

تحلیل عددی نیروهای وارد بر تیغه دیسکی در فرآیند برش خطی سنگ با استفاده از روش المان محدود

رضا محمدی^{۱*}، فرهاد صمیمی نمین^۲، جعفر خادمی حمیدی^۳

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان

۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت: مرداد ۱۳۹۶، پذیرش: مهر ۱۳۹۸)

چکیده

از مهم‌ترین نتایج فرآیند برش خطی سنگ، برآورد دقیق و واقعی نیروهای برش وارد بر تیغه دیسکی است که می‌تواند مقدمه‌ای برای توسعه مدل‌هایی جهت پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفر تمام مقطع تونل (TBM) باشد. در این مطالعه، مدل‌سازی عددی فرآیند برش سنگ با تیغه دیسکی با استفاده از کد تجاری المان محدود ABAQUS انجام شده است. برای راستی آزمایی مدل، از نتایج آزمایشگاهی آزمون برش خطی (LCM) محققان پیشین استفاده شده است. پس از حل مدل پیشنهادی، نیروهای وارد بر دیسک در سه راستا از مدل برش نتیجه شد و میانگین هر کدام با استفاده از کدی که در محیط نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شد، محاسبه شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی خطای ۱۱/۱ درصد برای میانگین نیروی نرمال، ۵/۶ درصد برای میانگین نیروی غلتشی، و ۱۰ درصد برای میانگین نیروی جانبی را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایش برش خطی، می‌توان نتیجه گرفت که مطابقت بسیار خوبی میان آنها برقرار است.

کلمات کلیدی

حفر مکانیکی، ماشین حفر تونل، نرم‌افزار ABAQUS، آزمون برش خطی

*عهده‌دار مکاتبات: rezam808m@yahoo.co.uk

۱- مقدمه

حفاری مکانیزه و یا حفر مکانیکی به هر روشی اطلاق می‌شود که در آن از یک ابزار مکانیکی برای جدا کردن سنگ یا خاک از موقعیت آن استفاده می‌شود. امروزه حفاری مکانیکی، جنبه رایجی از ساخت‌وسازهای زیرزمینی از جمله احداث تونل‌ها، چاه‌ها و استخراج مکانیزه منابع زیرزمینی را در بر گرفته است.

از مهم‌ترین مسائل موجود برای کاربرد موفقیت‌آمیز ماشین‌های حفر مکانیزه، بهینه‌سازی طراحی و برآورد دقیق عملکرد آنها بوده است. بهینه‌سازی طراحی به معنای رعایت ملزومات مورد مطالعه ماشین برای مواجهه با شرایط پیچیده زمین و طراحی اجزاء آن (مثل کله حفاری) به منظور کسب عملکرد بهینه است که در نهایت نرخ تولید قابل‌دستیابی را ممکن می‌سازد، به نحوی که هزینه و اقتصاد پروژه را نیز در نظر می‌گیرد. علی‌رغم توانایی‌های موجود برای برآورد دقیق‌تر عملکرد این ماشین‌ها، کماکان نیازمند بهبودهایی خواهد بود.

محققان زیادی بر روی مسئله برش سنگ با تیغه دیسکی طی چهار دهه اخیر پژوهش کردند. تمرکز پژوهش از فرو روی^۱ یک برش‌دهنده دیسکی در سنگ برای برآورد شکنندگی سنگ تا برآورد نیروهای برش در فرآیند برش سنگ با خصوصیات مشخص مکانیکی بوده است. اخیراً پیشرفت‌هایی در زمینه شبیه‌سازی فرآیند برش سنگ با مدل‌های عددی مانند روش المان محدود و روش المان مجزا انجام گرفته است [۱]. کاربرد روش‌های عددی بر اساس محیط پیوسته برای حل این مسئله موفقیت قابل توجهی را کسب نکرده است، چرا که از هم پاشیدگی قطعات سنگی در این روش، زیر سؤال می‌رود. این ضعف با پیشرفت‌هایی که اخیراً در روش المان محدود حاصل شده است، جبران شده است به نحوی که قابلیت شبیه‌سازی شکست در سنگ از طریق حذف المان‌هایی که به آستانه شکست کششی خود می‌رسد، انجام می‌پذیرد [۲].

بیلگین^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۰ کد تجاری المان محدود *France2D/L* که بر مبنای الاستیک خطی است برای بررسی تأثیر تنش‌های جانبی بر عملکرد برش دو ماده (پلاستر و بتن) با برش‌دهنده‌های نوک قلمی بررسی کردند [۳]. کو^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۰ با استفاده از کد

ساده المان محدود *RFPA*، فرآیند شکست در برش سنگ را شبیه‌سازی کردند [۴]. لیو^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۲ با استفاده از کد اندرکنش ابزار و سنگ با نام تجاری *R-T^{2D}*، فرآیند برش سنگ تحت شرایط فروروی منفرد و دوتایی بررسی کردند. با این روش، گسترش ترک‌ها به صورت دینامیکی مدل شد [۵]. بایک و مون^۵ در سال ۲۰۰۳ و پارک^۶ و همکاران در سال ۲۰۰۶، مدل همگنی را با استفاده از روش عددی تفاضل محدود با *FLAC2D* ساختند و تأثیر فشار جانبی و فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها را بر سازوکار تشکیل تراشه در سنگ بررسی کردند [۶]. گانگ^۷ و همکاران در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ اثر فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها را بر فرآیند برش سنگ با استفاده از روش عددی دوبعدی المان مجزا با نرم‌افزار *UDEC*، بررسی کردند [۷]. بجاری و خادمی حمیدی^۸ این پژوهش را دنبال کردند و در سال ۲۰۰۹ تأثیر هم‌زمان جهت‌داری و فاصله‌داری را بر کارایی برش سنگ بررسی کردند [۸]. چو^۹ و همکاران در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳، فرآیند شکست سنگ را با استفاده از کد صریح المان محدود، *AUTODYN-3D* بررسی کردند که در آن مطالعه، حجم ناحیه برش خورده سنگ بر اساس معیار سایش^{۱۰} در کد شبیه‌سازی (معادل المان‌هایی از سنگ که به آستانه شکست کششی می‌رسند) از مدل حذف می‌شود [۹]. مون و او^{۱۱} در سال ۲۰۱۲ و چویی و لی^{۱۲} (۲۰۱۴) مطالعه دوبعدی و سه‌بعدی از فرآیند برش سنگ را با استفاده از مدل المان مجزا بر اساس *PFC* انجام دادند [۱۰، ۱۱]. منزس^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۴) فرآیند خردایش سنگ حین برش مکانیکی را با کد صریح المان محدود، *LS-DYNA*، بررسی کردند و در واقع جدایش سنگ خرد شده از سنگ پایه در فرآیند برش سنگ را پیش‌بینی کردند [۱۲]. لی و همکاران (۲۰۱۶) روش المان مجزا (*DEM*) را برای شبیه‌سازی فرآیند فروروی ماشین‌های حفر تونل (*TBM*) به کار بردند و نتیجه گرفتند که تنش‌های کششی از فرآیند تولید تراشه تشکیل می‌شوند و ترک‌های برشی با نیروی خردایش القاء می‌شوند [۱۳]. ژیا^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۷) مدل‌سازی عددی فرآیند برش سنگ را با روش المان محدود بر پایه هیدرودینامیک ذرات هموار (*SPH*) انجام دادند و توانستند به خوبی رشد ریزترک‌های مجاورت لبه برنده برش‌دهنده و پرتاب ذره‌های ناحیه حین برش را مدل‌سازی کنند [۱۴]. ژائو^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۷) بررسی عددی

تعیین نیروهای وارد بر تیغه دیسکی در کد المان محدود *ABAQUS* شبیه‌سازی می‌شود.

۲- مدل‌سازی فرآیند برش خطی

۲-۱- معادله حالت

پاسخ هیدرودینامیکی ماده با معادله حالت تعریف می‌شود، که مدول حجمی و نرخ فشار به چگالی را تعیین می‌کند. هنگامی که یک جسم سخت به ماده برخورد می‌کند، توزیع فشار پیچیده‌ای حول ناحیه برخورد شکل می‌گیرد که تغییر شکل جزئی در آن ناحیه به وقوع می‌پیوندد. این فشار با رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$p = k \left[\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right] \quad (1)$$

به طوری که p فشار، k مدول حجمی و $\frac{\rho}{\rho_0}$ نسبت چگالی ماده بعد از برخورد به مقدار آن در حالت اولیه در نظر گرفته می‌شود. معادله حالت خطی مای-گرنش^{۱۶} که حالت خطی میان سرعت برخورد و سرعت ذرات بیان می‌کند به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود [۱۶]:

$$U_s = c_0 + sU_p \quad (2)$$

که در آن، c_0 ، سرعت صوت در ماده و s ثابت ماده در نظر گرفته می‌شود. شکل نهایی رابطه فشار به چگالی معادل رابطه (۳) تعریف می‌شود [۱۷]:

$$p = \frac{\rho_0 c_0 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (3)$$

به قسمی که در آن $\eta = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ ، کرنش جزئی حجمی فشاری، Γ_0 ، و s ثابت ماده و E_m انرژی داخلی بر واحد جرم ماده است. همچنین $\rho_0 c_0$ ، برابر با مدول بالک در کرنش‌های بسیار جزئی در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین معادله حالت خطی ماده در *ABAQUS*، تنها چهار پارامتر ρ_0 ، c_0 ، Γ_0 و s نیاز به تعیین دارند. پس از بررسی مسائل مختلف برخورد مرتبط با سنگ، پارامترهای فوق چنین در نظر گرفته شده است [۱۸]: $s = 0$ و $\Gamma_0 = 0$. مقادیر c_0 ، با توجه به معلوم بودن مقادیر ρ_0 و مدول بالک تعیین خواهد شد.

خردایش سنگ نسبت به سطح آزاد قطعه‌سنگ در فرآیند برش خطی با یک تیغه دیسکی انجام دادند. آنها از مدل ترکیبی با مدل تشکیل ترک کششی نرم شونده *JH-2 Rankine* برای تعیین خصوصیات مدل ساختاری سنگ در شبیه‌سازی فرآیند شکست دینامیکی سنگ استفاده کردند. با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، نتیجه گرفتند که نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی به خوبی با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی انجام گرفته مطابقت دارد [۱۵].

مسئله برآورد نیروی وارد بر دیسک در فرآیند برش خطی سنگ یکی از موضوع‌های جذاب و در عین حال پیچیده و غیرخطی است. بسیاری از محققان با ساده‌سازی و معادل‌سازی فشار زیر دیسک به عنوان مثال با مقاومت فشاری سنگ به تخمین نیروهای برش از حاصل ضرب فشار در سطح تماس دیسک-سنگ پرداختند. نکته قابل توجه در مطالعات اخیر، مدل‌سازی دوبعدی فرآیند شکست و فرو روی است که بعضاً ماهیت سه‌بعدی آن در نظر گرفته نشده است. همچنین در مطالعات پیشین، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی ندرتاً با درصد خطای پایین نسبت به نتایج آزمون آزمایشگاهی همراه بوده است. علیرغم مطالعات انجام گرفته در زمینه شبیه‌سازی عددی فرآیند برش خطی سنگ، هنوز هم مسایل مهمی از جمله شرایط شبه‌دینامیکی حاکم بر مسأله در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است که به نوعی در مقادیر نیروهای برش تأثیرگذار خواهد بود. در موضوع اندرکنش تیغه-سنگ و نیز رفتار ناحیه زیر دیسک هنوز هم سؤال‌های بی‌پاسخ زیادی از جمله در خصوص نحوه توزیع فشار، شکل‌گیری و انتشار ترک‌ها در ناحیه تماس و مقدار نیروی نرمال بحرانی برای تشکیل تراشه حفاری وجود دارد.

با توجه به پیچیدگی‌های مسئله و عدم امکان بررسی تمامی مجهول‌ها و نیز پدیده‌شناسی مسئله در روش‌های آزمایشگاهی، هزینه‌های بالای انجام و نیز در دسترس نبودن تجهیزات آزمایشگاهی این آزمون، شبیه‌سازی عددی فرآیند برش سنگ شرایط مناسبی برای شناخت مسئله و بررسی پارامترهای تأثیرگذار فراهم می‌سازد. در این مطالعه، مدل شکست دراکر-پراگر برای رفتار غیرخطی مدل ساختاری سنگ تا نقطه تسلیم و مدل آسیب شکل‌پذیر برای شبیه‌سازی مکانیزم شکست و حذف المان‌های خراشیده شده سطح سنگ، آزمون برش خطی سنگ برای

۲-۲- معیار آسیب شکل‌پذیر^{۱۷}

معیار آسیب شکل‌پذیر، مدلی برای پیش‌بینی شروع آسیب مربوط به حفره‌ها، رشد و شکل‌گیری آنها در فلزات است [۱۸]. این مدل کرنش پلاستیک معادل، η ، در شروع آسیب را تابعی از نسبت تنش سه محوره در نظر می‌گیرد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، σ_H تنش هیدروستاتیک و σ_{eq} تنش معادل ون میسر^{۱۸} است. معیار آسیب شکل‌پذیر تا ارضاء شرط زیر ادامه می‌یابد:

$$D = \int_0^{\varepsilon_{eq}^{**}} \frac{d\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_{eq}^{**}(\eta)} = 1 \quad (۵)$$

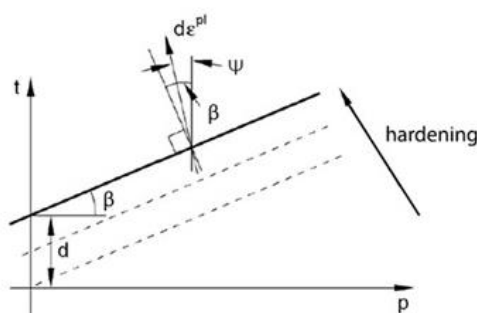
که در آن ε_{eq}^{**} کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب، و D فاکتور آسیب است که از صفر (ماده بکر) تا یک (شکست کامل) تغییر نموده و در گام حل، تغییرات مثبت آن از رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$\Delta D = \frac{\Delta \varepsilon_{eq}}{\varepsilon_{eq}^{**}(\eta)} \geq 0 \quad (۶)$$

۳-۲- مدل پلاستیک دراکر-پراگر^{۱۹}

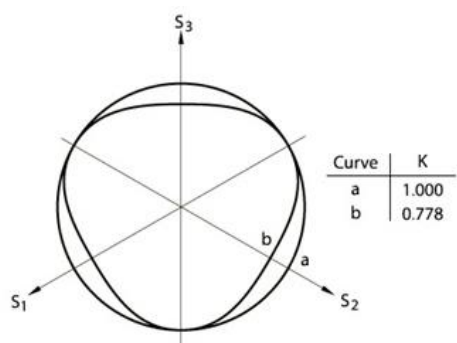
سطح شکست دراکر-پراگر طبق رابطه (۷) تعیین می‌شود (شکل ۱):

$$F_s = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (۷)$$



شکل ۱: نمایش صفحه گسیختگی در معیار دراکر-پراگر در صفحه $p-t$ [۱۸]

که در آن β زاویه اصطکاک داخلی، d چسبندگی در خاک، p تنش متوسط به صورت $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ تنش انحرافی که با معادله



شکل ۲: نمایش سطح گسیختگی در صفحه تنش‌های سه‌محوره (صفحه n) [۱۸]

برای حفظ تحدب شکل تسلیم، مقدار این پارامتر نمی‌تواند کوچک‌تر از 0.778 اختیار شود. در مدلسازی کرنش مسطح مقدار این پارامتر برابر یک در نظر گرفته می‌شود. اما در مدلسازی دوبعدی با فرض تقارن محوری و مدلسازی سه‌بعدی مقدار این پارامتر از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$k = \frac{3 - \sin \varphi}{3 + \sin \varphi} \quad (۸)$$

برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک در مدل رفتاری دراکر-پراگر در شرایط تنش سه‌محوری می‌توان مطابق رابطه‌های (۸) و (۹) از تبدیل پارامترهای مقاومت برشی مدل مور-کولمب استفاده نمود. در نرم‌افزار آباکوس مقادیر β و d ملاک عمل است که از طریق روابط ذکر شده قابل محاسبه است.

$$\tan \beta = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (۹)$$

$$d = \frac{18 c \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (۱۰)$$

دانه‌های سنگی را شبیه‌سازی کند و به قدری کوچک است که دقت کافی را در محاسبه حجم حذف شده حین شبیه‌سازی عددی، فراهم می‌کند.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی سنگ آهک ایندیانا [۲۳، ۲۲]

مقدار	مشخصات
۳۲/۵	مدول الاستیسته (GPa)
۰/۱۴	ضریب پواسون
۷۰	مقاومت فشاری تک‌محوری (Mpa)
۴/۹	مقاومت کششی (Mpa)
۲۳۰۰	چگالی (kg/m ³)
۰/۸۵	چقرمگی شکست (Mpa.m ^{0.5})
۶۳/۹۴	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)

مدل سنگی به صورت همگن لحاظ شده است و خصوصیات مقاومتی آن منطبق با مقادیر جدول ۲ به نرم‌افزار وارد شده است. برای شبیه‌سازی اثر ضربه دیسک به سنگ حین برش، از معادله حالت خطی استفاده شده است. مدول الاستیسته و مدول برشی بر اساس قوانین الاستیک هوک^{۲۱} محاسبه شده است و برای رفتار الاستوپلاستیک مدل سنگی از معیار خطی دراکر-پراگر استفاده شده است [۹]. با در نظر گرفتن قانون همبسته جریان پلاستیک^{۲۲}، زاویه اصطکاک داخلی معادل معیار دراکر-پراگر، همسان با زاویه اتساع برای ماده سنگ در نظر گرفته شده است. با قرار دادن نسبت تنش جریان برابر با یک، مدلسازی کرنش مسطح لحاظ شده است. عامل فشار در بردارنده شروع آسیب و گسترش آسیب است. برای شبیه‌سازی شروع آسیب، در معیار آسیب شکل‌پذیر از آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری و مقادیر کرنش الاستیک هنگامی که منحنی تنش-کرنش در محدوده پلاستیک قرار می‌گیرد، استفاده شده است. تنش شکست با σ_t در نظر گرفته شده است و با فرض آنکه مدول الاستیک برای هر دو حالت کشش و فشارش همسان است، کرنش شکست کششی با σ_t/E تعیین شده است. برای پیاده‌سازی گسترش آسیب^{۲۳}، انرژی شکست به عنوان پارامتر ورودی مدل آسیب در نرم‌افزار وارد گردیده است. چون محققان قبلی همانند لیو در سال ۲۰۰۲ و سانویو در سال ۱۹۸۵، چنین گزارش کردند که سازوکار تشکیل تراشه اساساً با شکست کششی مرتبط است [۹]، تنها حالت اول چقرمگی شکست K_{IC} در محاسبات انرژی شکست وارد شده است.

همچنین در صورتی که شرایط کرنش مسطح حاکم باشد برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک در مدل رفتاری دراکر-پراگر بر اساس پارامترهای مشابه در مدل رفتاری موهر کولمب می‌توان از روابط زیر استفاده کرد.

$$\tan\beta = \frac{3\sqrt{3}\tan\varphi}{\sqrt{9 + 12\tan^2\varphi}} \quad (11)$$

$$d = \frac{3\sqrt{3}c}{\sqrt{9 + 12\tan^2\varphi}} \quad (12)$$

در رابطه‌های (۸) تا (۱۲)، c و φ به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک در مدل مور کولمب است [۱۸].

۲-۴- مدل سنگ

سنگ آهک ایندیانا^{۲۰} یکی از نمونه‌های سنگ شناخته شده است که در مسایل مختلف مهندسی سنگ در آمریکای شمالی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. همچنین، این نمونه سنگ در تحقیق رستمی (۱۹۹۷) برای توسعه مدل *CSM* و در بررسی نیروهای وارد بر دیسک در آزمایش برش خطی استفاده شده است [۲۱]. در تحقیق حاضر، این نمونه سنگ مبنای صحت‌سنجی مدل برش سنگ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که تعیین پارامترهای ورودی مدلسازی عددی بدون انجام آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ و استفاده از داده‌های تحقیق‌های پیشین، شرایط یکسانی را نسبت به آزمایش برش خطی انجام شده توسط رستمی فراهم نمی‌آورد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که نتایج مدل عددی ارائه شده در این تحقیق، در مقایسه با نتایج آزمون آزمایشگاهی با درصد خطای قابل‌ملاحظه‌ای همراه باشد. خصوصیات فیزیکی این نمونه سنگی بارها اندازه‌گیری شده است و برش‌پذیری آن در طی سال‌های گذشته در چند آزمایشگاه برش سنگ بررسی شده است. مشخصات مقاومتی سنگ آهک ایندیانا در جدول ۱ آورده شده است [۲۳، ۲۲].

مدل قطعه سنگ آهک ایندیانا با اندازه $50 \times 200 \times 200$ میلی‌متر به منظور کاهش محاسبات حل مدل در نظر گرفته شده است و از المان‌های آجری *C3D8R* با اندازه $2/5 \times 4 \times 4$ میلی‌متر، پیش‌فرض پیش‌پردازنده کد تجاری *ABAQUS/CAE* مش‌بندی شده است. هر المان مدل، مکعبی با حجم واحد 40 mm^3 است که به خوبی می‌تواند

شبه‌سازی جرم برش خورده از سنگ به واسطه حذف المان از مدل سنگ در شبه‌سازی انجام خواهد شد و با قرار دادن گزینه حذف المان^{۲۴} در نرم‌افزار به صورت Yes، از صحت نتیجه آن اطمینان حاصل خواهد شد.

جدول ۲: مقادیر ورودی به نرم‌افزار

گروه	مدل	پارامتر	مقدار ورودی
معادله حالت	خطی	مدول حجمی	$B = \frac{E}{3(1-2\nu)}$
مقاومت	دراکر-پراگر	قانون جریان	Associative
		زاویه اتساع	$\psi = \beta = \arctg\left(\frac{\sqrt{3} \sin\phi}{1 + \frac{1}{3}\sin^2\phi}\right)$
شکست	شروع آسیب	نسبت تنش جریان	$K = 1$
		کرنش تسلیم	$\varepsilon = \frac{\sigma_t}{E}$
	گسترش آسیب	انرژی شکست	$G_f = \frac{k_f^2}{E}$
	سایش	حذف المان	Yes

با توجه به خمیدگی اطراف مدل برش‌دهنده دیسکی، از المان‌های آجری نوع C3D8R با میانگین اندازه ضلع ۹ میلی‌متر استفاده شده است. خصوصیات مکانیکی برای این تیغه دیسکی، فولاد نوع AISI-4340 در نظر گرفته شده است و در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات فولاد AISI-4340 [۲۱]

مقدار	مشخصات
۲۰۰	مدول الاستیسته (GPa)
۰/۲۹	ضریب پواسون
۷۷۸۰	چگالی (kg/m^3)

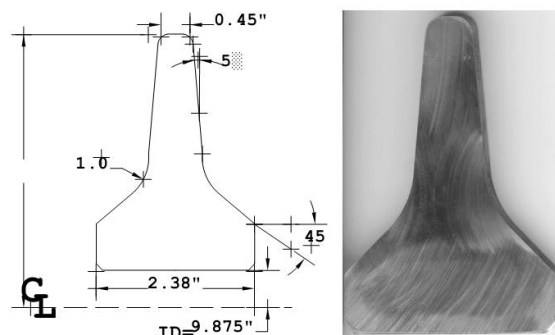
چون مطالعه حاضر به سازوکار خردشدگی سنگ بیش‌تر از ماندگاری نوک تیغه می‌پردازد، سایش برش‌دهنده‌های دیسکی در این مدل لحاظ نمی‌شود و بنابراین مدل تسلیم و شکست برای فولاد در خصوصیات مکانیکی آن در نظر گرفته نشده است [۲۱].

۲-۶- شرایط مرزی مدل

مدلسازی برش سنگ و اعمال شرایط مرزی مطابق با شرایط واقعی آزمون برش خطی تمام مقیاس انجام گرفته است. مدل دیسک ساخته شده در راستای محور γ ، با عمق نفوذ ۵ میلی‌متر تنظیم شده است و مدل سنگ نیز با تنظیم راستای یکی از اضلاع آن با اندازه ۲۰۰ میلی‌متر در راستای محور γ ، شرایط اولیه حاکم در آزمون آزمایشگاهی

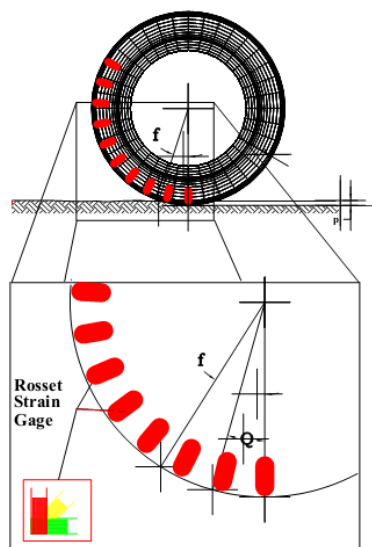
۲-۵- مدل تیغه دیسکی

تیغه در نظر گرفته شده در این مدلسازی، یک دیسک مقطع ثابت با قطر ۴۳۱ میلی‌متر (۱۷ اینچ) ساخته شرکت رایبیز^{۲۵} واشنگتن است. نوع برش‌دهنده B-۴۹۲۲۵ است که به برش‌دهنده ساینده^{۲۶} معروف است. این برش‌دهنده به واسطه گردن شدگی بلند و عرض لبه بزرگ خود برای حصول حد بالای عملکرد برش شناسایی می‌شود. شکل ۳ مقطع عرضی این تیغه را نشان می‌دهد [۲۱]. به دلیل مقطع تیز این نوع دیسک، قابلیت دسترسی به مقادیر بالای نفوذ در سنگ را به ازای یک نیروی عمودی خاص دارد. ضخامت لبه رینگ حدوداً ۱۱/۵ میلی‌متر (۰/۴۵ اینچ) است که با زاویه ۵ درجه از لبه به سمت تویی به تدریج این ضخامت افزایش می‌یابد (شکل ۳).

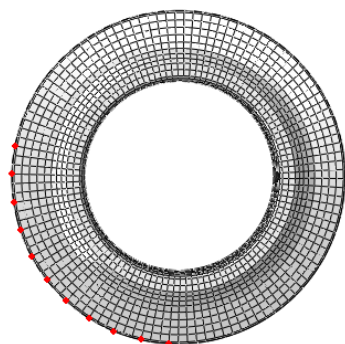


شکل ۳: نمایش مقطعی از برش‌دهنده دیسکی ۱۷ اینچ نوع B-۴۹۲۲۵ انتخابی از شرکت رایبیز [۲۱]

در مدلسازی اندرکنش برش‌دهنده و سنگ راه‌گشا باشد [۱۸].



الف



ب

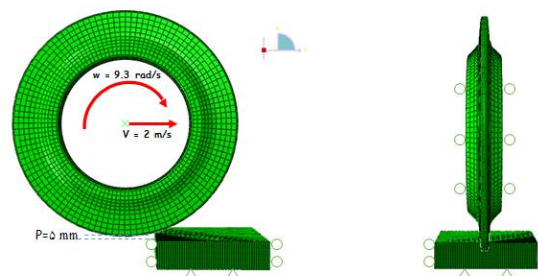
شکل ۵: الف) نصب کرنش‌سنج‌های اندازه‌گیری بر سطح دیسک در آزمایشگاه [۲۱]. ب) نودهای در نظر گرفته‌شده شبیه‌سازی کرنش‌سنج‌های آزمایشگاهی در مدل

ABAQUS از مدل ساده موهر-کولمب برای ارتباط فشار (ناشی از نیروی فنر فرضی) به وجود آمده بین دو سطح با تنش برشی در سطح، استفاده می‌کند. در واقع در حرکت دو جسم بر یکدیگر، مقدار مشخصی تنش برشی را پیش از شروع حرکت تحمل می‌کنند (شکل ۶). در مدل کولمب، فشار تماس با مقدار تنش برشی بحرانی پیش از حرکت τ_{crit} با رابطه (۱۴) تعریف می‌شود:

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (14)$$

که در آن μ ضریب اصطکاک بین دو سطح خواهد بود. در این مدل، ضریب اصطکاک بین دیسک و سنگ ۰/۵ در

برش خطی را شبیه‌سازی می‌کند [۹]. به منظور شبیه‌سازی نیروهای برش، مدل دیسک به غیر از راستای حرکت خود (یعنی راستای y)، در سایر جهتها محدود شده است. اعمال این شرایط مرزی دقیقاً حالت بلبرینگ‌های موجود در کنار دیسک را که مانع حرکت دیسک به چپ یا راست در اثر نیروهای اعمالی حین برش می‌شود، شبیه‌سازی می‌کند. در آزمایش برش خطی معمولاً نمونه‌ای توسط بتن به صفحه فولادی جعبه دستگاه قالب‌بندی می‌شود [۲۴]. بنابراین شرایط مرزی اعمال شده به مدل سنگ به صورت پنج وجه محدود شده و وجه بالایی به صورت آزاد انتخاب شده است. دیگر علت گزینش چنین شرایط مرزی برای کمک به کاهش محاسبات در نظر گرفته شده است (شکل [۹]۴).



شکل ۴: نمایش شرایط مرزی اعمال شده در مدل برش خطی

با احتساب سرعت واقعی TBM در محل و عملکرد محاسبات مدلسازی، سرعت برش‌دهنده دیسکی با سرعت خطی دو متر بر ثانیه و سرعت زاویه‌ای $9/3$ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شد [۹،۲]. در مدلسازی انجام گرفته، نودهای انتخابی برای برآورد لحظه‌ای نیروی برش در سطح تماس سنگ و دیسک دقیقاً در نوک لبه دیسک انتخاب شده است. لازم به ذکر است که انتخاب نودهای مجاور در فاصله ذکر شده از لبه دیسک، مقدار صفر را بعد از حل مدل قرائت می‌کند. اما با نزدیک کردن نودهای انتخابی در مرکز لبه مدل دیسک، مقدار قرائت شده مقدار غیر صفری را در بر می‌گیرد. در واقع نقاط انتگرال‌گیری^{۲۷} نقش کرنش‌سنج‌های آزمایشگاهی را در آزمایشگاه ایفا می‌کند (شکل).

۷-۲- مدلسازی تماس سنگ و برش‌دهنده

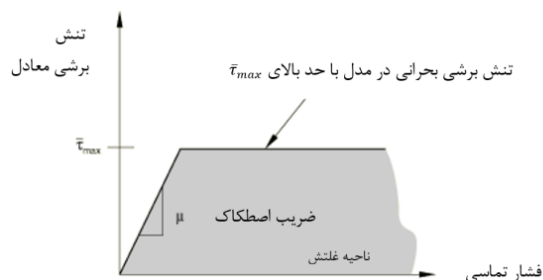
چون مدل از دو جزء متفاوت دیسک و سنگ ساخته شده است، لازم است که تماس میان آنها تعریف شود. تماس عمومی^{۲۸} معرفی شده در *ABAQUS* می‌تواند



شکل ۷: آزمون آزمایشگاهی برش سنگ [۲۱]

شکل ۸ نیروی اندازه‌گیری شده به وسیله گیج‌های نصب شده بر لبه دیسک را بر حسب زمان حین انجام آزمایش برش خطی نشان می‌دهد. هر رنگ مشخص شده در این نمودار، نشان دهنده اندازه‌گیری نیرو به وسیله یکی از کرنش‌سنج‌ها است. همان طور که انتظار می‌رود، هر یک از کرنش‌سنج‌ها به صورت آبی نیرو را در لحظه برقراری لبه دیسک کاملاً مجاور به خود، اندازه‌گیری کرده که به شکل پیک آبی در نمودار شکل گرفته است. با جدا شدن لبه از سطح سنگ و چرخیدن دیسک، کرنش‌سنج مقدار صفر را قرائت کرده و حالت خطی صفر را شکل داده است. در کناره چپ این نمودار رنگ هر یک از گیج‌ها به صورت جداگانه متمایز شده است که با توجه به شماره موجود می‌توان گیج مورد نظر را تشخیص داد. همان طور که در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود، مقادیر پیک اندازه‌گیری شده به وسیله کرنش‌سنج‌ها در آزمون آزمایشگاهی برای شماره ۸ تا ۱۵ به ترتیب ۷۲۰، ۵۰۰، ۶۸۰، ۹۰۰، ۹۰۰، ۴۳۰، ۷۸۰ و ۱۰۸۰ پوند است که بیشینه این مقادیر ۱۰۸۰ پوند (معادل ۴۸۰۴/۰۸ نیوتن)، مورد نظر است [۲۱]. با توجه به کرنش‌سنج نصب شده روی حلقه دیسک در آزمایشگاه، نیروها در سه جهت اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین قرائت سه راستای نیرویی، نیروهای کلی عمودی، غلتشی و جانبی وارد بر برش دهنده دیسکی را نشان می‌دهد. شکل ۹ نمایش‌دهنده قرائت کرنش‌سنج نصب شده بر استوانه نگه‌دارنده برش‌دهنده دیسکی در آزمایشگاه است که دو راستای نیرویی آن را نمایش داده است. نمودار خط‌چین نیروی غلتشی کلی وارد بر دیسک را نشان می‌دهد حال آنکه نمودار خط پیوسته، نمایش دهنده نیروی عمودی کلی است [۲۱].

نظر گرفته شده است که حالت غلتش بین دو جسم برقرار شود [۲۵].



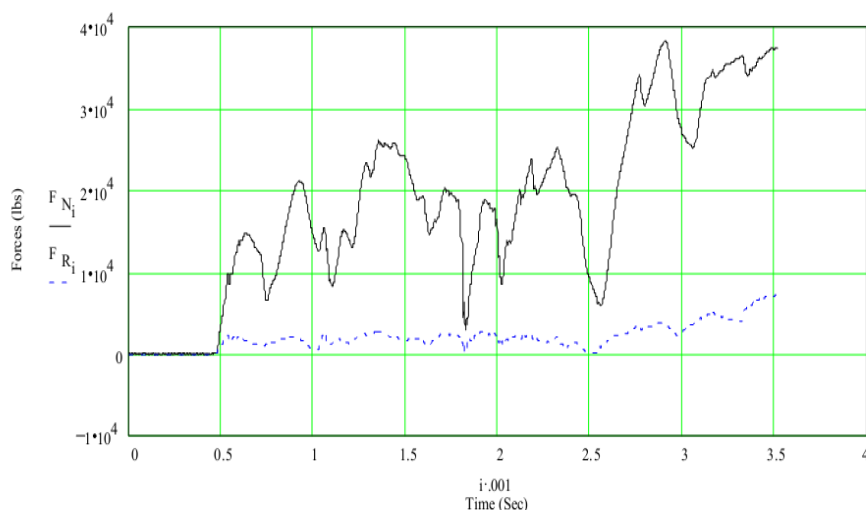
شکل ۶: ناحیه لغزش برای مدل تماس موهر-کولمب بر پایه تنش برشی بحرانی [۱۸]

۲-۸- انتخاب روش حل مدل

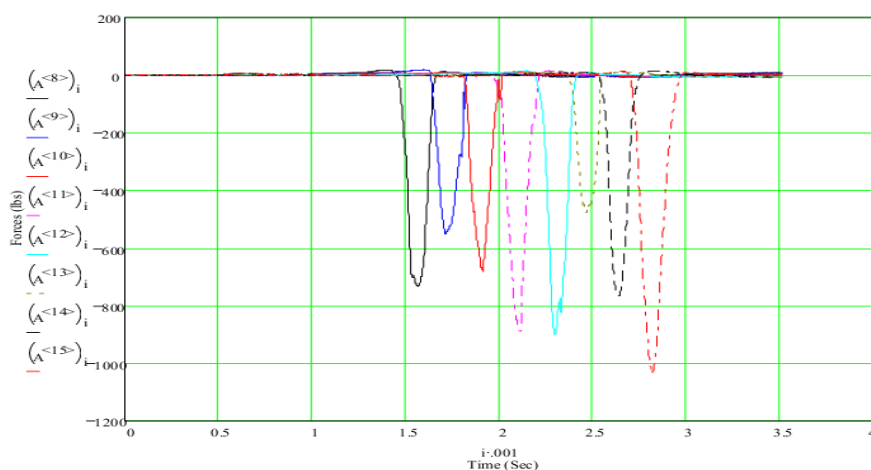
برای مدل‌های دینامیکی، روش حل صریح بسیار ارجحیت دارد؛ چراکه نتایج حاصل در این آنالیز به صورت خودکار برای دقت آنها کنترل نمی‌شود (بر خلاف روش استاندارد). در مدل‌های استاتیکی که تعداد پیشرو زمانی^{۲۹} بسیار اندک است دقت بیشتری در حل مدل اعمال می‌شود. بنابراین هنگامی که تعداد پیشرو زمانی در مدل‌های دینامیکی افزایش می‌یابد، حل صریح بر استاندارد ارجحیت خواهد یافت اما دقت حل کاهش می‌یابد [۱۸]. مطالعه حاضر، برای حل مدل که از دسته مدل‌های دینامیکی محسوب می‌شود، از روش حل صریح استفاده شده است.

۲-۹- نتایج آزمون آزمایشگاهی

آزمون آزمایشگاهی بر روی بلوک مکعبی شکلی از سنگ آهک ایندیانا با اندازه ۰/۴×۱×۰/۹ متر انجام گرفته است. این نمونه با بتن مقاوم در داخل جعبه فلزی نمونه بر روی صفحه متحرک دستگاه برش خطی LCM ثابت شده است به قسمی که با حرکت این صفحه زیر دیسک ثابت، فرآیند برش انجام می‌پذیرد. آزمایشی با عمق نفوذ ۵ میلی‌متر انجام شده است و تشکیل تراشه و سطح برش همانند دیگر فرآیندهای برش سنگ، حاصل شده است. آزمایش انجام شده بر این نمونه سنگی را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد [۲۱].



شکل ۸: نمایش نمودار نیروی اندازه‌گیری شده توسط گیج‌ها بر حسب زمان [۲۱]



شکل ۹: تغییرات نیروی عمودی و غلتشی وارد بر برش‌دهنده دیسکی در آزمایش برش خطی [۲۱]

رفتار نمودار دندانه اره‌ای نیرو- زمان بسیار وابسته به پارامترهای سنگ است. هر چه سنگ مقاوم‌تر باشد تغییرپذیری دامنه این نمودار دندانه اره‌ای بیشتر می‌شود [۲۶]. همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود، نیروی عمودی وارد بر مدل برش‌دهنده دیسکی بسیار بیشتر از نیروی غلتشی است. واضح است که این مقدار نزدیک به ۱۰ برابر مقدار نیروی غلتشی برآورد می‌شود [۲۱]. نیروی جانبی وارد بر مدل برش‌دهنده دیسکی ($CFT1$) در دو جهت مثبت و منفی محور نیرو نوسان کرده است. این موضوع به تشکیل تراشه حین انجام عملیات برش سنگ اشاره دارد. در بازه تقریبی 0.06 الی 0.08 گام زمانی، مقادیر نیروی عمودی شدت بیشتری پیدا کرده است که با مقایسه با نمودار آزمایشگاهی ارائه شده، شباهت نزدیکی را نمایش می‌دهد. این موضوع به تأثیر معادله حالت به کار گرفته شده در مدل‌سازی سنگ

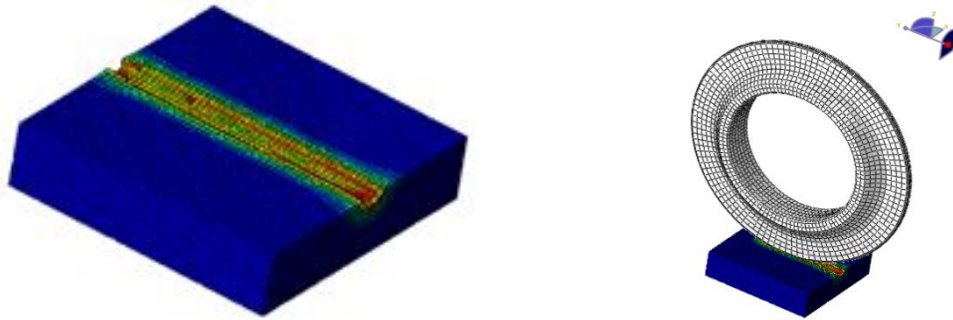
۳- حل مدل و ارائه نتایج

۳-۱- برآورد نیروی برش

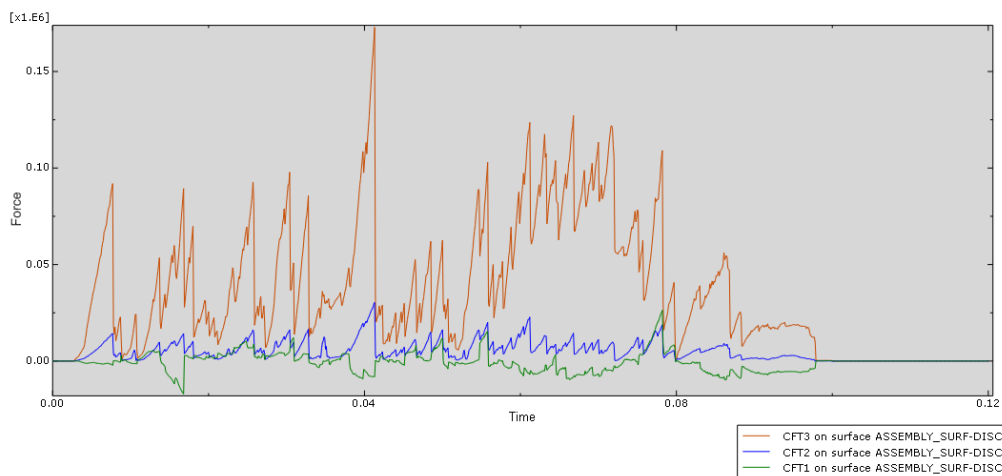
غلتش مدل تیغه دیسکی بر روی مدل سنگ در ماژول نتایج نرم‌افزار *ABAQUS/CAE* در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در روش المان محدود، المان‌هایی که فاکتور آسیب آنها به مقدار یک می‌رسند، از مدل حذف می‌شوند. بنابراین، در سطح مدل سنگ، با حذف المان‌های مذکور، شیاری در مسیر حرکت تیغه دیسکی دیده می‌شود. شکل ۱۱ خروجی نیروی وارد بر مدل برش‌دهنده دیسکی در سه راستای x ، y و z را نمایش می‌دهد که مشابه با نتایج آزمون آزمایشگاهی برش خطی دندانه اره‌ای شده است. مقدار نیرو در جهت x نشان‌دهنده مقدار نیروی جانبی ($CFT1$)، در جهت y نشان‌دهنده مقدار نیروی غلتشی ($CFT2$) و در جهت z نشان‌دهنده مقدار نیروی عمودی ($CFT3$) است.

اشاره می‌کند که اثر برخورد لبه دیسک به سنگ در هنگام تخریب المان‌های جلوی خود و درگیر شدن دوباره آن با

المان‌های بعدی سنگ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: نمایش مدل حل شده در مازول نتایج نرم‌افزار ABAQUS



شکل ۱۱: تغییرات نیروی عمودی و غلتشی وارد بر برش‌دهنده دیسکی در مدل‌سازی عددی برش خطی

از نتایج مدل عددی حل شده، در نظر گرفته می‌شود و با نتایج حاصل از آزمون آزمایشگاهی مقایسه خواهد شد. برای محاسبه درصد خطای مقادیر مقایسه شده از نتایج آزمون آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، از رابطه (۱۵) استفاده می‌شود [۲۸]:

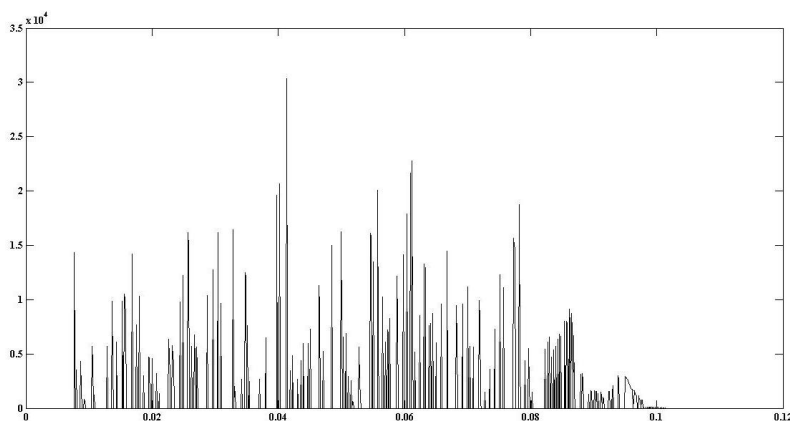
$$(15) \quad \text{درصد خطا} \% = \frac{\text{مقدار برآورد آزمایشگاهی} - \text{مقدار پیش بینی شده مدل}}{\text{مقدار برآورد آزمایشگاهی}} \times 100$$

با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده، دیده می‌شود که درصد خطای حاصل از نیروی نرمال، نیروی غلتشی و نیروی جانبی به ترتیب برابر با ۱۱/۱، ۵/۶ و ۱۰ درصد برآورد شده است (جدول ۴). خروجی نیروی غلتشی وارد بر نودهای انتخابی در لبه دیسک نسبت به زمان در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. در مقایسه با نمودار نیروی اندازه‌گیری شده به وسیله کرنش‌سنج‌های لبه دیسک در آزمایشگاه، نودهای اندازه‌گیری نیرو در مدل دیسک رفتار مشابهی را در خروجی با کرنش‌سنج‌ها ارائه

برای آنکه بتوان مقدار نیرویی وارد بر مدل برش‌دهنده دیسکی را برآورد کرد و با نتایج حاصل از آزمون آزمایشگاهی برش خطی سنگ مقایسه کرد، مقدار میانگین پیک‌های نیرویی در هر نمودار در نظر گرفته می‌شود [۲۷، ۱۰]. برای جدا کردن پیک‌های نمودار نیرویی به دست آمده از حل مدل عددی، کدی در محیط نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شده است. خروجی نرم‌افزار MATLAB مقادیر بیشینه نیرو را نتیجه می‌دهد و مقدار میانگین این مقادیر به صورت مقدار میانگین نیرو در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۲ نمایش نحوه استخراج پیک‌های نیروی غلتشی حاصل از حل مدل با استفاده از کد گفته شده در نرم‌افزار MATLAB را نمایش می‌دهد. میانگین مقادیر پیک‌های نیرویی استخراج شده از هر راستا به صورت میانگین نیروی جانبی (MSF)، میانگین نیروی غلتشی (MRF) و میانگین نیروی عمودی (MNF) حاصل

کم‌ترین مقدار و تا ۲۲/۷ درصد برای بیش‌ترین مقدار آن به دست آمده است. این اختلاف در برآورد نیروی غلتشی لحظه‌ای حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی منطقی به نظر می‌رسد و به تفاوت در شرایط شکل‌گیری تراشه‌های حفاری^{۳۰} در حالت واقعی و شبیه‌سازی مربوط می‌شود.

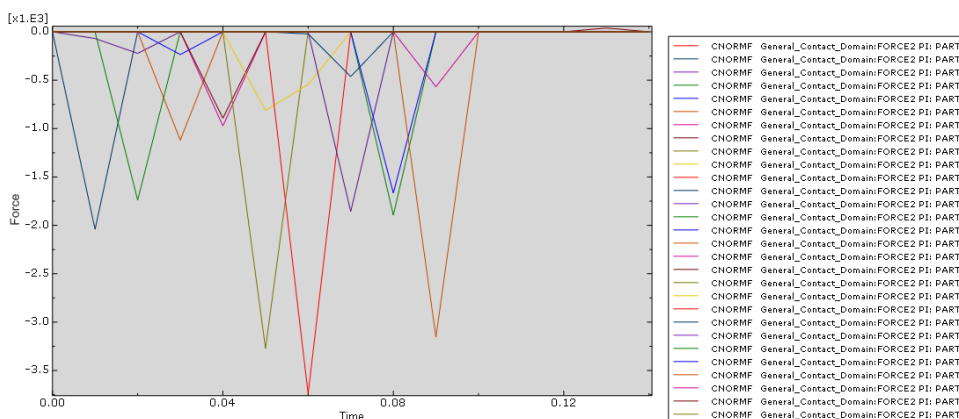
همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر پیک این نمودارها در بازه ۲ کیلو نیوتن (۴۴۹ پوند) تا ۳/۸ کیلو نیوتن (۸۵۰ پوند) تغییر می‌کند. در مقایسه با نوسان نمودار حاصل از آزمون آزمایشگاهی که در بازه ۴۵۰ تا ۱۰۸۰ پوند گزارش شده است، نیروی غلتشی لحظه‌ای اندازه‌گیری شده حاصل از مدل‌سازی با خطای تقریبی ۰/۲ درصد برای



شکل ۱۲: جداسازی پیک‌های نیروی غلتشی وارد بر برش‌دهنده از حل مدل عددی در MATLAB

جدول ۴: مقایسه مقادیر برآورد شده نیروهای وارد بر برش‌دهنده دیسکی از مدل عددی و آزمون آزمایشگاهی

نیرو	مقدار حاصل از مدل‌سازی	مقدار برآورد شده آزمون آزمایشگاهی	درصد خطا
میانگین نیروی عمودی (MNF)	۵۶/۰۸	۶۳/۱	۱۱/۱
میانگین نیروی غلتشی (MRF)	۵/۷۶	۵/۴۵	۵/۶
میانگین نیروی جانبی (MSF)	۳/۷۸	۴/۲	۱۰



شکل ۱۳: نیروهای غلتشی قرائت‌شده به وسیله نودهای اندازه‌گیری نیرو در حل مدل عددی برش سنگ

صحت‌سنجی مدل پیشنهادی از آزمایش برش خطی سنگ انجام شده توسط رستمی (۱۹۹۷) بر نمونه سنگ آهک ایندیانا استفاده شد. به دلیل در دسترس نبودن این نمونه سنگ، برای به دست آوردن پارامترهای ورودی به مدل، از داده‌های موجود در سایر متون استفاده شد. مونتاژ مدل مشابه با شرایط آزمایشگاهی برش خطی منفرد شبیه‌سازی

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل عددی فرآیند برش خطی سنگ بر پایه روش المان محدود با استفاده از کد تجاری ABAQUS ساخته شد و در ادامه مراحل مختلف مدل‌سازی همراه با جزئیات آن به صورت گام‌به‌گام بررسی شد. برای

- [5] Liu, H.; Kou, S.; Lindqvist, P.-A.; Tang, C., Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2002, 39 (4), 491-505.
- [6] Park, K.; Chang, S.; Choi, S.; Jeon, S. In Prediction of the optimum cutting condition of TBM disc cutter in Korean granite by the linear cutting test, *Proceedings, Korean Society for Rock Mechanics Conference, 2006*; pp 217-236.
- [7] Gong, Q.-M.; Zhao, J.; Jiao, Y.-Y., Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling and underground space technology* 2005, 20 (2), 183-191.
- [8] Bejari, H.; Hamidi, J. K. In Simultaneous effects of joint spacing and orientation on the penetration rate of TBM using numerical modeling, *ISRM International Symposium on Rock Mechanics-SINOROCK 2009, International Society for Rock Mechanics: 2009*.
- [9] Cho, J.-W.; Jeon, S.; Yu, S.-H.; Chang, S.-H., Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2010, 25 (3), 230-244.
- [10] Moon T, Oh J. A study of optimal rock-cutting conditions for hard rock TBM using the discrete element method. *Rock mechanics and rock engineering*. 2012;45(5):837-49.
- [11] Choi S-O, Lee S-J. Three-dimensional numerical analysis of the rock-cutting behavior of a disc cutter using particle flow code. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2015;19(4):1129-38.
- [12] Menezes PL, Lovell MR, Avdeev IV, Higgs CF. Studies on the formation of discontinuous rock fragments during cutting operation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014;71:131-42.
- [13] Li X, Li H, Liu Y, Zhou Q, Xia X. Numerical simulation of rock fragmentation mechanisms subject to wedge penetration for TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016;53:96-108.
- [14] Xiao N, Zhou X-P, Gong Q-M. The modelling of rock breakage process by TBM rolling cutters using 3D FEM-SPH coupled method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017;61:90-103.
- [15] Xia Y, Guo B, Cong G, Zhang X, Zeng G. Numerical simulation of rock fragmentation induced by a single TBM disc cutter close to a side free surface. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017;91:40-8.

شد. با حل مدل پیشنهاد شده، نیروهای وارد بر برش‌دهنده محاسبه شد. نیروهای برش حاصل از مدلسازی روند مشابهی با خروجی نیروهای حاصل از برش آزمایشگاهی نشان داد. در عین حال، مقایسه مقادیر نیروهای برش حاصل از کار آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی، اختلاف‌های ۱۱/۱، ۵/۶ و ۱۰ درصد به ترتیب برای نیروهای نرمال، غلتشی و جانبی نشان داد. این اختلاف، با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن مسأله برش سنگ از یک سو و عدم امکان لحاظ نمودن تمامی شرایط حاکم بر فرآیند برش سنگ با تیغه دیسکی، طبیعی به نظر می‌رسد. با وجود این، تحلیل‌های پیش‌تر با مدلسازی بر روی دیگر نمونه‌های سنگ به منظور بهبود دقت نتایج در حال انجام است.

۵- قدردانی

نویسندگان لازم می‌دانند از آقای دکتر جمال رستمی دانشیار مدرسه عالی معادن کلرادو به خاطر در اختیار قراردادن داده‌های آزمایشگاهی و ارائه نقطه نظرات ارزشمند در حین انجام این تحقیق تشکر و قدردانی نمایند.

مراجع

- [1] Lawn, B.; Swain, M., Microfracture beneath point indentations in brittle solids. *Journal of Materials Science* 1975, 10 (1), 113-122.
- [2] Cho, J.-W.; Jeon, S.; Jeong, H.-Y.; Chang, S.-H., Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2013, 35, 37-54.
- [3] Bilgin, N.; Tuncdemir, H.; Balci, C.; Copur, H.; Eskikaya, S. In A model to predict the performance of tunneling machines under stressed conditions, *Proceedings of the AITES-ITA 2000 World Tunnel Congress, Durban, Published by The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, Republic of South Africa, May, 2000*; pp 13-18.
- [4] Kou, S.; Liu, H.; Lindqvist, P.-A.; Tang, C., Rock fragmentation mechanisms induced by a drill bit. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2004, 41, 527-532.

- [30] Rostami, J., Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure. Colorado School of Mines: 1997.
- [31] Mattar, P. In Permeability of intact and fractured Indiana Limestone, Masters Abstracts International, 2009.
- [32] Schmidt, R. A., Fracture-toughness testing of limestone. *Experimental Mechanics* 1976, 16 (5), 161-167.
- [33] Nilsen, B.; Ozdemir, L. In Hard rock tunnel boring prediction and field performance, PROCEEDINGS OF THE RAPID EXCAVATION AND TUNNELING CONFERENCE, SOCIETY FOR MINING, METALLOGY & EXPLORATION, INC: 1993; pp 833-833
- [34] Gong Q-M, Zhao J, Jiao Y-Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling and underground space technology*. 2005;20(2):183-91.
- [35] Shaoquan, K., Some basic problems in rock breakage by blasting and by indentation. Doctoral Thesis Lulea University of Technology, Lulea, Sweden 1995.
- [36] Balci, C.; Tumac, D., Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2012, 30, 183-193.
- [37] Sunal O. Parametric study of a single PDC cutter with a numerical model: West Virginia University; 2009.
- [16] Zhu Z, Xie H, Mohanty B. Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2008;45(2):111-21.
- [17] Smojver I, Ivančević D. Bird strike damage analysis in aircraft structures using Abaqus/Explicit and coupled Eulerian Lagrangian approach. *Composites Science and Technology*. 2011;71(4):489-98.
- [18] Systemes D. Abaqus Theory Guide. Abaqus 613 Documentation. 2013.
- [19] Hooputra, H.; Gese, H.; Dell, H.; Werner, H., A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminium extrusions. *International Journal of Crashworthiness* 2004, 9 (5), 449-464.
- [20] Helwany S. Applied soil mechanics with ABAQUS applications: John Wiley & Sons; 2007.
- [21] Rostami, J., Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure. Colorado School of Mines: 1997.
- [22] Mattar, P. In Permeability of intact and fractured Indiana Limestone, Masters Abstracts International, 2009.
- [23] Schmidt, R. A., Fracture-toughness testing of limestone. *Experimental Mechanics* 1976, 16 (5), 161-167.
- [24] Nilsen, B.; Ozdemir, L. In Hard rock tunnel boring prediction and field performance, PROCEEDINGS OF THE RAPID EXCAVATION AND TUNNELING CONFERENCE, SOCIETY FOR MINING, METALLOGY & EXPLORATION, INC: 1993; pp 833-833
- [25] Gong Q-M, Zhao J, Jiao Y-Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling and underground space technology*. 2005;20(2):183-91.
- [26] Shaoquan, K., Some basic problems in rock breakage by blasting and by indentation. Doctoral Thesis Lulea University of Technology, Lulea, Sweden 1995.
- [27] Balci, C.; Tumac, D., Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2012, 30, 183-193.
- [28] Sunal O. Parametric study of a single PDC cutter with a numerical model: West Virginia University; 2009.
- [29] ABAQUS applications: John Wiley & Sons; 2007.

¹ Indentation² Bilgin³ koh⁴ Liu⁵ Baek & Moon⁶ Park⁷ Gong⁸ Bejari & Khademi hamidi⁹ Cho¹⁰ Erosion¹¹ Moon & Oh¹² Choi & Li¹³ Menzes¹⁴ Xia¹⁵ Xiao¹⁶ Mie- Grüneisen¹⁷ ductile damage¹⁸ Von Mises¹⁹ Drucker-prager²⁰ Indiana Limestone²¹ Hook's law²² Plastic Associated flow²³ Damage Evolution²⁴ Element deletion²⁵ Robbins

- ²⁶ Duro Cutter
- ²⁷ Gauss points
- ²⁸ General contact
- ²⁹ increment
- ³⁰ chipping