنین نشان داد که افزایش فشارهای همه‌جانبه مود شکست نمونه‌ی دارای همسانگردی عرضی را تغییر نمی‌دهد.

کلید واژه‌ها

همسانگردی عرضی، ناپیوستگی و مقاومت سنگ، روش المان مجزا، بارگذاری سه‌محوره

ارجاع به این مقاله:

عزیزیان، ف.، قزوینیان، ع.، بهنیا، م.، (۱۳۹۵)، مطالعه عددی مکانیزم شکست سنگ‌های دارای همسانگردی عرضی تحت تنش همه‌جانبه با روش المان مجزا، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶(۱۲)، ۶۷-۷۶.

۱- مقدمه

توجه در مدلسازی فرآیند شکست سنگ با استفاده از روش المان مجزا، اغلب مدل‌ها برای سنگ‌های ایزوتروپ توسعه داده شده‌اند. تنها تعداد محدودی از تحقیقات و بررسی‌ها بر روی سنگ‌های آنیزوتروپ صورت گرفته است. بوناپارکوک کی‌بوک مین^۱ با استفاده از روش المان مجزا، رفتار مکانیکی سه نوع سنگ دارای همسانگردی عرضی از قبیل شیل، شیست و گنیس را بررسی نمودند [۹]. در مطالعات با مقیاس بزرگ‌تر نشان داده شد که در حفاری در سنگ‌های دارای لایه‌بندی جهت صفحات نقش مهمی را در پایداری حفاری ایفا می‌کند [۸-۱۰]. چو^۲ و همکاران یک سنگ شیستی که دارای مدول الاستیک آنیزوتروپ بوده را با استفاده از مدل جریان ذره‌ای و با شرایط وجود درزه‌هایی با سطح صاف شبیه‌سازی نمودند [۱۱]. پوتیوندی^۳ یک ماده دارای ناهمسانگردی عرضی را مدلسازی نمود و پارامترهای میکرومکانیکال مناسب برای مشابه شدن مدول الاستیک و مقاومت فشاری تک محوره برآورده شده با نتایج آزمایشگاهی را انتخاب نمود [۱۲].

با توجه به محدود بودن مطالعات عددی که بر روی شکست سنگ‌های دارای همسانگردی عرضی صورت گرفته و از طرفی به دلیل مشکلات تهیه تعداد نمونه کافی با مشخصات یکسان از این نوع سنگ برای انجام مطالعات تجربی، انجام مطالعات بیشتر به منظور بررسی رفتار این نوع سنگ‌ها با استفاده از روش‌های جدید و دارای قابلیت مدلسازی فرآیند شکست سنگ احساس می‌شود. به همین منظور در این مطالعه نحوه شکست سنگ‌های دارای همسانگردی عرضی که تحت فشار سه‌محوره قرار دارند تحت شرایط مختلف با استفاده از روش المان مجزا مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- کالیبراسیون مدل عددی

در مدلسازی عددی با روش المان مجزا و با استفاده از نرم‌افزار *PFC* برخلاف نرم‌افزارهایی چون *FLAC* و *UDEC* خصوصیات ماکرومکانیکی مدل مستقیماً به نرم‌افزار داده نمی‌شود و نیاز به کالیبراسیون مدل و برآورد میکروپارامترهای ورودی نرم‌افزار نظیر مدول یانگ ذرات و اتصالات، نسبت سختی نرمال به برشی، نحوه توزیع ذرات، ضرایب اتصال‌های ذره‌ها و مقاومت اتصال است. با توجه به کار صورت گرفته توسط تین و کو [۶]، میکروپارامترهای

ناهمسانگردی یکی از شاخصه‌های سنگ‌های رسوبی و دگرگونی است که در این حالت سنگ دارای صفحات ضعیفی همانند فولیاسیون، لایه‌بندی و یا شیستوزیته است. این خصوصیت منجر به تغییر خواص مقاومتی و تغییر شکل پذیری سنگ نسبت به جهت نمونه‌گیری و همچنین راستای بارگذاری در آن می‌شود.

حالت رایج و دارای تقارن الاستیک ناهمسانگردی که به طور عمده در سنگ‌های دگرگونی و رسوبی وجود دارد، همسانگرد عرضی^۱ نامیده می‌شود [۱-۳]. در سال‌های اخیر مطالعات آزمایشگاهی گسترده تجربی و عددی بر روی رفتار مکانیکی و شکست سنگ‌های دارای همسانگردی عرضی صورت پذیرفته است. تحقیقات دونات^۲ در سال ۱۹۶۴ بر روی اسلیت مارتینزبرگ^۳ نشان داد که مقاومت سنگ به طور قابل توجهی به زاویه موجود در بین امتداد بارگذاری و صفحه کلیواژ بستگی دارد. او همچنین نشان داد که در زوایای مختلف از لایه‌بندی، با بالا رفتن فشار محصورکننده، افزایش محسوسی در مقاومت فشاری سنگ مشاهده می‌شود [۴]. نیاندو^۴ و همکاران دادند که تغییر شکل پلاستیک شیل‌های تورنمیر^۵ به زاویه صفحات لایه‌بندی وابسته است [۵]. تین^۶ و همکارانش مطالعات خود را بر روی نمونه‌های دارای همسانگردی عرضی مصنوعی ساخته شده در آزمایشگاه متمرکز کردند و بر این اساس مدل شکست سنگ‌های دارای همسانگردی عرضی را بر اساس مشاهدات خود دسته‌بندی کردند [۶]. چو^۷ و همکاران تغییر شکل و مقاومت سه نوع سنگ دارای همسانگردی عرضی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند [۲].

یکی از حوزه‌های در حال توسعه در مکانیک محاسباتی روش المان مجزا در محیط‌های بلوکی و دانه‌ای است که در طی سالیان اخیر در مسائل مکانیک سنگ به شدت مورد استفاده قرار گرفته است. روش المان مجزا در سیستم دانه‌ای در مدلسازی فرآیند شکست سنگ بسیار موثرتر از سیستم سنتی این روش و استفاده از چندضلعی و چند وجهی است. این روش به عنوان ابزار مهندسی کارا در پیش‌بینی و تفسیر رفتار توده‌سنگ در مقیاس بزرگ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با وجود پیشرفت‌های قابل

B تعریف شد تا نتایج عددی تطبیق مناسبی با نتایج آزمایشگاه داشته باشد [۶].

به دلیل قابلیت بالای مدل دسته‌ای ذرات^{۱۱} در شبیه‌سازی دقیق و واقعی رفتار مکانیکی دانه‌های موجود در سنگ، همچنین توانایی آن در مطالعه اندرکنش پیچیده و کامل دانه‌ها و در نتیجه روند واقعی تشکیل ترک، در این تحقیق از این مدل استفاده شده است. برای کالیبراسیون مدل از آزمایش‌های فشاری تک‌محوره در یک مخزن استوانه‌ای استفاده شد. ارتفاع این مدل ۱۰۰ و عرض آن ۵۰ میلی‌متر و حاوی ۱۱۳۵۴ ذره است. سپس نمونه‌ها در ۷ زاویه لایه‌بندی و با لایه‌هایی به ضخامت ۵ میلی‌متر که از مواد A و B ساخته شده بودند، مدل شد. داده‌های مربوط به آزمایش‌های تین و کو، میکروپارامترهای مواد A و B و همچنین داده‌های مربوط به درزه‌های تعریف‌شده در نمونه‌ها به ترتیب در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. در شکل ۱ نمونه ایزوتروپ ساخته شده از ماده A و در شکل ۲ نمونه‌های دارای همسانگردی عرضی متشکل از دو ماده A و B برای ۷ زاویه مختلف لایه‌بندی (صفر تا ۹۰ درجه با فواصل ۱۵ درجه) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که لایه‌های آبی رنگ در شکل ۲ مربوط به ماده B و لایه‌های خاکستری رنگ نشان دهنده ماده A است.

مورد نیاز برای مدل‌سازی صورت گرفته در این تحقیق به گونه‌ای انتخاب شد که رفتار شکست سنگ تحت بارگذاری تک‌محوره و سه‌محوره با نتایج آزمایشگاهی ایشان همخوانی داشته باشد. پارامترهای مواد سازنده مدل A و B مطابق مواد ساخته شده توسط تین و همکاران که از سیمان، کائولینیت و آب به ترتیب با نسبت‌های ۱/۲: ۱: ۴ و ۰/۶: ۱: ۱ در شرایط آزمایشگاه هستند، انتخاب شد. در ادامه رفتار شکست نمونه‌ها برای زوایای مختلف لایه‌بندی (β) با نتایج حاصل از آزمایش‌های تین و کو کالیبره شدند. کالیبراسیون نمونه‌های دارای همسانگردی عرضی که متشکل از دو لایه با جنس متفاوت هستند نیازمند دو مرحله کالیبراسیون است. در مرحله اول نمونه‌هایی از جنس A و B به طور جداگانه ساخته شده و میکروپارامترهای مورد نیاز ساخت مواد تا رسیدن به خصوصیات ماکرومکانیکی آنها تحت بار تک‌محوره و سه‌محوره تغییر داده می‌شود. در مرحله دوم نیاز به کالیبراسیون نمونه‌های متشکل از دو ماده در زوایای مختلف لایه‌بندی و تحت بارگذاری است. با توجه به شرایط نمونه‌های آزمایشگاهی و همچنین به دلیل بالا بودن مقاومت شکست نمونه‌های عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی، یک دسته درزه منطبق بر فصل مشترک لایه‌ها و با پارامترهایی ضعیف‌تر نسبت به مواد سازنده A و

جدول ۱: مشخصات مواد A و B مورد استفاده در آزمایشگاه [۶]

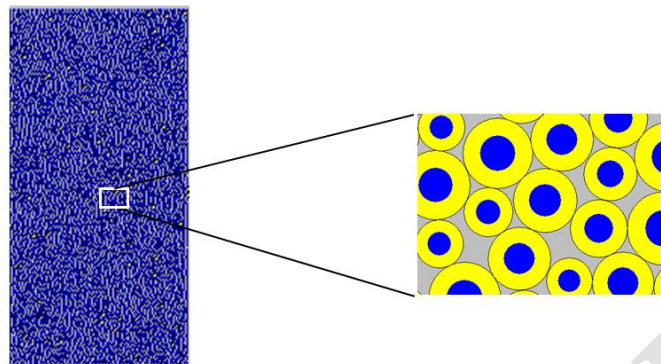
مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	مقاومت کششی غیرمستقیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	زاویه اصطکاک (درجه)	چگالی (KN/m^3)
۱۰۴/۲	۹/۶	۲۱/۷	۰/۲۳	۲۹	۲۱/۵
۴۳/۳	۳/۹	۱۱/۹	۰/۲۱	۲۵	۱۷/۶

جدول ۲: میکروپارامترهای برآورد شده در مدل عددی برای ماده‌ی A و ماده‌ی B

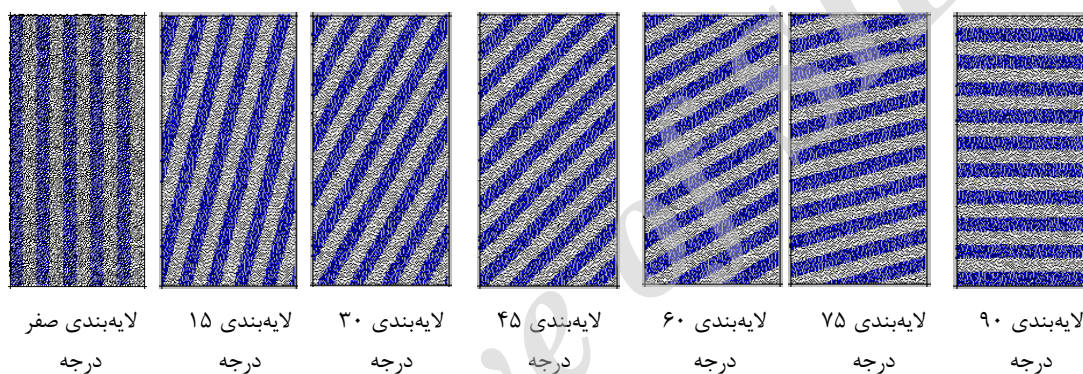
میکرو پارامتر	مقدار برای ماده A	مقدار برای ماده B	میکرو پارامتر	مقدار برای ماده A	مقدار برای ماده B
چگالی (kg/m^3)	۲۱۵۰	۱۷۶۰	مدول یانگ ذره ($E(GPa)$)	۱۷/۲	۹
شعاع کمیته دانه‌ها (m)	$۰/۲۷ \times ۱۰^{-۳}$	$۰/۲۷ \times ۱۰^{-۳}$	نسبت شعاع کمیته به شعاع بیشینه	۱/۶۶	۱/۶۶
ضریب اصطکاک	۰/۶۱	۰/۵۵	مدول یانگ اتصال موازی (GPa)	۱۷/۲	۹
مقاومت برشی اتصال موازی، میانگین (MPa) $\bar{\tau}_c$ (mean)	۸۱	۳۱	انحراف استاندارد مقاومت برشی اتصال موازی، (MPa) $\bar{\sigma}_c$ (std. dev.)	۱۴	۵/۵
مقاومت نرمال اتصال موازی، میانگین (MPa) $\bar{\sigma}_c$ (mean)	۸۱	۳۱	انحراف استاندارد مقاومت نرمال اتصال موازی، (MPa) $\bar{\sigma}_c$ (std. dev.)	۱۴	۵/۵
نسبت سختی‌های نرمال به برشی	۲/۱	۱/۹	نسبت سختی‌های نرمال به برشی ذرات	۲/۱	۱/۹
اتصال موازی ($\frac{\bar{k}_n}{\bar{k}_s}$)	۲/۱	۱/۹			

جدول ۳: مقدار پارامترهای لحاظ شده برای درزه‌ها

پارامتر	مقاومت برشی (MPa)	مقاومت نرمال (MPa)	ضریب اصطکاک	فاصله‌داری (mm)
مقدار	۳	۳	۰/۱	۵



شکل ۱: مخزن ذرات تشکیل‌دهنده ماده‌ی A



شکل ۲: نمونه‌های دارای همسانگردی عرضی مدلسازی شده در PFC

تشکیل ترک راحت‌تر و با صرف انرژی کمتری و در مراحل اولیه بارگذاری در این جهت شکل می‌گیرد. در این حالت مود شکست غالباً کششی است ولی به دلیل وجود فشار جانبی، فرآیند شکست در ماتریکس سنگ نیز رخ می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به دلیل توسعه ریزترک‌ها در نمونه، در حالت بارگذاری سه‌محوره نسبت به حالت تک‌محوره، به دلیل تأثیر نیروی جانبی بر تشکیل ترک و نقش آن در شکست نمونه همزمان با تأثیر نیروی محوری، مود شکست از حالت قائم به شکست مایل تبدیل می‌شود. همچنین با افزایش فشار جانبی، تعداد ترک‌های ایجاد شده در نمونه قبل از شکست نهایی افزایش یافته که این امر منجر به صرف انرژی بیشتر و در نتیجه افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود (شکل ۳).

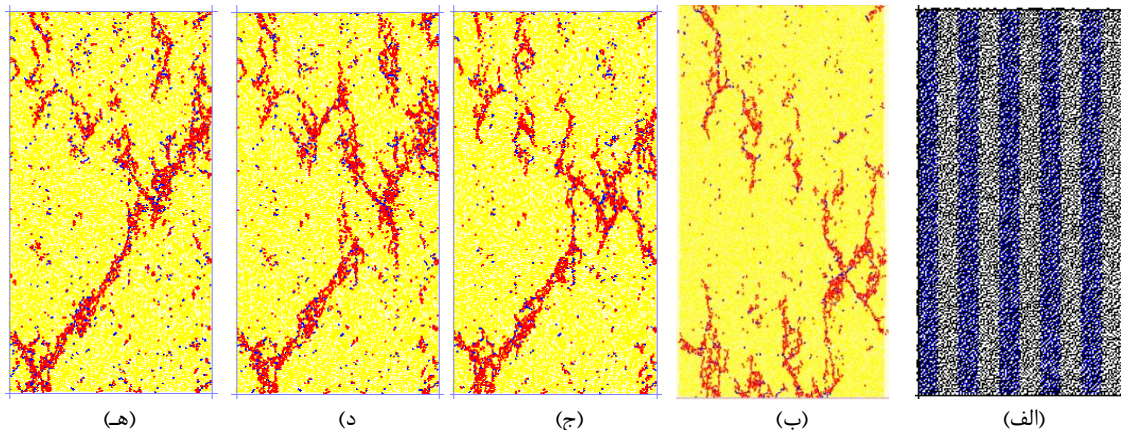
جزئیات بیشتر مربوط به مراحل کالیبراسیون و نتایج مربوط به آن در منبع شماره [۱۳] ارائه شده است.

۳- تحلیل عددی فرآیند شکست سنگ‌های دارای همسانگردی عرضی

برای بررسی مقاومت فشاری حداکثر نمونه‌ها و مود شکست آنها در زوایای مختلف لایه‌بندی، نمونه‌های ساخته شده در ابتدا در حالت سه‌محوره و تحت فشارهای ۳، ۶ و ۹ مگاپاسکال بارگذاری شدند و اثر تغییر زاویه لایه‌بندی بر مقاومت نهایی بررسی شد.

نتایج مدلسازی نمونه‌های دارای همسانگردی عرضی که تحت فشار همه‌جانبه قرار دارند نشان داد که:

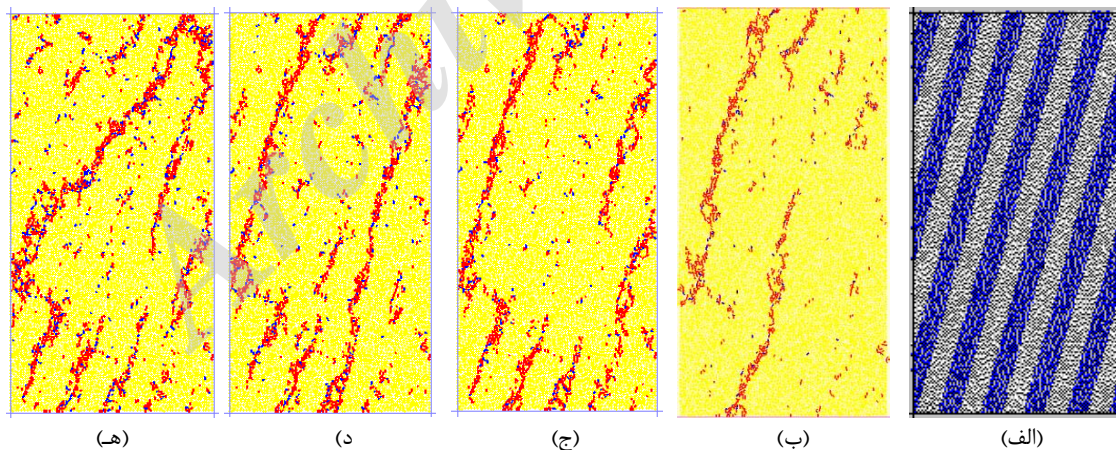
در $\beta=0$ به دلیل قراردادن لایه‌بندی به صورت قائم در نمونه‌های تحت بارگذاری، ترک‌های کششی نیز عموماً به صورت عمودی و در راستای لایه‌بندی شکل می‌گیرند. زیرا صفحات ضعف به موازات جهت بارگذاری اصلی است و



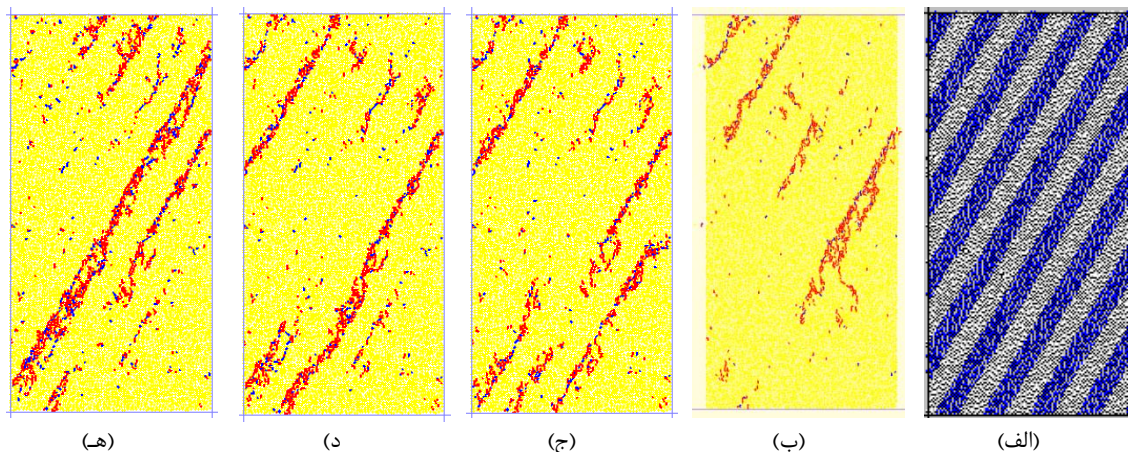
شکل ۳: الگوی شکست مدل‌های عددی الف) نمونه‌ی دارای همسانگردی عرضی با لایه‌بندی صفر درجه، تحت فشارهای جانبی: ب) صفر، ج) ۳ MPa، د) ۶ MPa و ه) ۹ MPa

به دلیل مقاومت کمتر لایه ضعیف‌تر، عمده ریز ترک‌ها در این لایه‌ها تشکیل شده ولی مسیر شکست نهایی همچنان در امتداد زاویه‌ی صفحه‌ی ایزوتروپ است (شکل‌های ۴ تا ۷). در این زوایا نیز با افزایش فشار جانبی ریز ترک‌های بیشتری در نمونه‌ها ایجاد شده و بنابراین مقاومت شکست نمونه افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در فشارهای جانبی بالاتر، رفتار شکست نمونه از حالت ترد به حالت نرم تغییر می‌کند. این مسئله برای زاویه ۴۵ درجه و برای تنش‌های همه جانبه ۳، ۶ و ۹ مگاپاسکال در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

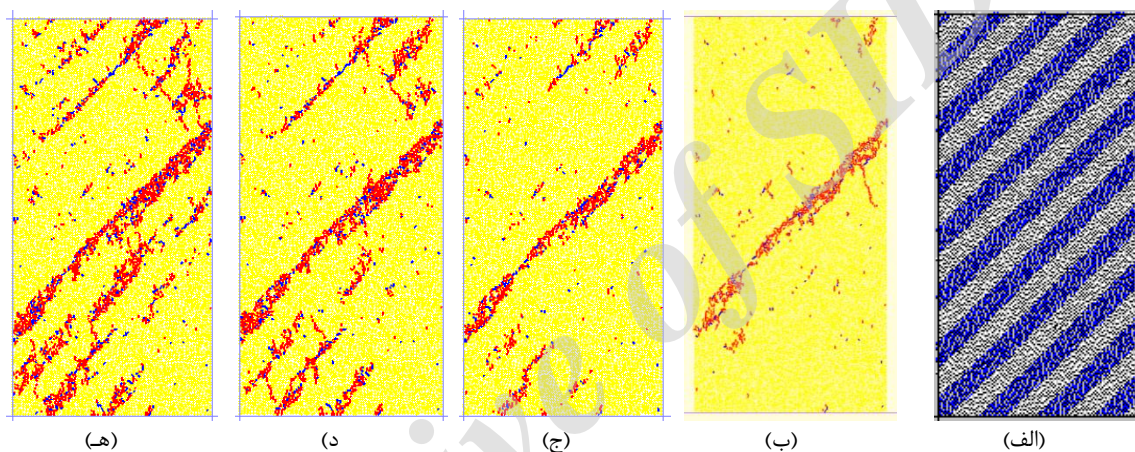
در ادامه برای زوایای $\beta=15$ تا ۶۰ درجه نیز مدل‌سازی‌ها نمونه‌های دارای همسانگردی عرضی تحت فشارهای همه جانبه صورت پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که در لایه‌بندی با زاویه کم و تحت فشار جانبی پایین، نمونه به صورت ترد و با لغزش بر روی یک یا دو تا از لایه‌های ضعیف‌تر می‌شکند (شکل ۴-ب). در صورتی که در همین زوایا و با افزایش تنش محصورکننده، مود شکست تبدیل به مجموعه‌ای از لغزش‌ها بر روی صفحات چندگانه می‌شود (شکل ۴-ه) و با افزایش فشار تعداد لایه‌های که در تشکیل مود شکست نمونه نقش دارند افزایش می‌یابد.



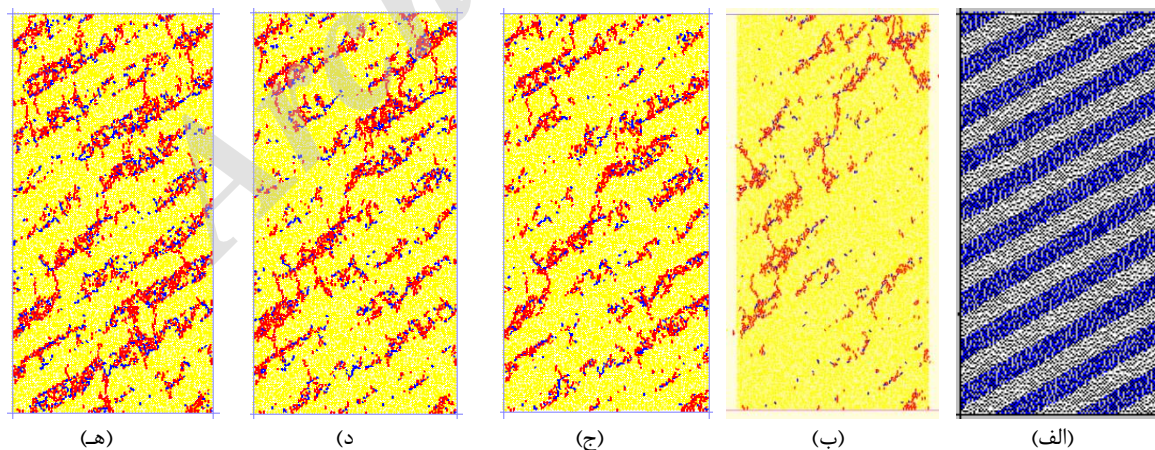
شکل ۴: الگوی شکست مدل‌های عددی الف) نمونه‌ی دارای همسانگردی عرضی با لایه‌بندی ۱۵ درجه، تحت فشارهای جانبی: ب) صفر، ج) ۳ MPa، د) ۶ MPa و ه) ۹ MPa



شکل ۵: الگوی شکست مدل‌های عددی الف) نمونه‌ی دارای همسانگردی عرضی با لایه‌بندی ۳۰ درجه، تحت فشارهای جانبی: ب) صفر، ج) ۳ MPa، د) ۶ MPa و ه) ۹ MPa



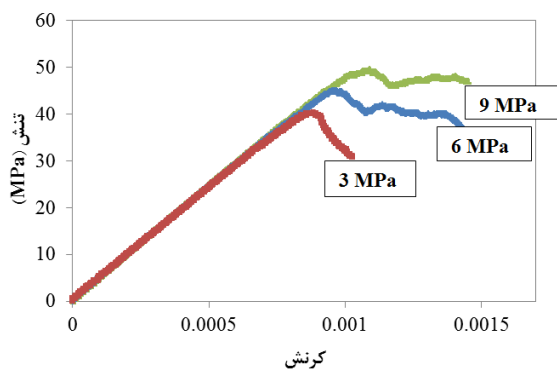
شکل ۶: الگوی شکست مدل‌های عددی الف) نمونه‌ی دارای همسانگردی عرضی با لایه‌بندی ۴۵ درجه، تحت فشارهای جانبی: ب) صفر، ج) ۳ MPa، د) ۶ MPa و ه) ۹ MPa



شکل ۷: الگوی شکست مدل‌های عددی الف) نمونه‌ی دارای همسانگردی عرضی با لایه‌بندی ۶۰ درجه، تحت فشارهای جانبی: ب) صفر، ج) ۳ MPa، د) ۶ MPa و ه) ۹ MPa

لایه‌بندی و درون لایه ضعیف‌تر (ریز ترک‌های آبی رنگ)، ترک‌های کششی در جهت عمود بر لایه‌بندی نیز ایجاد می‌شوند که با پیوستن به هم منجر به شکست نمونه

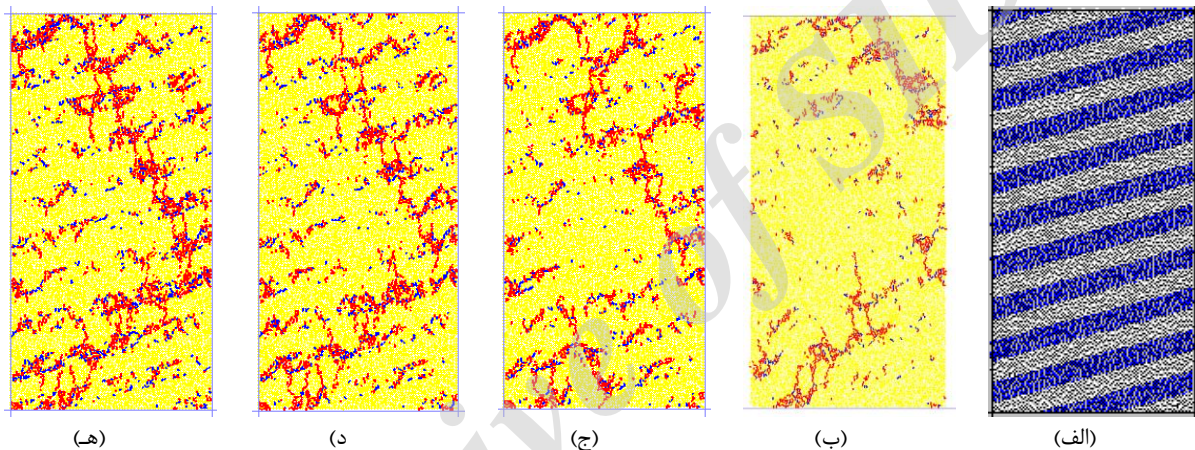
بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش زاویه لایه‌بندی همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود (در لایه‌بندی ۷۵ درجه) علاوه بر ترک‌های برشی تشکیل‌شده به موازات



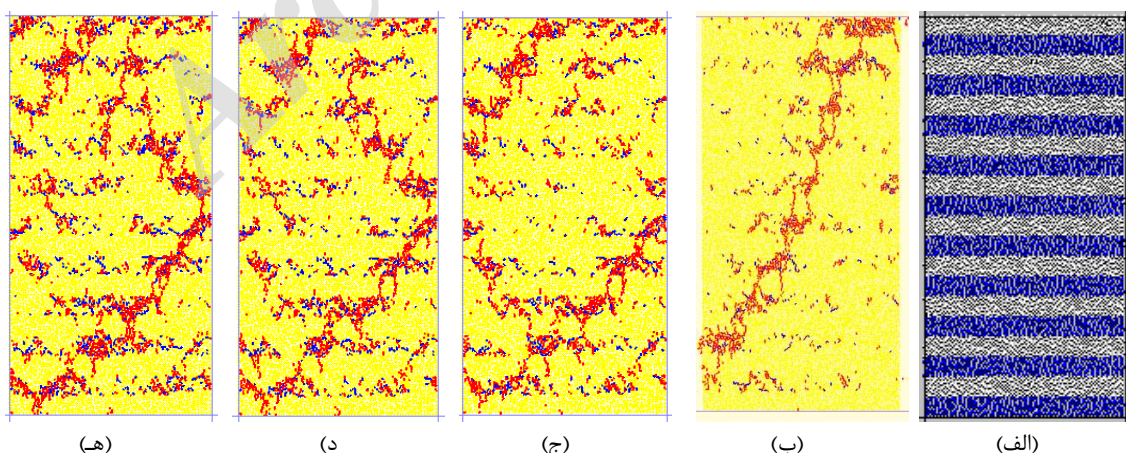
شکل ۸: نمودار تنش - کرنش برای نمونه‌ی با لایه‌بندی ۴۵ درجه در فشارهای جانبی مختلف

می‌شوند. این مود، ترکیبی از حالت لغزش روی صفحات چندگانه به همراه مود کششی است و بنابراین شکست نمونه به صورت ترکیبی از ترک‌های ایجاد شده در امتداد صفحات ضعف و ترک‌های شکل گرفته در ماتریکس نمونه هستند.

در نمونه با زاویه لایه‌بندی ۹۰ درجه، مود شکست عمدتاً کششی است (شکل ۱۰). ترک‌های برشی بیشتر در لایه‌های ضعیف‌تر (ماده‌ی B) شکل گرفته و پیوستن ترک‌های باله‌ای تشکیل شده در لایه‌های A به لایه‌های B منجر به شکست نمونه می‌شود. در این نمونه‌ها ترک‌های کششی ایجاد شده به دلیل بارگذاری نقش اتصال از لایه ضعیف به قوی را بازی می‌کنند.



شکل ۹: الگوی شکست مدل‌های عددی (الف) نمونه‌ی دارای همسانگردی عرضی با لایه‌بندی ۷۵ درجه، تحت فشارهای جانبی: (ب) صفر، (ج) ۳ MPa، (د) ۶ MPa و (ه) ۹ MPa

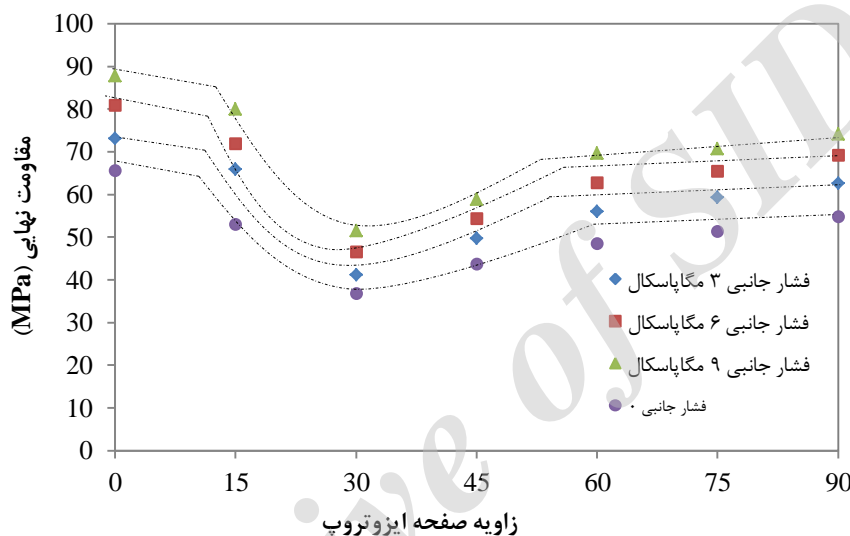


شکل ۱۰: الگوی شکست مدل‌های عددی (الف) نمونه‌ی دارای همسانگردی عرضی با لایه‌بندی ۹۰ درجه، تحت فشارهای جانبی: (ب) صفر، (ج) ۳ MPa، (د) ۶ MPa و (ه) ۹ MPa

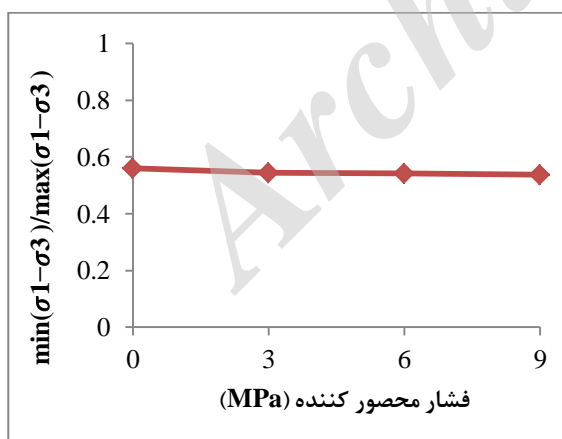
۴- تحلیل نتایج

نزدیک‌تر می‌شوند و یا به عبارت دیگر بازشدگی منحنی‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۱۲). با افزایش فشار جانبی مقاومت نمونه در لحظه شکست افزایش یافته ولی در فشارهای بالاتر، افزایش مقاومت برای زاویه ۳۰ درجه کمتر از افزایش فشار برای زاویه‌های دیگر است. به عبارتی دیگر فواصل منحنی‌ها با افزایش فشار برای زاویه ۳۰ درجه کمتر از زوایای دیگر است. این امر می‌تواند با شکست سریع نمونه به دلیل مود شکست لغزشی و نقش بیشتر لایه ضعیف در شکست نمونه توجیه شود.

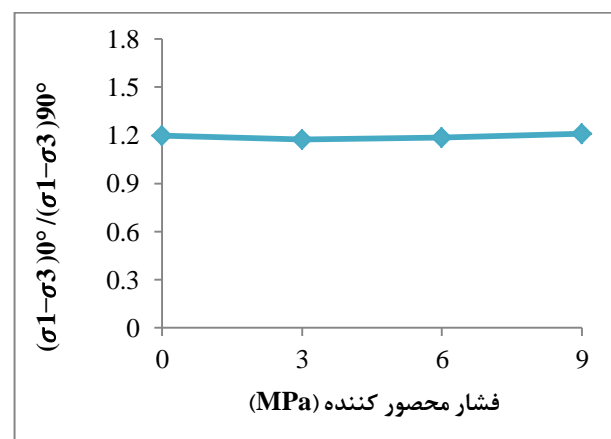
برای فهم بهتر تأثیر تغییرات زوایای لایه‌بندی بر مقاومت نمونه‌های دارای همسانگردی عرضی، تغییرات مقاومت فشاری حداکثر این نمونه‌ها بر حسب زاویه‌ی صفحه‌ی ایزوتروپ در فشارهای جانبی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، حداقل مقاومت شکست برای لایه‌بندی با زاویه ۳۰ درجه و فشار همه‌جانبه صفر رخ می‌دهد. همچنین مشخص است که با افزایش فشار همه‌جانبه، شانه‌های منحنی به هم



شکل ۱۱: تغییرات مقاومت نهایی نمونه بر حسب زاویه‌ی صفحه‌ی ایزوتروپ در فشارهای جانبی مختلف



(ب)



(الف)

شکل ۱۲: الف) تغییرات نسبت نابرابری بر حسب فشار جانبی ب) تغییرات نسبت عمق بر حسب فشار جانبی در نمونه‌های دارای همسانگردی عرضی

مقاومت بین $\beta=0$ (محور نمونه‌ی موازی با صفحه‌ی ایزوتروپ) و $\beta=90$ (محور نمونه‌ی عمود بر صفحه‌ی ایزوتروپ) را نشان می‌دهد. از نظر هندسی این نسبت

برای به دست آوردن هندسه‌ی منحنی‌های "U" شکل دو نسبت تعریف می‌شود. یکی از نسبت‌ها $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{90^\circ}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{0^\circ}}$ است که نسبت نابرابری^{۱۲} نامیده می‌شود. این نسبت تفاوت

نمونه‌هایی با زوایای مختلف لایه‌بندی (از ۰ تا ۹۰ درجه) با استفاده از روش المان مجزا مدل و تحت فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف بارگذاری گردیدند. نتایج مدل‌سازی عددی فرآیند شکست سنگ‌های دارای همسانگردی عرضی تحت فشار سه‌محوره با استفاده از روش المان مجزا نشان داد که این روش، روشی کارآمد برای مدل‌سازی سنگ‌های آنیزوتروپ و مطالعه مود شکست آنها بوده و دارای تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی است [۱۳]. نتایج نشان داد که در نمونه‌های دارای لایه‌بندی افقی ($\beta=90^\circ$)، شکست نمونه کمتر تحت تأثیر ناهمسانگردی است و الگوی شکست آن، مشابه شکست نمونه‌ی ایزوتروپ است. منحنی تغییرات مقاومت فشاری حداکثر نسبت به زاویه‌ی صفحه‌ی ناهمسانگردی در نمونه‌های دارای همسانگردی عرضی، یک منحنی U شکل با شانه‌های نابرابر است که حداکثر آن در زاویه‌ی صفر درجه (لایه‌بندی قائم) و حداقل آن در زاویه‌ی ۳۰ درجه از لایه‌بندی رخ می‌دهد. بررسی‌ها نشان داد که در آزمون‌های سه‌محوره فشاری و در فشارهای جانبی بالا، ریز ترک‌های بیشتری در امتداد لایه‌ها تشکیل می‌شوند که این امر منجر به افزایش مقاومت نمونه می‌گردد، در حالی که در فشارهای جانبی پایین‌تر، ریز ترک‌ها بیشتر در عرض لایه‌ها شکل می‌گیرند. مطالعه شکست در فشارهای جانبی مختلف نشان داد که افزایش فشار جانبی مود شکست نمونه‌ی دارای همسانگردی عرضی را تغییر نمی‌دهد، زیرا با افزایش فشار همه‌جانبه لغزش از روی یک صفحه تنها به لغزش بر روی چند صفحه تبدیل می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در نمونه‌های دارای همسانگردی عرضی، نسبت عمق و نسبت نابرابری، به تغییرات فشار جانبی حساس نیست.

مراجع

- [1] Amadei B.(1996). Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*;33(3):293-325.
- [2] Cho, JW, Kim, H, Jeon, S, Min, KB., (2012), Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist, *Int J Rock Mech Min Sci* 2012; 50 (12):158-69.
- [3] Kim, H, Cho, JW, Song, I, Min, KB.(2012). Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong

اختلاف دو لبه‌ی منحنی U را نشان می‌دهد. نسبت دیگر $\frac{\min(\sigma_1-\sigma_3)}{\max(\sigma_1-\sigma_3)}$ است که بیانگر نسبت عمق^{۱۳} منحنی U شکل است. در مخرج کسر بیشترین مقدار مقاومت در $\beta=0^\circ$ یا $\beta=90^\circ$ (هرکدام که بزرگتر بود) جایگذاری می‌شود. از نقطه نظر هندسی، این نسبت معرف عمق نسبی منحنی بوده و معنی فیزیکی واضحی ندارد، زیرا حداقل $(\sigma_1 - \sigma_3)$ با شکست در طول یا عرض صفحات ایزوتروپ حاصل می‌شود. این دو نسبت از روی منحنی " U " شکل محاسبه می‌شوند و بر حسب فشار جانبی برای هر گروه از سنگ رسم می‌شوند. در فشارهای محصورکننده صفر تا ۹ مگاپاسکال نسبت نابرابری $\frac{(\sigma_1-\sigma_3)_{0^\circ}}{(\sigma_1-\sigma_3)_{90^\circ}}$ و نسبت عمق $\frac{\min(\sigma_1-\sigma_3)}{\max(\sigma_1-\sigma_3)}$ محاسبه شد و تغییرات آن بر حسب فشار جانبی رسم گردید. همانگونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، تغییر فشار همه‌جانبه منجر به تغییر چندانی در اندازه‌ی این دو نسبت نخواهد شد، ولی نسبت نابرابری همیشه بزرگتر از یک است و این مؤید بیشتر بودن مقاومت نمونه در زاویه صفر نسبت به زاویه ۹۰ درجه است. نسبت عمق نیز به فشار جانبی حساس نبوده و با افزایش فشار جانبی افزایش ناچیزی می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت فشار جانبی تأثیر چندانی بر افتادگی منحنی‌های فوق ندارد و تقریباً به یک میزان مقاومت‌ها را افزایش می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

ناهمسانگردی که از ویژگی‌های شاخص سنگ‌های رسوبی و دگرگونی است به شدت در پایداری فضا‌های روباز و زیرزمینی تأثیرگذار بوده و می‌تواند کنترل‌کننده شکست توده‌سنگ باشد. هر چند مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای با هدف بررسی تأثیر ناهمسانگردی بر رفتار مکانیکی و مقاومت نهایی سنگ‌ها صورت گرفته اما استفاده از روش‌های عددی که یک ابزار مهم در طراحی و تحلیل پایداری سازها و مدل‌سازی فرآیند شکست نمونه‌های دارای ناهمسانگردی به شمار می‌رود در مطالعه رفتار این نوع سنگ‌ها پیشنهاد می‌گردد. با توجه به قابلیت‌های موجود در روش المان مجزا در مدل‌سازی شکست سنگ‌ها تحت فشارهای تک‌محوره و سه‌محوره، در این تحقیق با استفاده از روش المان مجزا رفتار سنگ دارای همسانگردی عرضی تحت فشار سه‌محوره مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین

Shale and Yeoncheon Schist in Korea. Eng Geol; 147: 68-77.

[4] Donath, F.A., (1964), Strength variation and deformational behavior of anisotropic rocks, State of stree Co, 281-298.

[5] Niandou, H., Shao, JF., Henry, JP., (1997), Laboratory investigation of the mechanical behavior of Tournemire shale, Int J Rock Mech Min Sci, 34: 3-16.

[6] Tien, Y. M., Kuo, M. C., & Juang, C. H., (2006), An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(8), 1163-1181.

[7] Bona Park., Ki-Bok Min., (2015), Bonded-particle discrete element modeling of mechanical behavior of transversely isotropic rock, International journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 76, 243-255.

[8] Meier, T., Rybacki, E., Backers, T., & Dresen, G., (2015), Influence of bedding angle on borehole stability: a laboratory investigation of transverse isotropic oil shale, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(4), 1535-1546.

[9] Zoback, M. D., Barton, C. A., Brudy, M., Castillo, D. A., Finkbeiner, T., Grollmund, B. R., & Wiprut, D. J., (2003), Determination of stress orientation and magnitude in deep wells, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7), 1049-1076.

[10] Zhang, J., (2013), Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes, International journal of rock mechanics and mining sciences, 60, 160-170.

[11] Chu, W., Zhang, C., & Hou, J., (2013, January), A particle-based model for studying anisotropic strength and deformation of schist, In ISRM SINOROCK 2013, International Society for Rock Mechanics.

[12] Potyondy, D. O., (2015), The bonded-particle model as a tool for rock mechanics research and application: current trends and future directions, Geosystem Engineering, 18(1), 1-28.

[13] Azizian, F., Ghazvinian, A., & Behnia, M., (2014), Prediction of Peak strength of transversely isotropic rocks by using distinct element method, Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 4(7), 9-16, (in Persian).

-
- 1- Transversely isotropic
 - 2- Donath
 - 3- Martinsburg
 - 4- Niandou
 - 5- Tournemire
 - 6- Tien
 - 7- Cho
 - 8- Bona Park and Ki-Bok Min
 - 9- Chu
 - 10- Potyondy
 - 11- Clump
 - 12- Unevenness ratio
 - 13- Depth ratio