

نشریه مهندسی منابع معدنی Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE)



INTERNATIONAL UNVERSITY دوره دوم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۳۹ تا ۵۲ Vol. 2, No. 4, Winter 2018, pp. 39-52

بررسی مکانیزم شکست دیسکهای شبه سنگی حفرهدار در آزمون برزیلی

حسن سرفراز'، عباس مجدی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکدههای فنی دانشگاه تهران ۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکدههای فنی دانشگاه تهران

(دریافت ۱۳۹۶/۱۱/۱۵، پذیرش ۱۳۹۷/۰۳/۰۹)

چکیدہ

بررسی و شناخت رفتار تغییر شکل نمونههای سنگ ترد در طول بارگذاری و تاثیر آن در مکانیزم آسیب و توسعه آن حایز اهمیت است. روشهای مختلفی برای رفتارنگاری آسیب و شکست مصالح ارایه و بسط داده شده است. از بین آنها، روش انتشار آوایی به علت داشتن ویژگیهای منحصربهفرد و توانایی رفتارنگاری جامع در سالهای اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این تحقیق، مکانیزم شکست نمونههای شبهسنگی حفرهدار با استفاده از آزمون برزیلی توصیف شده است. هدف این مقاله، بررسی مکانیزم شکست و تاثیر آن روی مقاومت کششی با استفاده از دو روش عددی المان مجزا (DEM) با نرمافزار DEU و اجزای محدود (FEM) با نرمافزار RFPA است. در این تحقیق، تاثیر اندازه و موقعیت قرارگیری حفرهها بر الگوی شکست و مقاومت کششی نمونه بررسی شده است. بدین منظور، تعدادی مدلسازی عددی با تخلخلهای مختلف برای شبیهسازی آزمون برزیلی انجام شد. شکست کششی معمولا از بالا یا پایین حفره شروع می شود و ترکها تا سطح تماس نمونه و فک، گسترش می یابند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که مدلهای ساخته شده با نرمافزار DEV و اعرای الگوی شکست و رشد ترک با آزمونهای آزمون می برزیلی انجام شد. شکست کششی معمولا از بالا یا پایین حفره شروع می شود و ترکها تا سطح تماس نمونه و فک، گسترش می یابند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که مدلهای ساخته شده با نرمافزار DEV و او ای ا الگوی شکست و رشد ترک با آزمونهای آزمایشگاهی، مطابقت قابل قبولی دارند. همچنین با افزایش تخلخل، مقاومت کششی، رخداد آوایی و انرژی تولید شده به صورت نمایی کاهش می یابند. مدلسازی عددی، مقدار مقاومت کششی نمونههای شبه سنگی را به دلیل حل کرنش مسطحه، انرژی تولید شده به صورت نمایی کاهش می یابند. مدلسازی عددی، مقدار مقاومت کششی نمونههای شبه سنگی را به دلیل حل کرنش مسطحه،

كلمات كليدى

مكانيزم شكست، آسيب سنگ، مقاومت كششى، تخلخل، آزمون برزيلى.

نويسنده مسئول و عهده دار مكاتبات Email: amajdi@ut.ac.ir

۱– مقدمه

انتشار آوایی پدیده انتقال امواج ارتجاعی ناشی از آزادسازی ناگهانی انرژی از تغییر شکلهای مکانیکی حاصل از ایجاد و رشد ریزترکها، جابهجاییها و دیگر تغییرات در درون مواد است[۱]. توده سنگها به دلیل داشتن ناپیوستگیهایی مانند ریزترکها، ترکها، حفرهها و تخلخل به عنوان مواد ناهمسانگرد طبقهبندی میشوند. آزمونهای متعدد آزمایشگاهی و مشاهدات صحرایی نشان میدهند که بخشهای ضعیف موجود در سنگ، مقاومت توده سنگ را به طور قابل ملاحظهای کاهش میدهند. رشد ترک از قسمتهای ضعیف سنگ شروع و در نهایت با انتشار ترکها به شکست ختم میشود [۵-۲]. ترکها به عنوان نقاط ضعف و عوامل شکست نمونههای سنگیاند که از شکستهای موضعیاند، شکست کلی سنگها حاصل میشود، بنابراین مطالعه تولید، گسترش و به هم پیوستن این ترکها در پیشبینی فرآیند شکست سنگ نقش مهمی را ایفا میکند.

مکانیزم رشد ترکهای از پیش موجود در سنگ برای حالتهای بارگذاری کششی و برشی متفاوت است و شکست سنگ اغلب به صورت کششی اتفاق میافتد [۶]. غالبا در بارگذاری فشاری تکمحوری مسیر رشد ترکها به موازات تنش فشاری بیشینه است. برای مطالعه تجربی روند انتشار ترکها در سنگ معمولا از نمونههای شبه سنگی (مواد مصنوعی ساخته شده از ترکیب سیمان، گچ و آب) به دلیل سهولت تولید و قابلیت تکرارپذیری استفاده میشود. الگوی سهولت تولید و قابلیت تکرارپذیری استفاده میشود. الگوی ترکهای ایجاد شده مشتمل بر ترکهای بالهای ^۲ و ترکهای ثانویه^۲اند (شکل ۱). ترکهای بالهای، ترکهای کششیاند که از مجاور نوک ترک از پیش موجود شروع میشوند و به صورت انحنادار در امتداد فشار بیشینه گسترش مییابند. ترکهای ثانویه، ترکهای برشیاند که در ابتدا از نوک ترکها شروع میشوند و به دو شکل ترکهای صفحهای یا شبه صفحهای^۳ و ترکهای مورب^۴ انتشار مییابند[۷].

پارک^۵ و بوبت^۶ در سال ۲۰۱۰، فرآیند شکست را در نمونههای شبه سنگی حاوی ۳ ترک باز و بسته از پیش موجود تحت فشار تکمحوره مورد مطالعه قرار دادند. آنها اختلاف و تشابه بین ترکهای باز و بسته با هندسههای متفاوت را تشخیص و ارزیابی کردند [۸]. در این راستا، لی و جوون^۷ در سال ۲۰۱۱ با انجام یک سری از آزمایشهای تکمحوری در نمونههای پلی متیل متاکریلی (PMMA) گرانیت دیاستون و



شکل ۱: الگوی ترکهای ایجاد شده در نمونه شبه سنگی حاوی ترک شیبدار مرکزی تحت فشار تکمحوره [۷]

گرانیت هانگ دانگ حاوی یک و دو ترک از پیش موجود، فرآیند انتشار و گسترش ترک را مورد بررسی قرار دادند [۹]. در مقایسه با تحقیقات متعدد در رابطه با مکانیزم شکست در نمونههای شبه سنگی حاوی ترکهای از پیش موجود، مطالعات کمی از مکانیزم شکست در سنگهای حفرهدار (متخلخل) گزارش شده است [۱۰]. ال– هارتی^۸ و همکاران در سال ۱۹۹۹، تاثیر تخلخل بر مقاومت فشاری تکمحوره نمونههای تالک پر تخلخل بر مقاومت فشاری تک هرد را مطالعه کردند [۱۱]. این محققان نتیجه گرفتند که هم مقاومت فشاری تکمحوره و هم بار نقطهای با افزایش تخلخل کاهش مییابد.

یو^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۲ با بررسی نمونههای گرانیت با اندازههای مختلف ذرات تحت بارگذاری تکمحوره نشان دادند که تشکیل سیگنالهای آوایی نشانگر وجود آسیب در نمونهها است. آنها نشان دادند که آستانه تنشهای مربوط به مرحله فشاری، شروع و گسترش آسیب با افزایش اندازه ذرات کاهش مییابد. نتایج مدلسازی با نرمافزار RFPA نشان داد که با افزایش اندازه دانهبندی، آستانه شروع آسیب مقدار بزرگتری نسبت به مقادیر آزمایشگاهی دارد [1۲].

اثر رطوبت توسط ژائو^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۱۳ بررسی شده است. این محققان نتیجه گرفتند که در مرحله تراکم و ارتجاعی، افزایش تجمعی رخدادها خیلی آرام بوده و در نقطه آستانه تنش بحرانی، میکرو ترکهای زیادی تشکیل شده و نرخ رشد رخدادهای آوایی سریع است. بنابراین، تغییرات رخدادها ناشی از تغییرات مقادیر تنشها است و اطلاعات نشريه مهندسي منابع معدني

۱۸٫۷۵	۱۲٬۵	۶,۲۵	۶,۱۸	•	هىدىسە				
				۴	بدون حفرہ (Solid)				
			٨		حفرات کوچک دایروی				
٢	٢	٨			حفرات بزرگ دایروی				

جدول ۱: درصد تخلخل و تعداد نمونههای آزمون برزیلی استفاده شده در تحقیق حاضر [۱۸،۱۷]

مشاهدات ساختارهای داخلی و خارجی سنگ، شناخت بهتری از رفتار شکست را فراهم میآورد. المانها در مدل عددی ممکن است به یکدیگر متصل باشند که در این صورت مدل پیوسته نامیده میشود و ممکن است به شکل ناپیوستگیهایی جدا از هم باشند که در این صورت، مدل ناپیوسته است. مدلهای ناپیوسته، ساخت مدلهای مربوط به لغزش و جدایی در سطح را ممکن میسازد. بیشتر روشهای رایج عددی در مسایل مکانیک سنگ، روشهای پیوسته، ناپیوسته و هیبرید یا ترکیبیاند.

نرمافزار UDEC یک برنامه تحلیل عددی دوبعدی است که بر مبنای روش المان مجزا (DEM) برای تحلیل مکانیک سنگی محیطهای ناپیوسته به کار میرود[۱۹]. در تحقیق حاضر، برای درزهها از مدل لغزشی کولمب (الاستیک – پلاستیک) و برای مواد از مدل موهر استفاده شده است.

نرمافزار RFPA در سال ۱۹۹۵ توسط تانگ^{۱۰} ارایه شده است و این نرمافزار می تواند فاکتورهای مقیاس نمونه، اندازه دانه و ناهمگنی را در فرآیند گسیختگی سنگ بررسی کند[۲۰]. با شرح ناهمگنی سنگ در مقیاس مزو^{۱۰} در کد RFPA، سازه به المانهای مزوسکوپیک زیادی با اندازه یکسان تقسیم میشود. می توان فرض کرد که ویژگی مکانیکی این المانها مانند مدول الاستیک و مقاومت، از قانون توزیع یکنواخت^{۱۰}، توزیع نرمال^{۱۰} و توزیع ویبال^{۱۰} تبعیت میکنند. در نرمافزار RFPA از توزیع ویبال با تابع چگالی احتمالی مطابق رابطه ۱ برای تولید نمونههای همگن و ناهمگن استفاده شده است[۲۱].

$$f(u) = \frac{m}{u_0} (\frac{u}{u_0})^{m-1} \exp(-\frac{u}{u_0})^m$$
(1)

بسیار مفیدی در مورد پایداری سنگ می دهد [۱۳]. با استفاده از روش انتشار آوایی، تحقیقاتی توسط جی'' و همکاران در سال ۲۰۱۴ انجام شد و بر اساس دادههای حاصل، ارتباطی بین منحنی نرخ کانت (AE¹) با زمان و منحنیهای تنش-کرنش در سنگ گرانیت ارایه شد [۱۴]. لی^{۲۱} و همکارانش در سال ۲۰۱۵، با استفاده از نمونههای زغالسنگ به مطالعه اثر نرخ بارگذاری در فرآیند گسیختگی بر روی مشخصه AE پرداختند[۵۵]. در سال ۲۰۱۵، جی و همکاران رفتار تاثیر آسیب در سنگ نمک را با استفاده از روش انتشار آوایی مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که مشخصههای مکانیکی سنگ نمک تاثیر مهمی بر روی ایمنی مغارهای نمکی دارد و تکنیک انتشار آوایی برای تحلیل تولید ریزتر کها در سنگ نمک تحت شرایط فشاری تکمحوره به کار رفته است و با رفتارسنجی آوایی در منحنی

در این مقاله، برای بررسی چگونگی تاثیر حفرات بر مقاومت کششی و مکانیزم شکست نمونههای شبهسنگی حفرهدار با استفاده از نتایج آزمون برزیلی، دو روش المان مجزا و اجزای محدود به ترتیب با نرمافزارهای UDEC و RFPA به کار گرفته شد. نرمافزار RFPA در روش انتشار آوایی برای ارزیابی رشد ترکها مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترها و خواص مکانیکی ورودی در دو نرمافزار یاد شده از نتایج آزمایشگاهی موجود [۱۸،۱۷] استفاده شده است، سپس نتایج مدلسازی عددی با آزمونهای آزمایشگاهی مقایسه و صحتسنجی شده است.

۲- آزمونهای آزمایشگاهی

آزمونهای آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش مشتمل بر تعداد ۲۰ آزمون برزیلی از نمونههای بی حفره (بدون تخلخل) و حفرهدار (متخلخل) است. تعداد، اندازه، شکل و درصد تخلخل نمونهها مطابق جدول ۱ است. جنس نمونهها Hydro-Stone TB و قطر نمونهها و قطر حفرات کوچک و بزرگ دایروی به ترتیب برابر با ۵، ۸۹، و ۱٫۲۷ سانتی متر است. تخلخل نمونهها مطابق با قطر نمونه و قطر حفرات کوچک و بزرگ محاسبه و در جدول ۱ ارایه شده است [۱۸،۱۷].

۳– مدلسازی عددی

در سالهای اخیر، استفاده از روشهای عددی در مکانیک شکست سنگ افزایش یافته است. روشهای عددی ابزار حل بسیاری از مسایل مکانیک شکست و مهندسی سنگ است.

که در آن:

u پارامتر تخصیص داده شده به المانها مانند مقاومت فشاری تک محوره یا مدول ارتجاعی

 \mathbf{u}_{0} پارامتر مقیاس مانند مقاومت فشاری تک
محورہ یا مدول ارتجاعی

m شاخص ناهمگنی ماده

مقدار m باید بزرگتر از یک باشد. در m=1.0 ماده به طور همگن است. بزرگتر بودن مقدار m نشان دهنده همگنی ماده است. برای مقادیر بالاتر مقدار m، مقاومت بیشتر المانها نزدیک به u_0 است. مشخصه توزیع ویبال در شکل ۲ نشان داده شده است [11].



شکل ۲: منحنی شاخص ناهمگنی [۲۱]

شبیه سازی انتشار آوایی ^۸ در RFPA با فرض اینکه گسیختگی هر المان ناشی از آزاد سازی انرژی به طور کامل است و در نتیجه کانت های انتشار آوایی با گسیختگی هر المان تولید می شود. فاکتور آسیب (D) بر حسب تعداد المان ها به صورت رابطه ۲ تعریف می شود [۲۱]:

$$D = \frac{N}{N_f} \tag{7}$$

که در آن:

تعداد تجمعی المانهای گسیخته شده^{۱۹} در لحظه N_{f} شکست کامل

N تعداد تجمعی المانهای گسیخته شده در هر مرحله زمانی مورد بررسی

مشخصه المانها در مقیاس مزوسکوپیک، ایزوتروپیک و هموژن است[۲۱]. نسبت به سایر روشهای المان محدود، RFPA قادر به شبیهسازی کامل فرآیند آسیب است. برخی از ویژگیهای RFPA بهصورت زیر است:

RFPA یک کد المان محدود است و میتواند رفتار

غیرخطی با فرض ناهمگنی سنگها را مدل کند.
در RFPA بعد از گسیختگی المانها، محاسبات در بعضی
از قسمتها ادامه مییابد.
رفتار
$$A^{c}$$
 در طول آسیب سنگ نیز با RFPA شبیهسازی
میشود.
برای ارزیابی آسیب و شرح رفتار گسیختگی مطابق علم
میشود.
مکانیک آسیب با استفاده از مدول الاستیسیته، معادله آسیب
مطابق رابطه ۳ تعریف میشود [۲۰] :
مطابق رابطه ۳ تعریف میشود [۲۰] :
که در آن:
(۳)
که در آن:
D مدول ارتجاعی ماده آسیب دیده، ایزوتروپیک و D
 B_{0} مدول ارتجاعی ماده آسیب دیده، ایزوتروپیک و D
و A و B_{0} اسکالرند [۲۰]. RFPA قادر به ایجاد تمایز بین
شکست کششی از شکست برشی بر اساس رنگ دایرههای
رخداد AE است.

در آزمون برزیلی، نمونه بین دو فک قرار میگیرد که این دو فک با سرعت ثابتی نسبت به یکدیگر حرکت میکنند. مقاومت کششی در این آزمون از رابطه۴ محاسبه میشود:

 $\sigma_t = \frac{2p}{\pi Dt} \tag{(f)}$

ر کی p بار وارد شده در راستای قطر D قطر

نرخ بارگذاری فک ممکن است بر رفتار مکانیکی نمونه تاثیرگذار باشد. بنابراین، آهنگ بارگذاری باید تااندازهای آهسته باشد. آهنگ متوسط سرعت فکها در مدلسازی عددی نمونههای شبه سنگی با نرمافزار UDEC و RFPA برابر با نمونههای شبه سنگی با نرمافزار UDEC و RFPA برابر با مطابق جدول ۲ خلاصه شده است.

۲−۱− نمونه بدون حفره (Solid)

الگوی شکست مدل عددی آزمون برزیلی برای نمونه بدون حفره (تخلخل صفر) همراه با آزمون آزمایشگاهی متناظر آن مطابق شکل ۳ و ۴ است. در دو نرمافزار UDEC و RFPA ابتدا ترک در مرکز نمونه تولید می شود. به مرور زمان، ترک تا سطح

مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری تک محورہ (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (MPa)	ضريب پواسون	مدول ارتجاعی (GPa)
۵٬۵۲	۵۵	۳۵	١۴	۰٫۲۵	18

جدول ۲: خصوصیات مکانیکی مدل عددی استخراج شده [۱۸،۱۷]

شکل۳: آزمون آزمایشگاهی نمونه بدون حفره(الف)[۱۸،۱۷]، مدل عددی نمونه آزمون برزیلی بدون حفره با نرمافزار UDEC (ب و ج)



شکل۴: مراحل شروع و گسترش ترک در نمونه آزمون برزیلی بدون حفره با نرمافزار RFPA

قرارگیری حفرات نسبت به راستای بارگذاری نمونهها متمایل است. مطابق شکل ۷، شروع شکست در نرمافزار UDEC در بخش پایینی یکی از دو حفره است و در نرمافزار RFPA، ترک اولیه نمونه از بالای دو حفره ایجاد میشود. سپس ترکها در بالا و پایین این حفره، تا سطح تماس نمونه و فک گسترش می یابند. طبق شکل ۸، در نرمافزار UDEC شکست از بالای حفره بالایی و سپس از ناحیه پایینی حفره پایینی شروع می شود. و در نرمافزار RFPA، از دو طرف حفره، ترک آغاز می شود.

۳-۳- نمونههای با تخلخل ۶٬۲۵ درصد

شکل ۹ و ۱۰، به ترتیب شکست مدل عددی نمونه شبه سنگی حاوی حفره بزرگ دایروی با تخلخل ۶٫۲۵ درصد ۱LH6.25_A1 و 1LH6.25_A2) و (1LH6.25_B1 و (1LH6.25_B2) را به همراه مدل آزمایشگاهی متناظر آنها نشان میدهد. در هر دو نرمافزار UDEC و RFPA مطابق تماس نمونه با فک، گسترش مییابد. یکی از ویژگیهای اصلی نرمافزار RFPA، مدلسازی فرآیندهای آوایی در طول آزمایش برای نمونههای مدل شده است، به گونهای که محل، تعداد و انرژی معادل برای هر رویداد را در طول بارگذاری با روند آسیب و تولید ریزترکها نشان میدهد. همچنین آسیب هر المان را با دایره نشان میدهد که هرکدام از دایرهها بیانگر رخداد آوایی و قطر آنها بیانگر مقدار انرژی آزاد شده است. نقاط بنفش و قرمزرنگ به ترتیب در نرمافزار DDEC و RFPA بیانگر ترک گسترشیافته است. در تمامی مدلهای عددی در نرمافزار UDEC، خطوط سبز رنگ صرفا برای ایجاد حفره است.

۲-۲- نمونههای با تخلخل ۶٬۱۸ درصد

شکل ۵ و ۶، شکست نمونههای مدل عددی مشتمل بر دو حفره کوچک دایروی به نام (2SH6.18_A2،2SH6.18_A1) و و (2SH6.18_B2، 2SH6.18] با تخلخل یکسان ۶٫۱۸ درصد را به همراه حالت شکست آنها در آزمون آزمایشگاهی نشان می دهد. نمونهها در آزمایشگاه برای تکرارپذیری الگوی شکست و تعیین مقاومت کششی، دو بار تست شده است که اندیس مثال نمونه A در آزمایشگاه دو بار تست شده است که اندیس تفاوت دو نمونه A و B در موقعیت قرارگیری حفرات موجود در آنها است. در این نمونهها راستای قرارگیری حفرات به موازات آنها است. در این نمونهها راستای قرارگیری حفرات دونهها راستای بارگذاری نمونهها است. برای هر دو حالت از نمونهها و در هر دو نرمافزار UDEC و RFPA، شکست ابتدا در حفره بالایی شکل می گیرد، سپس ترکها به طرف حفره پایینی

شکل ۷ و ۸، به ترتیب شکست نمونه های مربوط به مدل های عددی دارای دو حفره کوچک دایروی (C1_2SH6.18 و 2SH6.18_C2 و (SH6.18_D2 و 2SH6.18)با تخلخل ۶٬۱۸ درصد را به همراه نمونه های متناظر آزمایشگاهی آن ها نشان می دهد. در شکل ۷، راستای قرار گیری حفرات عمود بر راستای بار گذاری نمونه ها است و در شکل ۸ راستای

شکل ۹ که در آن حفره در بخش فوقانی نمونه قرار دارد، شکست از بالای حفره ایجاد میشود و به تدریج ترک از پایین حفره گسترش مییابد. طبق شکل ۱۰ که در آن حفره در بخش

مرکزی نمونه قرار دارد، شکست از دو طرف حفره شروع و تا سطح بیرونی نمونه امتداد مییابد.



شکل۵: مراحل شروع و گسترش ترک نمونه 2SH6.18_A، الف) آزمایشگاهی[۱۸،۱۷]، ب) نرمافزار UDEC، ج) نرمافزار RFPA



شکل ۶: مراحل شروع و گسترش ترک نمونه 2SH6.18_B، الف) آزمایشگاهی [۱۸،۱۷]، ب) نرمافزار UDEC، ج) نرمافزار RFPA



شکل۷: مراحل شروع و گسترش ترک نمونه 2SH6.18_C، الف) آزمایشگاهی [۱۸،۱۷]، ب) نرمافزار UDEC، ج) نرمافزار RFPA



شکل۸: مراحل شروع و گسترش ترک نمونه SH6.18_D، الف) آزمایشگاهی[۱۸،۱۷]، ب) نرمافزار UDEC، ج) نرمافزار RFPA



شکل۹: مراحل شروع و گسترش ترک نمونه 1LH6.25A، الف) آزمایشگاهی[۱۸،۱۷]، ب) نرمافزار UDEC، ج) نرمافزار RFPA



شكل١٠: مراحل شروع و گسترش ترک نمونه 1LH6.25B، الف) آزمایشگاهی[١٨،١٧]، ب) نرمافزار UDEC، ج) نرمافزار RFPA

۳-۴- نمونههای با تخلخل ۱۲٬۵ درصد

شکل ۱۱، شکست نمونههای شبهسنگی حاوی دو حفره بزرگ دایروی با تخلخل ۱۲٫۵ درصد (A1_A12.5 2LH12.5 A2) را به همراه نمونههای متناظر آزمایشگاهی آنها نشان میدهد. در هر دو نرمافزار UDEC و RFPA ترک اولیه از بالای حفره بالایی شروع میشود و بهتدریج ترک بین دو حفره رشد میکند و در نهایت شکست نمونه رخ میدهد.

۳-۵- نمونههای با تخلخل ۱۸٬۷۵ درصد

شکل ۱۲، بیانگر نحوه شکست نمونه شبه سنگی (۵. 3LH18.75 و 3LH18.75 حاوی سه حفره بزرگ دایروی با تخلخل ۱۸٫۷۵ درصد است.. مطابق این شکل، در نرمافزار UDEC ترک اولیه از پایین حفره پایینی شروع می شود. در نرمافزار RFPA، ترک ها از سه حفره ایجاد می شوند، سپس

تركها گسترش مییابند و سرانجام شكست نمونه رخ میدهد.

۴- مقایسه بین نتایج مدلسازی عددی با آزمونهای آزمایشگاهی

در مدلسازی عددی نرمافزار UDEC با فیشنویسی، جابهجایی گرههای تماسی نمونه با دو فک بالایی و پایینی به دست آمده و سپس اختلاف جابهجایی دو فک بالا و پایین به عنوان کرنش قائم در نظر گرفته شد. همچنین با فیشنویسی، تنش قائم زونهای تماسی نمونه با فک اندازه گیری شد و در نهایت با تاریخچه تنش قائم و کرنش قائم، منحنی تنش-کرنش مطابق شکل ۱۳ رسم شد. فرمول آزمون برزیلی (رابطه ۶) صرفا برای مقدمهای به منظور توضیح آزمون برزیلی در مقاله اشاره شده است و این فرمول را میتوان برای نمونه بدون حفره (Solid) به کار برد.



شكل١١: مراحل شروع و گسترش ترك نمونه 2LH12.5A، الف) آزمايشگاهي [١٨،١٧]، ب) نرمافزار UDEC، ج) نرمافزار RFPA



شکل ۱۲: مراحل شروع و گسترش ترک نمونه 3LH18.75A، الف) آزمایشگاهی[۱۸،۱۷]، ب) نرمافزار UDEC، ج) نرمافزار RFPA



شکل ۱۳: منحنی تنش – کرنش نمونه های شبه سنگی حاصل از مدلسازی عددی با نرم افزار UDEC



شکل ۱۴: مقاومت کششی آزمایشگاهی و مدلسازی عددی با نرمافزار UDEC در برابر تخلخل

در شکل ۱۳، منحنی تنش – کرنش مدلهای عددی شبه سنگی با درصد تخلخل ۲۰، ۲۰، ۲، ۸، ۸، ۱۰، ۱۲،۵۹ و ۱۸،۷۵ ترسیم شده است. مطابق این نمودار، با افزایش تخلخل از صفر تا حدود ۶ درصد، مقاومت کششی نمونه حدود ۸۰ درصد کاهش مییابد. در این حالت رفتار نمونههای شبهسنگی و نحوه شکست آنها به صورت الاستیک خطی و ترد^{۲۰} است. همچنین با افزایش تخلخل تا حدود ۱۸،۷۵ درصد، کاهش مقاومت کششی بسیار قابل توجه است.

نتایج مقاومتهای کششی حاصل از نمونههای شبه سنگی آزمایشگاهی و مدلسازی عددی با نرمافزار UDEC، با در نظر گرفتن درصدهای تخلخل متفاوت، همراه با خطای نسبی در جدول ۳ آمده است. همان طور که ملاحظه می شود، مقاومتهای کششی حاصل از مدلسازی عددی با مقایسه نتایج متناظر آزمایشگاهی مطابقت قابل قبولی را از خود نشان می دهد.

همچنین بیشینه خطای نسبی کمتر از ۱۲٬۷۹ درصد است. همچنین در شکل ۱۴، منحنی مقاومت کششی در برابر درصد تخلخل را برای نتایج حاصل از آزمونهای آزمایشگاهی و مدلسازی عددی با استفاده از نرمافزار UDEC نشان داده شده است. بطوریکه در شکل ۱۴ ملاحظه می شود نحوه تغییر مقاومت کششی حاصل از مدلسازی عددی به صورت نمایی است.

با استفاده از شکل ۱۴، می توان مقدار مقاومت کششی را نسبت به افزایش تخلخل به صورت رابطه ۵ بیان و محاسبه کرد:

$$\sigma_t = \sigma_{t0} \exp(-0.2376 \times n) \tag{(a)}$$

که n تخلخل (درصد) مقاومت کششی با هر درصد تخلخل مورد نظر مر

مقاومت کششی نمونه با تخلخل صفر برحسب σ_{r0} مگاپاسکال

در رابطه ۵، ضریب پردازش (R²) برابر با ۰٬۹۷۴۴ است.

یکی از تواناییهای اصلی نرمافزار RFPA مدلسازی فرآیندهای آوایی در طول آزمایش برای نمونههای مدلسازی شده است، به گونهای که محل، تعداد و انرژی معادل برای هر رویداد را در طول بارگذاری با روند آسیب و تولید ریزترکها نشان میدهد که آسیب هر المان را با دایرههای قرمز، سفید و مشکی نشان میدهد. هر یک از دایرهها معرف رخدادهای آوایی و قطر آنها بیانگر مقدار انرژی آزاد شده است. همچنین در این نرمافزار، در طول فرآیند بارگذاری، پارامترهایی از قبیل کانت (AE) و انرژی را محاسبه می شود و نمودار تجمعی معادلشان را نشان میدهد. با توجه به شکل ۱۳، در نواحی الاستیک خطی، هیچ رخداد آوایی (کانت) ثبت نشده است و انرژی کرنشی الاستیک ذخیره شده آزاد نمی شود. با افزایش تعداد مراحل بار گذاری، رخدادهای آوایی ناشی از آزاد شدن انرژی افزایش یافته و ریزترکها تولید می شوند که نتیجه آن رفتار تغییر شکل ترد است. حداکثر رخدادها اندكى بعد از رسيدن به تنش اوج ايجاد مىشوند. مطابق شکل ۱۳ مقدار تنش آستانه مربوط به مراحل رشد و انتشار ترک برای نمونه با تخلخل صفر درصد (Solid) از بقیه نمونههای تخلخلدار بیشتر است. به دلیل اینکه نمونه با تخلخل صفر مقاومت بیشتری دارد و مقدار کانتهای تولیدی ناشی از ایجاد شکستگی بالا است. به طوریکه از شکل ۱۴ پیدا است، تغییرات کاهشی مقاومت کششی نسبت به افزایش درصد تخلخل به صورت غیرخطی و نمایی منفی است که نتیجه برازش شده آن در رابطه ۵ نشان داده شده است. شکل ۱۵، تعداد کانتها و انرژی تجمعی هر نمونه را برحسب مگاژول نشان مىدهد. طبق اين شكل، حداكثر کانتها در بیشینه انرژی آزاد شده رخ میدهد که در این گام زمانی، رشد ترک افزایش یافته و در نهایت نمونه به شکست مىرىىد.

ماکزیمم رخداد آوایی (کانت) و انرژی تولید شده حاصل از مدلسازی عددی با نرمافزار RFPA در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش تخلخل، کانت و انرژی آزاد شده بهصورت نمایی منفی کاهش مییابند.

رابطه بیشینه کانت و انرژی آزادشده را نسبت به افزایش تخلخل به صورت دو رابطه ۶ و ۷ نوشته می شود.

درصد خطای نسبی	مقاومت کششی آزمایشگاهی (MPa) [۱۸،۱۷]	مقاومت کششی مدلسازی عددی با نرمافزار UDEC(MPa)	درصد تخلخل
۰ ٫۳۶	$\Delta_{I}\Delta$	$\Delta_{I}\Delta \Upsilon$	•
		٣,٧۵	٢
		۱,۸۰۹	۴
۱۲٫۷۹	1,846	١,١٧٢	۶
		۰٫۸۳۱	٨
		۰,۷۱۲	١.
۲۰,۷۴	۰,۷۸۲	٠ ٬۶۹۸	۱۲٬۵
		٠,۴۸۲	18
۸۲٫۲۸	۰/۵۱۴	•,۴۵۶	۱۸٫۷۵

جدول ۳: مقایسه مقاومتهای کششی نمونههای شبه سنگی آزمایشگاهی و مدلسازی عددی

$$C_m = C_{m0} \exp(-0.3507 \times n) \tag{9}$$

 $E_m = E_{m0} \exp(-0.8115 \times n) \tag{(Y)}$

که در این دو رابطه: C_m ماکزیمم رخداد آوایی (کانت) E_m ماکزیمم کانت نمونه با تخلخل صفر (۳۷۰۱ = ۳۵۰) C_{m0} ماکزیمم کانت نمونه با تخلخل صفر (۳۷۹۷ = ۳۵۰) $E_{m0} = C_m \leq C_{m0}$ و برحسب مگاژول است. به عبارت دیگر $C_m \leq C_m$ و $E_m \leq E_m$



شکل ۱۵: کانت و انرژی تجمعی حاصل از مدلسازی عددی با نرمافزار RFPA



شکل ۱۶: الف) ماکزیمم کانت حاصل از مدلسازی با RFPA در برابر تخلخل، ب) ماکزیمم انرژی تولیدشده حاصل از مدلسازی با RFPA در برابر تخلخل

۵- نتیجهگیری

در این پژوهش، برای بررسی مکانیزم شکست نمونههای شبهسنگی حاوی تخلخلهای مختلف تحت آزمون برزیلی، مدلهای عددی با نرمافزار UDEC و RFPA به ترتیب بر مبنای روش عددی المان مجزا و اجزای محدود استفاده شد. ساختار مدلهای عددی بر اساس نتایج آزمونهای برزیلی از قبل انجام گرفته بر روی نمونههای شبهسنگی است. نتایج این تحقیق شامل موارد زیر است:

 ۸. مدلسازی عددی مطابقت قابل قبولی از لحاظ الگوی شکست و رشد ترک با نتایج آزمونهای آزمایشگاهی از قبل انجام گرفته دارد.
۲. نتایج مدلسازی عددی نشان داد که اندازه و موقعیت

قرارگیری حفره در نمونه شبه سنگی بر الگوی شکست و مقاومت کششی تاثیرگذار است. ۳. شکست کششی معمولا از بالا یا از پایین حفره شروع می شود و ترکها تا سطح تماس نمونه و فک، گسترش می یابند.

۴. با افزایش بارگذاری، ابتدا تغییر شکل الاستیک خطی اتفاق میافتد که در این مرحله انتشار میکروترکها رخ نمیدهد و رخداد آوایی و انرژی آزاد شده تقریبا برابر با صفر است.

۵. رخداد آوایی و انرژی آزاد شده فقط با انتشار میکرو ترک تغییر میکند. با انتشار میکرو ترک، آسیب افزایش یافته و آهنگ افزایش آن سریع است. در مرحله گسیختگی، آسیب به طور پیوسته افزایش مییابد و در نهایت نمونه گسیخته میشود.

۶. مقاومت کششی نمونه ها با استفاده از نرم افزار UDEC محاسبه و با مقاومت کششی حاصل از آزمون های آزمایشگاهی مقایسه شد که مطابقت قابل قبولی را نشان داد. همچنین رخداد آوایی و انرژی آزاد شده با نرم افزار RFPA محاسبه شد.

 ۲. با افزایش تخلخل، مقاومت کششی، ماکزیمم کانت و ماکزیمم انرژی تولید شده، به صورت نمایی منفی کاهش مییابند. (1999). "The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia". Engineering Geology, 54(3–4): 313–320.

- [12] Yu, F., Tham, L. G., and Lee, P. K. K. (2012). "Damage evolution of uniaxial compressed Hong Kong granite". 22(12): 2027.
- [13] Zhao, X. G., Cai, M., Wang, J., and Ma, L. K. (2013). "Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 64: 258-269.
- [14] Ji, M., Zhang, Y. D., Liu, W. P., and Cheng, L. (2014). "Damage evolution law based on acoustic emission and Weibull distribution of granite under uniaxial stress". Acta Geodynamica et Geromaterialia, 11(3): 269-278.
- [15] Li, H., Li, H., Gao, B., Jiang, D., and Feng, J. (2015). "Study of acoustic emission and mechanical characteristics of coal samples under different loading rates". Shock and Vibration, 2015: 1-11.
- [16] Jie, C., Junwei, Z., Song, R., Lin, L., and Liming, Y. (2015). "Determination of Damage Constitutive Behavior for Rock Salt Under Uniaxial Compression Condition with Acoustic Emission". Open Civil Engineering Journal, 9: 75-81.
- [17] James, A. N. (2009). "Tensile Strength and Failure Criterion of Analog Lithophysal Rock". George Washington University, Washington.
- [18] Lin, P., Wong, R. H. C., Tang, C. A. (2015). "Experimental study of coalescence mechanisms and failure under uniaxial compression of granite containing multiple holes". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 77: 313–327.
- [19] Itasca Consulting Group, (2014) UDEC- Universal Distinct Element Code, version 6.
- [20] Hu, J., and Xu, N. (2011). "Numerical analysis of failure mechanism of tunnel under different confining pressure". Procedia Engineering, 26: 107-112.
- [21] Tang, C. A., and Hudson, J. A. (2010). "Rock failure mechanisms: explained and illustrated". CRC press, 229-236.

^v Wing crack

 ۸. مدلسازی عددی به دلیل حل کرنش مسطحه، مقدار مقاومت کششی نمونههای شبهسنگی را کمتر از آزمونهای آزمایشگاهی نشان میدهد.

8- مراجع

- [1] Grosse, C. U., and Ohtsu, M. (Eds.). (2008). "Acoustic emission testing". Springer Science & Business Media.
- [2] Wong, R., Lin, P., and Tang, C. A. (2006). "Experimental and numerical study on splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression". Mechanics of Materials, 38(1): 142–159.
- [3] Baud, P., Wong, T., and Zhu, W. (2014). "Effects of porosity and crack density on the compressive strength of rocks". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 67: 202–211.
- [4] Oraee, K., Oraee, N., Goodarzi, A., and Khajehpour, P. (2016). "Effect of discontinuities characteristics on coal mine stability and sustainability: a rock fall prediction approach". International Journal of Mining Science and Technology, 26(1): 65–70.
- [5] Peng, S.S. (2015). "Topical areas of research needs in ground control – a state of the art review on coal mine ground control". International Journal of Mining Science and Technology, 25(1): 1–6.
- [6] Ke, C. C., Chen, C. S., and Tu, C. H. (2008). "Determination of fracture toughness of anisotropic rocks by boundary element method". Rock Mechanics and Rock Engineering, 41: 509–538.

[٧] حائری، ۵، ۱۳۹۰؛ "مدلسازی عددی ارتباط بین ترکهای میکرو با ترکهای ماکرو در مکانیسم شکست سنگ با استفاده از روش ناپیوستگی جابه جایی؛ پایان نامه دکتری". دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران.

- [8] Park, C. H., and Bobet, A. (2010). "Crack initiation, propagation and coalescence from frictional flaws in uniaxial compression". Engineering Fracture Mechanics, 77: 2727–2748.
- [9] Lee, H., and Jeon, S. (2011). "An experimental and numerical study of fracture coalescence in precracked specimens under uniaxial compression". International Journal of Solids and Structures, 48: 979-999.
- [10] Lin, P., Wong, R. H. C., and Tang, C.A. (2015). "Experimental study of coalescence mechanisms and failure under uniaxial compression of granite containing multiple holes". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 77: 313–327.
- [11] Al-Harthi, A. A., Al-Amri, R. M., and Shehata, W. M.

^r Secondary crack

- ^r Quasi-coplanar crack
- * Oblique crack
- [△] Park
- [°] Bobet
- $^{\scriptscriptstyle \rm Y}$ Lee and Jeon
- ^ Al-Harthi
- ۹ Yu
- ^{\.} Zhao
- ^{\\} Jie
- ۲۲ Li
- ۳ Tang
- ^{\f} Meso
- ¹⁶ Uniform distribution
- ¹⁹ Normal distribution
- Weibull distribution
- ^{\^} Acoustic Emission
- ¹⁹ Brittle