پیشبینی مقاومت فشاری سنگ دارای همسانگردی عرضی با استفاده از روش المان مجزا

فاطمه عزيزيان^{‡1}، عبدالهادى قزوينيان²، محمود بهنيا³

1- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس 2- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس 3- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دريافت: ارديبهشت 1392 پذيرش: اسفند 1393)

چکیدہ

ناهمسانگردی یکی از مهمترین ویژگیهای سنگهای رسوبی و دگرگونی است که نقش تعیینکنندهای در تعیین رفتار این نوع سنگها تحت بارهای وارده بر آنها ایفا میکند. به همین منظور مطالعات آزمایشگاهی گستردهای باهدف بررسی تـأثیر ناهمسانگردی بر رفتار مکانیکی و مقاومت نهایی چنین سنگهایی انجام شده است. با توجه به قابلیتهای موجود در روشهای عددی با مبنای المان مجزا در مدلسازی فر آیند 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 نرمافزار PFC رفتار سنگ دارای همسانگردی عرضی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا نمونههایی با زاویههای مختلف لایهبنـدی (از 0 تـا 90 درجـه) بـا استفاده از نرمافزار PFC مدل و تحت فشارهای تکمحوره و سهمحوره، در این تحقیق با استفاده از نرمافزار PFC رفتار سنگ دارای استفاده از نرمافزار PFC مدل و تحت فشارهای همهجانبهی مختلف بارگذاری گردیدند. نتایج نشان داد که روش المان مجزا دارای قابلیت بالایی در مدلسازی همسانگردی عرضی است که مقایسه نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی نیز ایـن مطلـب را تأیید می نماید. نتایج حاصله نشان می دهد که مقاومت حداکثر سنگ به جهت صفحهی ناهمسانگردی بستگی داشته کـه در همین راستا مدلی برای پیشبینی مقاومت فشاری حداکثر نمونههای دارای همسانگردی عرضی پیشنهاد شده است.

كلمات كليدي

ناهمسانگردی، همسانگردی عرضی، مقاومت شکست، المان مجزا

^{*} عهده دار مکاتبات: Mahdiyeh.aziziyan@gmail.com

1– مقدمه

مطالعهی رفتار مکانیکی سنگهای رسوبی همانند شیل، ماسهسنگ، رس سنگ و گلسنگ و سنگهای دگرگونی همانند اسلیت و فیلیت در صنایع عمران، معدن و نفت مورد توجه است. پی سازههای عمرانی، تونلها و فضاهای زیرزمینی عمدتاً در چنین ساختارهای قرار دارد [1]. این سنگها که دارای لایهبندی و یا جهت یافتگی مشخصی هستند به دلیل دارا بودن خصوصیات متفاوت در جهت موازی و عمود بر فابریک غالب با نام سنگهای مسانگرد عرضی¹ شناخته می شوند [2]. در سالهای اخیر معیارهای شکست مختلفی برای سنگهای نا همسانگرد توسط محققان مختلف ارائه شده است [3-10] که پارامترهای استفاده شده در معیارهای آن ها و اعتبارسنجی آنها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته است.

دوناث² در سال 1964 یک سری آزمایش سهمحوره بـر روی اسلیت مارتینربرگ³ انجام داد که از نمونههای استوانههای با زاویهی کلیواژ (β) صفر تا 90 درجه و با فواصل 15 درجهای استفاده کرد. نتایج تحقیقات وی نشان داد کـه در مقـادیر مختلـف β، بـا بـالا رفـتن فشـار محصور کننده، افزایش محسوسی در مقاومت فشاری سنگ مشاهده می شود [11]. همچنین هوک آزمایش سهمحورهی فشاری را در نسبتهای مختلف σ_3/σ_1 و 0/171) بر روى اسليتهاى جنوب آفريقا انجام داد. لازم به ذکر است که روند منحنیهای تغییرات مقاومت نسبت به زاویهی لایهبندی با نتایج دوناث مشابه بوده و تنها تفاوت β در نسبت σ_3/σ_1 بوده است که برای مقادیر مختلف مقاومت نهایی با افزایش نسبت تنش افزایش می یابد. در نسبت معینی از تنش، تغییرات مقاومت نسبت به β یک منحنی U شکل است و حداقل مقاومت در β =30 مشاهده Uشده است[12]. مک لامور و گری⁴ رفتار سه نوع سنگ آنیزوتروپ را مورد بررسی قراردادند. نتایج نشان داد که زاویه صفحه کلیواژ β در برای مقاومت حداقل با افزایش فشار جانبی از 5000 psi به 40000 psi ، از 30° به 40° درجه تغییر می کند[13]. تین و کو⁵، مطالعات آزمایشگاهی خود را بر روی مود شکست سنگهای دارای همسانگرد عرضی ساخته شده از دو ماده مصنوعی انجام دادند. مطالعات آنها نشان داد که ماده با مقاومت کمتر

نقش کمتری را در تعیین انتشار ترک ایفا می کند [14]. بونا پارک و کیبوک مین⁶ با استفاده از مدلسازی المان مجزا، رفتار مکانیکی چند نوع سنگ ایزوتروپ عرضی از قبیل شیل، شیست و گنیس را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که برنامه جریان ذره⁷ یک نرمافزار کارآمد برای مدلسازی محیط آنیزوتروپ بوده و در مقیاسهای بزرگتر جوابگو است [15].

با توجه به حجم اندک مطالعات عددی صورت گرفته در این زمینه، در این مطالعه با استفاده از مدلسازی یک سری نمونههای سنگی دارای ویژگی همسانگردی عرضی، تأثیر زاویه قرارگیری صفحات لایهبندی بر مقاومت نهایی نمونه با استفاده از روش المان مجزا مورد بررسی قرار گرفت.

2- تأثير ناهمسانگردی بر مقاومت نهایی سنگ

در حالتی که ناهمسانگردی صفحهای باشد توده سنگ دارای دسته ای از صفحات ضعف است. اگر سS مقاومت برشی ذاتی صفحات ضعف باشد و $\mu_w ضریب اصطکاک$ داخلی این صفحات، شرایط برای لغزش در طول اینصفحات به صورت رابطه زیر بیان می شود:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(\sigma_3 + \mu\sigma_3)}{(1 - \sigma_w \cot\beta)\sin 2\beta}$$
(1)

در ایـن رابطـه β زاویـه بـین تـنش مـاکزیمم σ_۱ و نرمـال صفحات ضعف است.

مقدار σ_1 مورد نیاز برای شکست زمانی است که رابطه (1) به سمت بینهایت میل کند و این زمانی محقق می شود که $\beta \to \pi/2$ یا $\phi_w = \phi_w$ یا رود. برای زوایای بین این دو مقدار، شکست در مقدار معلوم و مشخصی از میافتد که بسته به مقدار β ، متغیر است. حداقل مقدار σ_1 برابر است با:

$$\sigma_1^{\min} = \sigma_3 + 2(S_w + \mu_w \sigma_3) \left[(1 + \mu_w^2)^{\frac{1}{2}} + \mu_w \right]$$
 (2)

مینیمم مقدار σ_1 در زاویه ویژه β_w اتفاق میافتـد کـه برابر است با:

$$\tan 2\beta_w = -\frac{1}{\mu_w} \tag{3}$$

اگر سطوح ضعف نسبت به تنش اصلی ماکزیمم در زاویه دیگری از β_w قرار داشته باشند، شکست تنها زمانی میتواند رخ بدهد که مقدار σ_1 بزرگتر از مقدار مقدار باشد. برای مقادیر $\beta < \phi_w$ ، شکست در سطوح ضعف برای هیچ مقدار σ_1 امکان پذیر نیست[16].

3- مدلسازی عددی

در مدلسازی های عددی با استفاده از نرمافزارهای FLAC و UDEC، خصوصیات ماکرومکانیکی (مدول یانگ، نسبت پواسون، مقاومت تک محوره، زاویه اصطکاک و …) مورد نیاز مدلسازی مستقیماً در نرمافزار وارد می شود اما در PFC به دلیل نوع مدلسازی آن چنین امکانی وجود ندارد. در این نرمافزار با انتخاب میکروپارامترها (مدول یانگ ذرات و اتصالات، نسبت سختی نرمال به برشی، نحوه توزیع ذرات، ماکروپارامترهای مدل به گونهای بر آورد می شوند که با رفتار آزمایشگاهی نمونه همخوانی داشته باشند. روند بر آورد ایس پارامترها به صورت سعی و خطا بوده که در مرحله اول نمونهای با استفاده از برنامه PFC ساخته می شود و در ادامه با تغییر میکروپارامترها تا رسیدن به نتایج مطلوب که نزدیک به نتایج آزمایشگاهی است مدلسازی ادامه می یابد.

با توجه به اینکه نمونههای مورد بررسی در این تحقیق دارای همسانگردی عرضی بوده و از دو جنس متفاوت (A وB) تشکیل شدهاند، کالیبراسیون⁸ آنها با کالیبراسیون نمونههای ساخته شده از یک جنس اندکی متفاوت است. در این حالت لازم است ابتدا نمونههایی از هر جنس به طور جداگانه مدل شده و تحت آزمایش تک محوره و سه محوره فشارشی کالیبره شوند تا جنس مصالح مورد استفاده در ساخت نمونههای آزمایشگاهی شبیه سازی شود. در ادامه باید نمونهای آزمایشگاهی شبیه سازی شود. در ادامه میکروپارامترهای حاصل از کالیبراسیون مرحله قبل ساخته شود و دوباره تحت آزمونهای فشارشی تک محوره و سه محوره کالیبره گردد.

در این تحقیق از مدل دستهای ذرات⁹ در ساخت مدلها استفاده شده است. از مزیتها این مدل میتوان به شبیه سازی دقیق تر و واقعی تر رفتار مکانیکی دانههای موجود در سنگ، اندرکنش پیچیده تر و کامل تر دانهها و روند واقعی تشکیل ترک در مدل اشاره کرد. مشخصات مواد A و B که توسط تین و همکاران در آزمایشگاه ساخته شده اند در جدول 1 ارائه شده است. مواد A و B از سیمان، کائولینیت و آب به ترتیب با نسبتهای 4، 1، 1/2]. و 1، 1، 6/0 در شرایط آزمایشگاه ساخته شده اند[14].

چگالی (KN/m³)	زاویه اصطکاک	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)	مقاومت کششی غیرمستقیم (MP a)	مقاومت فشاری تک محوره (MP a)	
21/5	29	0/23	21/7	9/6	104/2	مادەي A
17/6	25	0/21	11/9	3/9	43/3	مادەي B

جدول 1: مشخصات مواد A و B مورد استفاده در آزمایشگاه [14]

برای کالیبراسیون مدل، آزمایشات فشاری تک محوره در یک مخزن استوانه ای انجام شد. ارتفاع این مدل 100 و عـرض آن 50 میلـیمتـر و حـاوی 11354 ذره اسـت (شکل 1). دیواره های بالا و پایین بـه عنوان صفحات بارگذاری عمل کرده و اصطکاک دیواره ها برابر با صفر است. میزان تنش اعمال شده به نمونه با تقسیم نیروی اعمالی روی صفحات بر سطح مقطع آن ها محاسبه می شود. کرنش جانبی نیز با مانیتور کردن جابجایی جفت دیسکهای

دارند اندازه گیری می شود (محور نمونه با محور مختصات موازی است).

بارگذاری نمونه به وسیله حرکت دادن صفحات با سرعت V_p به سمت همدیگر انجام میشود که این سرعت نیز توسط نرخ کرنش \dot{e}_p مشخص میشود. بنابراین بارگذاری از نوع جابجایی-کنترل است. نرخ کرنش به عنوان پیش فرض برنامه انتخاب شد تا بارگذاری به اندازه کافی به صورت آهسته انجام شود. در نرخ بارگذاری 1 بر ثانیه بیش از صد هزار گام برای جابجایی تنها یک میلیمتر از صفحه بارگذاری طی میشود.



شكل 1: مخزن ذرات تشكيل دهنده مادهى A

پس از اتمام آزمایش، نتایج مدلسازی شامل مقاومت نهایی، بیشینهی مقدار تنش محوری، مدول یانگ و نسبت پواسون به دست میآیند. با اجرای 9 آزمایش تکمحوره برای هر کدام از این مواد به روش سعی و خطا،

میکروپارامترهای مدل هر ماده مطابق جدول 2 و با توجه به خواص آزمایشگاهی انتخاب گردید.

دادههای حاصل از کالیبراسیون مواد A و B در آزمونهای تک محوره و سه محوره در جدول 3 ارائه شده است. پس از کالیبراسیون مصالح A و B، نمونههای دارای همسانگردی عرضی متشکل از این مواد و با ضخامت 5 میلی متر در هر لایه با استفاده از ذرات دستهای ساخته شد. لایه روشن نشان دهنده ماده ی A و لایه تیره ماده ی B را نشان می دهد. نمونهها در 7 زاویه از صفر تا 90 و با فواصل 15 درجه مدل شده و تحت بارگذاری های تک محوره و سه محوره قرار گرفتند. شکل 2 تصویر نمونهای مدل شده تحت زوایای مختلف را نشان می دهد.

مقدار برای ماده B	مقدار برای ماده A	ميكروپارامتر	مقدار برای ماده B	مقدار برای ماده A	ميكروپارامتر
9	17/2	مدول یانگ ذره E (GPa)	1760	2150	چگالی(kg/m ³)
1/66	1/66	انسبت شعاع كمينه به شعاع بيشينه	0/27×10 ⁻³	0/27×10⁻³	شعاع کمینه دانهها(m)
9	17/2	مدول یانگ اتصال موازی (GPa)	0/55	0/61	ضريب اصطكاك
5/5	14	انحراف استاندارد مقاومت برشی اتصال موازی، (MPa) $\overline{\sigma}_c(std. \; dev.)$	31	81	مقاومت برشی اتصال موازی میانگین (mean) (MPa)
5/5	14	انحراف استاندارد مقاومت نرمال اتصال موازی، (MPa) $\overline{\sigma}_c(std.~dev.)$	31	81	مقاومت نرمال اتصال موازی، میانگین (mean) (MPa)
1/9	2/1	نسبت سختیهای نرمال به برشی $\left(rac{k_n}{k_s} ight)$ ذرات	1/9	2/1	نسبت سختیهای نرمال به $\left(rac{ar{k}_n}{ar{k}_s} ight)$ برشی اتصال موازی (

جدول 2: میکروپارامترهای بر آورد شده در مدل عددی برای مادهی A و مادهی B

جدول3: دادههای حاصل از کالیبراسیون نمونههای دارای همسانگردی عرضی در آزمونهای تک محوره و سه محوره

زاویه اصطکاک داخلی	تنش شروع ترک (MPa)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	
28/2	54/8	0/23	21/7	104/8	مادەىA
21/9	24/4	0/21	11/9	43/5	مادەي B



شکل 2: نمونههای دارای همسانگردی عرضی مدلسازی شده در PFC

با توجه به اینکه در آزمایشگاه لایهها بعد از نیمهخشک شدن روی هم قرار گرفتهاند، بین آنها چسبندگی وجود دارد ولی این چسبندگی در حد چسبندگی مواد تشکیلدهنده نمونه نیست. بنابراین در مرز لایهها پارامترهای مقاومتی ضعیفتر از مقاومت مواد درون لایهها است. در مدلسازی با PFC ، مشخصات اتصال دیسکهایی که در مرز لایهها قرار دارند با توجه به اینکه حجم بیشتر دیسک در کدام طرف لایه قرار دارد مشابه با اتصالهای آن لایه تخصیص داده می شود که این امر منجر به عدم تشکیل ناپیوستگی در مرز لایهها می شود. به این منظور و به دلیل

همسانگردی عرضی با نتایج مدلسازی و بالاتر بودن مقاومت در مدلهای عددی لازم شد تا مرز بین لایهها نیز شبیهسازی شود. لذا در مرز بین لایهها خصوصیاتی مانند مقاومت برشی، مقاومت نرمال و ضریب اصطکاک تغییر داده شد. این تغییرات با استفاده از تعریف دسته درزههایی به موازات لایهبندی و به فواصلی به ضخامت لایهها صورت پذیرفت. مقادیر این سه پارامتر تا دستیابی به منحنی کامل پنیش-کرنش آزمایشگاهی نمونههای دارای همسانگردی عرضی تغییر داده میشد. دادههای اعمالی در درزهها در جدول 4 ارائه شده است.

جدول 4: مقدار پارامترهای لحاظ شده برای درزهها

فاصلەدارى(mm)	ضريب اصطكاك	مقاومت نرمال (MP a)	مقاومت برشی (MPa)	پارامتر
5	0/1	3	3	مقدار

نتایج مدلسازی ها نشان داد که آزمونهای تک محوره و سه محوره بر روی نمونههای دارای همسانگردی عرضی دارای تطابق بسیار مناسبی با نتایج آزمایشگاهی است. به عنوان مثال در شکل 3 و شکل4 به ترتیب مقایسهی عددی و آزمایشگاهی نمودار تنش-کرنش نمونه ی با لایهبندی صفر درجه و مقایسهی نتایج عددی و آزمایشگاهی آزمایش سهمحوره در فشار جانبی 6 مگاپاسکال ارائه شده است.

جهت بررسی مقاومت شکست در زوایای مختلف لایه بندی، نمونه های ساخته شده تحت آزمون تک محوره و سه محوره فشاری در فشارهای 3، 6 و 9مگاپاسکال قرار گرفت و اثر تغییر زاویه لایه بندی بر مقاومت نهایی بررسی شد.



شکل3: مقایسهی عددی و آزمایشگاهی نمودار تنش-کرنش نمونهی با زاویه ناهمسانگردی صفر درجه



شکل 4: مقایسهی نتایج عددی و آزمایشگاهی آزمون سهمحوره در فشار جانبی 6 مگاپاسکال

4- بحث و بررسی

تغییرات مقاومت فشاری تکمحوره بر حسب زاویهی لایه بندی برای نمونه های عددی در شکل 5 رسم شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، منحنی از نوع شانه دار است که در آن حداکثر مقاومت در زاویه ی صفر درجه و حداقل مقاومت در زاویه ی 30 درجه از لایه بندی رخ می دهد.



شکل5: تعییرات مقاومت حداکثر فشاری نسبت به زاویه لایهبندی تحت بار تکمحوره

در تحقیق حاضر، نمودار مقاومت گسیختگی تکمحوره و سهمحورهی نمونههای دارای ناهمسانگردی عرضی نسبت به زاویهی لایهبندی برآورد شده است. مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای این نمونهها از پوش موهر به دست آمده است. از آنجایی که پوش موهر یک رابطهی خطی بین مقاومت شکست نمونه، فشار جانبی، چسبندگی و زاویهی اصطکاک داخلی آن برقرار میکند، سعی شد یک رابطهی خطی بین پارامترهای مدلسازی ایجاد شود. چون چسبندگی و زاویه اصطکاک به دست آمده برای زوایای

مختلف، متغیر است، لذا زاویه ی لایه بندی از عوامل تأثیر گذار در این رابطه خواهد بود. شکل 6 تغییرات مقاومت شکست را نسبت به فشار جانبی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از پوش موهر و زاویه یلایه بندی برای نمونه های دارای همسانگردی عرضی نشان میدهد. بنابراین اگر از تمامی داده های حاصل از انجام آزمایشات تکمحوره و سهمحوره بر روی نمونه های سنگ دارای همسانگردی عرضی یک برازش چند متغیره معادلات گوناگونی را به دست آورد که بهترین رابطه با ضریب تصمیم گیری 5/9% (رابطه (4)) انتخاب شد. مطابق شکل 7، مقاومت به دست آمده از نتایج مدلسازی و مقاومت پیش بینی شده از رابطه (4) همبستگی بسیار مناسبی دارند.







شکل b: تغییرات مقاومت شکست نمونههای دارای همسانگردی عرضی نسبت به الف) فشار جانبی، ب) چسبندگی ، ج) ضریب اصطکاک و د) زاویهی صفحه ناهمسانگردی



شکل 7: مقادیر مقاومت فشاری به دست آمده از نتایج عددی نسبت به مقادیر پیشبینیشدهی مقاومت فشاری حداکثر

مقایسهی نتایج حاصل از مدلسازی عددی و مقاومت پیش بینی شده از معادله ارائه شده در بالا نشان می دهد که برای یک سنگ همسانگرد عرضی می توان با یک تقریب خوب مقاومت فشاری حداکثر نمونه را به دست آورد.

شایان ذکر است که مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی واردشده در این معادلات از برازش پوش موهر روی نتایج نمونههای همسانگرد عرضی در هـ زاویـه بـه دسـت آمده است؛ لذا پيدا كردن ارتباط بين مقدار چسبندگي پوش موهر و مقادیر چسبندگی هر یک از دو مادهی تشکیلدهندهی نمونهی همسانگردی عرضی و همچنین ارتباط بین مقدار زاویه اصطکاک داخلی نمونه ی همسانگردی عرضی و مقادیر مربوط به مواد سازندهی آن، معادلهی ارزنده تری را برای پیش بینی مقاومت فشاری حداکثر نمونهی همسانگردی عرضی در اختیار قرار میدهد. قابل توجه است که معادلات پیشنهادشده جهت پیش بینی مقاومت فشاری حداکثر نمونهی همسانگردی عرضی، برای نمونههای استفاده شده در این تحقیق کاربرد دارد و به دست آوردن نتایج بیشتر از آزمایشات روی نمونههایی با خواص مکانیکی متفاوت، کمک بزرگی به ارائهی یک فرمول جامع برای نمونههای همسانگردی عرضی خواهد بود.

5- نتیجه گیری

مدلسازی عددی شکست سنگهای دارای همسانگردی عرضی تحت بارهای فشاری با استفاده از روش المان مجـزا نشان داد کے اپنی روش، روشے مفید برای مدلسازی سنگهای ناهمسانگرد است و نتایج مدلسازی آن مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. منحنی تغییرات مقاومت فشاری حداکثر نسبت به زاویهی صفحهی نا همسانگردی در نمونههای دارای همسانگردی عرضی، یک منحنی U شکل با شانههای نابرابر است که حداکثر آن در زاویهی صفر درجه (لايهبندى قائم) و حداقل آن در زاويهى 30 درجه از لایهبندی رخ میدهد. با توجه به برازش خطی خوب مقاومت شکست فشاری نمونههای دارای همسانگردی عرضی با استفاده از پارامترهای به دست آمده از پوش موهر، می توان گفت شکست در نرمافزار PFC2D از رفتار خطی موہر تبعیت می کند. ہمچنین با توجہ بہ تطبیق قابل قبول نتايج روش المان مجزا با نتايج آزمايشگاهي، اين روش جهت بررسیهای بزرگ مقیاس و در شرایطی که امکان مطالعه و آزمایشات برجای سنگ های همسانگرد عرضي وجود ندارد پيشنهاد مي شود.

6- مراجع

jurnal of Rock Mechanics & Mining Sciences 76 243–255.

[16]- Jeager, J.C., Cook, N.G.W , and Zimmerman, R.W. (2007). Funalemtals of rock mechanics, fourth editon, Blackwell publishing.

- 7- Particle Flow code
- 8- Calibration
- 9- Clump

[1]- Tang, C. ,Hudson J.A. (2010). Rock Failure Mechanisms explained and illustrated. Chapter 7, 121-129. CRC Press/Balkema.

[2]- Chou, Y., Chen, C.S. (2008). Determining elastic constants of transversely isotropic rocks using Brazilian test procedure. international journal for numerical and analytical methods in gemechanics. Int. J. Numer.Anal. Meth. Geomech, 32:219–234

[3]- Pei, J . (2004). Strength of transeversely isotropic rocks. Massachusetts Institute of Technology.

[4]- 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.

[5]- Griffith, A.A. (1920). The phenomenon of rupture and flow in solids. Philos Trans R Soc London. Vol. 221, pp. 163–98.

[6]- Horii, H., Nemat-Nasser, S. (1985). Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure, J.Geophy Res. Vol.90(B4), pp.3105 –3125.

[7]- Hoek, E., Bieniawski, Z.T. (1984). Brittle fracture propagation in rock under compression. International Journal of Fracture. Vol.26, pp.276-294.

[8]- Bobet, A. (2000). The initiation of secondary cracks in compression, Eng. Fract. Mech. Vol.66, pp187-219.

[9]- Nemat-Nasser, S. Horii, H. (1983). Rock failure in compression, Proceeding ninth workshop geothermal reservoir engineering standford university, standford, California. SGR-TR-74.

[10]- Ashby, M.F., Hallam,S.D. (1986). The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states. Acta. Metall. 34, pp.497-510.

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

[12]- Hoek, E. (1964). Fracture of anisotropic rock. J. Vol. 1, No. 10,510-518. South African Inst. Min. and. Met.,

[13]- Mclamore, R., Gray, K.E. (1967). The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks. Trans. Am. Soc. Mech. Eng. Series B. Vol. 89,62-76.

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

[15]- Bona Park., Ki-Bok Min. (2015). Bondedparticle discrete element modeling of mechanical behavior of transversely isotropic rock, International

¹⁻ Transversely isotropic

²⁻ Donath

³⁻ Martinsburg

⁴⁻ Maclamore and Gray

⁵⁻ Tien and Kuo

⁶⁻ Bona Park and Ki-Bok Min

Prediction of Peak strength of transversely isotropic rocks by using distinct element method

F. Azizian¹*, A. Ghazvinian², M. Behnia³

MSc. Rock Mechanics, Dept. of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, Iran
 Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, Iran
 Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

* Corresponding Author: <u>Mahdiyeh.aziziyan@gmail.com</u> (Received: May 2013, Accepted: March 2015)

Abstract

The most common feature of the sedimentary and metamorphic rocks is anisotropy. It plays a significant role in the behaviour of this type of rocks under applied forces. Therefore many experimental investigations are done to consider the influence of anisotropy on mechanical behaviour and peak strength of these rocks. Numerical methods and especially the Distinct Element Method (DEM) can be used to simulate brittle failure of rocks under uniaxial and triaxial loading. In this study the mechanical behaviour of a transversely isotropic rock is investigated by PFC code. Samples with varying bedding angle (from 0 to 90 degree) are loaded under different confining pressures. Comparison of numerical and experimental results revealed that PFC is an efficient tool for simulation of failure behaviour of transversely isotropic rock is varied by anisotropy orientation; then, a model is suggested to predict the peak strength of transversely isotropic rocks.

Keywords

Anisotropy, Transversely Isotropic, Peak Strength, Distinct Element