DAM AND TUNNEL CONFERENCE & EXPO همایش و نمایشگاه سد و تونل

ششمین همایش و نمایشگاه سد و تونل ایران

The 6th Dam and Tunnel Conference & Exhibition

16 - 17 February 2021 ۲۸-۲۹ بهمن‌ماه ۱۳۹۹

ابراهیم فرخ[۱]، حمید رخی[۲]، داوود لطفی[۳]

[۱]عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شرکت تونل‌ساز ماشین

[۲]کارشناسی ارشد مهندسی هوا فضا-سازه، کارشناس ارشد واحد تحقیق و توسعه شرکت تونل‌ساز ماشین

[۳]دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک-طراحی کاربردی، دانشگاه امام حسین (ع)، کارشناس ارشد واحد تحقیق و توسعه شرکت تونل‌ساز ماشین

چکیده

نیروهای اعمال شده به دیسک‌های برشی در نواحی مختلف کله‌حفار (ناحیه مرکزی، میانی، و محیطی) از جمله مهمترین پارامترهای طراحی ماشین‌های تونلزنی در زمین‌های سخت است. این نیروها شامل نیروی عمودی، نیروی چرخشی، و نیروی جانبی می‌شود که در تعیین پارامترهای هندسه برش (فاصله داری و نرخ نفوذ) ابزار حفاری به کار گرفته می‌شوند. مدل‌های موجود برای برآورد این نیروها بر پایه نتایج آزمایش‌های برش خطی توسعه یافته‌اند. این در حالی است که در واقع برش انجام شده با یک دیسک برشی به صورت دورانی انجام می شود که نتایج متفاوتی را نسبت به برش خطی به همراه دارد. برای رفع این نقیصه، در این تحقیق نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای حالت برش دورانی با استفاده از نرم افزار LS-DYNA ارائه شده است. هدف اصلی در این تحقیق، توسعه یک مدل جدید برآورد نیروهای اعمال شده به دیسک در حالت برش دورانی برای در نظر گرفتن مشخصات مرتبط با موقعیت شعاعی، سطح تماس، و نیروهای جانبی اعمال شده به دیسک‌ها است. بر اساس تحلیل رگرسیون ساده نتایج شبیه‌سازی‌ها، افزایش مقاومت تک محوری سنگ، سطح تماس و فاصله داری دیسک‌ها، باعث افزایش نیروهای اعمال شده به دیسک برشی می‌شود. با این حال، افزایش موقعیت شعاعی دیسک‌ها باعث کاهش نیروهای جانبی و چرخشی اعمال شده به آنها می‌شود. این کاهش نیروها به دلیل کاهش انحنای مسیر برش در موقعیت‌های شعاعی دورتر از مرکز کله‌حفار می‌باشد. بر اساس این نتایج و با به کارگیری تحلیل رگرسیون چند جمله‌ای، مدلی برای برآورد نیروهای عمودی، چرخشی، و جانبی با ضریب تعیین ۸۰ تا ۹۰ درصد ارائه شده است.

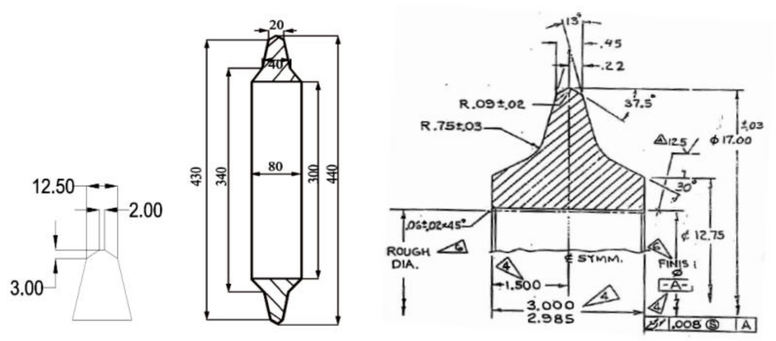
۱- کلیات مدلسازی

۱-۱- خصوصیات سنگ

در شبیه سازی‌های آزمایش برش خطی برای یکسان بودن شرایط شبیه سازی‌ها با آزمایش برشی خطی انجام شده بر روی سنگ گرانیت قرمز کلرادو، مقاومت تک محوری سنگ برابر با ۱۵۸ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش‌های برش خطی انجام شده بر روی این نوع سنگ توسط گرش و همکاران (۲۰۰۶) ارائه شده است و برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در شرایط مشابه مورد استفاده قرار گرفته است.

۱-۲- خصوصیات دیسک‌ها

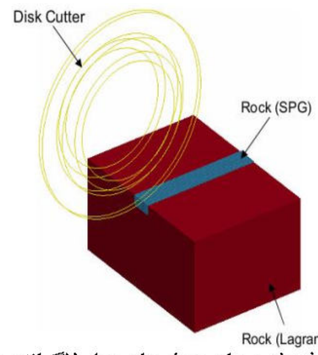
در شبیه سازیهای انجام شده از سه نوع دیسک استفاده شده است که خصوصیات هندسی آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: نیمرخ عرضی دیسک‌های مورد استفاده در شبیه‌سازیهای مختلف (ابعاد نشان داده شده بر حسب میلی‌متر هستند)

۱-۳- روش حل

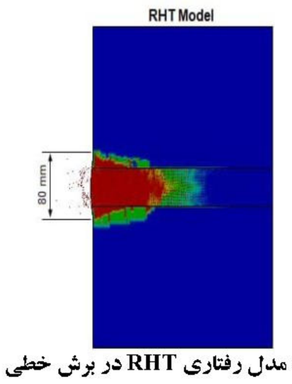
شیوه های المان محدود مختلفی برای مدلسازی پدیده های دینامیکی در نرم افزار LS-DYNA موجود است که از آن جمله می توان به روش لاگرانژ، SPH وSPG اشاره کرد. به علت آنکه فرآیند برش سنگ با سرعت پایین انجام می شود (سرعت خطی دیسک در آزمایش برش خطی ، ۳۳/۰ متر بر ثانیه است)، استفاده از روش حل SPH، زمان تحلیل عددی را به شدت افزایش خواهد داد (در حد چندین روز). از این رو بهترین گزینه برای شبیه سازی این پدیده، استفاده از روش حل SPG است. لازم به ذکر است برای کاهش زمان حل شبیه‌سازی، روش حل لاگرانژی به عنوان روش حل اصلی برای توده سنگ مورد آزمایش در نظر گرفته شده است و روش حل SPG تنها برای محدوده تحت تاثیر دیسک برشی مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲: نواحی مختلف در نظر گرفته شده برای روش‌های حل لاگرانژی و SPG در شبیه سازی عددی

۱-۴- مدل رفتاری

مدل رفتاری RHT برای بررسی اثر فاصله داری دیسک‌ها بر نیروهای اعمال شده به آنها مورد استفاده قرار گرفت که نتایج اعتبارسنجی مناسبی در مقایسه با نتایج واقعی برش خطی بر روی سنگ گرانیت قرمز کلرادو به همراه داشت.



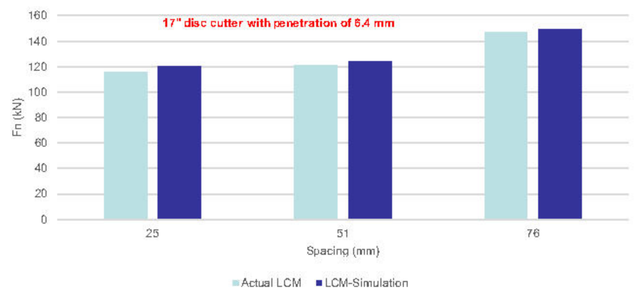
شکل ۳: محدوده زون شکست با مدل رفتاری RHT در برش خطی سنگ با فاصله داری ۷۶ میلی‌متر

۲- اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی برای برش خطی

برای اعتبار سنجی نتایج شبیه سازیها، تعداد ۷ شبیه سازی در حالت برش خطی انجام شد. خصوصیات شبیه‌سازی‌های انجام شده به صورت زیر می باشد:

- مدل رفتاری سنگ : مدل RHT
- مقاومت سنگ : ۱۵۸ مگاپاسکال
- قطر دیسک : ۱۷ اینچ
- سرعت چرخشی دیسک : ۱/۵رادیان بر ثانیه
- سرعت برش خطی دیسک : ۳۳/۰ متر بر ثانیه
- فاصله داری : ۲۵، ۵۱، ۷۶ میلی‌متر

شکل ۴ نتایج مقایسه‌ای بین نیروهای عمودی اعمال شده به دیسک ۱۷ اینچی در سنگ گرانیت قرمز کلرادو را برای فاصله داری‌های مختلف و مقدار نفوذ ۶/۴ میلی‌متر برای دو حالت برش خطی واقعی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می شود تطابق خوبی بین نتایج شبیه سازی‌ها و نتایج آزمایش‌های برش خطی واقعی وجود دارد.



شکل ۴: مقایسه نتایج برش خطی انجام شده توسط گرش و همکاران (۲۰۰۶) و نتایج شبیه سازی‌ها

۳- طرح شبیه‌سازی برای برش دورانی

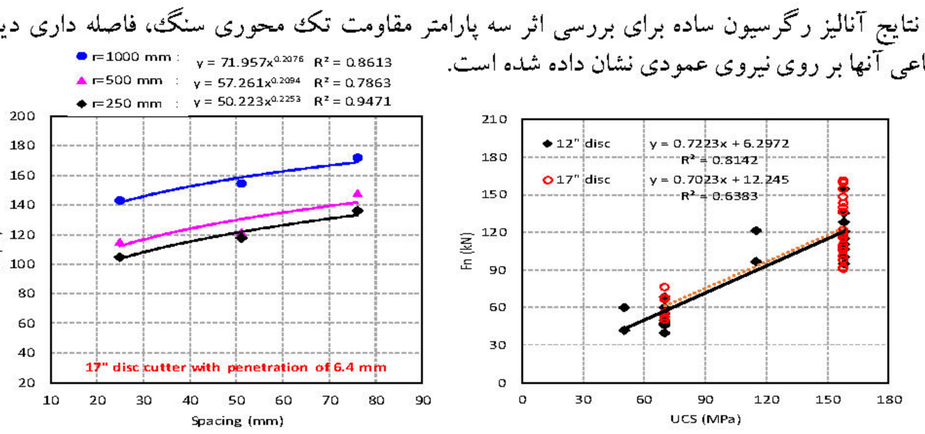
در طرح شبیه سازی برای برش دورانی، مهم‌ترین پارامترهای موثر بر نیروهای اعمال شده به دیسک‌های برشی در نظر گرفته شد. این پارامترها و دامنه تغییرات در نظر گرفته شده برای آنها به صورت زیر می باشد:

- مقاومت تک محوری سنگ : ۵۰، ۷۰، ۱۱۵، ۱۵۸ مگاپاسکال
- شعاع قرارگیری دیسک بر روی کله حفار : ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ میلی‌متر
- قطر دیسک : ۱۷ و ۱۲ اینچ
- عرض لبه دیسک : ۵/۱۲ و ۲۰ میلی‌متر
- مقدار نفوذ دیسک : ۴، ۱/۵، ۴/۶، ۸، ۱۲ میلی‌متر
- فاصله‌داری دیسک‌ها : ۲۵، ۵۱، ۷۶ میلی‌متر

بر این اساس ۴۴ شبیه سازی برش دورانی انجام شد و نیروهای اعمال شده به لبه دیسک‌ها در حالات مختلف مورد بررسی، استخراج شد.

۴- آنالیز رگرسیون ساده برای بررسی نتایج شبیه سازی‌های برش دورانی

در شکل ۵ نتایج آنالیز رگرسیون ساده برای بررسی اثر سه پارامتر مقاومت تک محوری سنگ، فاصله داری دیسک‌ها و موقعیت شعاعی آنها بر روی نیروی عمودی نشان داده شده است.



شکل ۵: رابطه بین مقاومت تک محوری سنگ، فاصله داری دیسک‌ها، موقعیت شعاعی، و نیروی عمودی

۵- تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه

هدف اصلی از این مطالعه، ایجاد یک مدل جدید برای پیش بینی نیروهای اعمال شده به دیسک برشی در حالت شبیه‌سازی برش دورانی با در نظر گرفتن اثر توامان مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر نیروها است. از این رو در این قسمت نتایج آنالیز رگرسیون چندگانه برای بررسی اثر ترکیبی پارامترهای موثر بر روی نیروی عمودی (Fn)، نیروی چرخشی (Fr)، و نیروی جانبی (Fs) ارائه می شود.

جدول ۱: نتایج آنالیزهای رگرسیون چندگانه

شماره مدل	مدل	ضریب تعیین R^2 (٪)
۱	$F_n = 0{,}0699\ \mathrm{UCS}^{0.8916} A_{con}^{0.3332} S^{0.2356}(1-\exp(-0{,}00872\ r))^{2.087}$	۹۳
۲	$k_r = \frac{F_r}{F_n} = \frac{20{,}7594}{UCS^{0.4765}\ r^{0.3882}}$	۸۲
۳	$k_s = \frac{F_s}{F_n} = \frac{331{,}6234}{\mathrm{UCS}^{0.5112}\ r^{0.8771}}$	۹۳

۶- جمع‌بندی

- بر اساس نتایج ۴۴ شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده با نرم افزار LS-DYNA برای برش دورانی، نیروهای عمودی با افزایش موقعیت شعاعی دیسک افزایش می‌یابند و نیروهای چرخشی و جانبی با افزایش موقعیت شعاعی دیسک کاهش می‌یابند.
- با استفاده از روش رگرسیون چند جمله‌ای و با در نظر گرفتن چهار پارامتر مقاومت تک محوری سنگ، سطح تماس دیسک، فاصله داری دیسک‌ها، و موقعیت شعاعی آنها، مدلی برای برآورد این نیروها ارائه شده است.