نشریه‌ی علمی-پژوهشی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۱، صفحه ۱۳ تا ۲۱

بررسی اثر تغییر عمق نفوذ ،مساحت و سرعت بر نیروی‌های عمودی و چرخشی وارده بر دیسک برشی با لبه V شکل

شاهین فتاحی دهکبودی[۱]؛ ابراهیم فرخ[۲*]؛ وهاب سرفرازی[۳]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲- عضو هیات علمی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۳- عضو هیات علمی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

دریافت : ۱۴۰۱/۰۵/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۱

چکیده

دیسک برشی با لبه V شکل یکی از انواع دیسک‌های برشی مورد استفاده برای کله حفار ماشین تمام مقطع تونل می‌باشد که محاسبه نیروهای وارده بر آن از اهمیت به سزایی برای طراحی کله حفار برخوردار می‌باشد. امروزه با پیشرفت نرم‌افزارهای مدل‌سازی از جمله نرم‌افزار *LS-DYNA* امکان استفاده از آن‌ها برای پیش‌بینی نیروهای وارده بر دیسک ها فراهم شده است. در این مقاله با انجام یکسری شبیه‌سازی با نرم‌افزار مذکور در عمق نفوذ، اثر سرعت خطی و زاویه لبه بر نیروها مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، نتایج شبیه سازی ها نشان می‌دهد در اثر افزایش عمق نفوذ سه دیسک با زاویه لبه ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه از ۲/۵ به ۷/۶ میلی‌متر، نیروی عمودی به ترتیب ۳۶، ۵۱ و ۸۶ درصد افزایش و نیروی چرخشی به ترتیب ۷۹، ۹۶ و ۱۲۰ درصد افزایش می‌یابد. آهنگ تاثیر سرعت خطی برای نیروی عمودی و چرخشی به ترتیب ۲۳/۸۵+ و ۳/۸۶+ کیلونیوتن است. همچنین مدل‌سازی‌ها نشان می دهد نیروی وارده بر دیسک‌های پیرامونی به مراتب بیشتر از دیسک‌های مرکزی می‌باشد. در تمامی سرعت‌های شبیه‌سازی شده با افزایش زاویه لبه دیسک و عمق نفوذ میزان نیروی وارده بر دیسک برشی افزایش می‌یابد که این نتیجه نمایش دهنده رابطه مستقیم سطح تماس و نیروی وارده بر دیسک برشی است، با توجه به روابط ارائه شده در این مقاله، تاثیر عمق نفوذ بسیار بیشتر از تاثیر مقدار زاویه لبه می‌باشد.

واژگان کلیدی **دیسک برشی، نرم‌افزار *LS-DYNA*، نیروی عمودی، نیروی چرخشی، آزمایش برش خطی**

۱- مقدمه

امروزه باتوجه به افزایش عمق حفریات زیر زمینی محل حفاری شامل سنگ‌های سخت می‌باشد و از آنجا که اصلی‌ترین و بهترین ابزار برای حفاری در سنگ سخت دیسک‌های برشی است محاسبه نیروهای عمودی و چرخشی وارد بر آن‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد.

برای تعیین نیروهای ذکر شده می‌توان از آزمایش برش خطی در مقیاس کامل (*LCM*) استفاده نمود که روشی قابل اعتماد است[۱]–[۴]. آزمایش برش خطی در کنار تمامی مزایا دارای هزینه و زمان بسیار زیادی برای هریک از نمونه‌ها می‌باشد[۵]. برای حل این معضل مدل‌های پیش‌بینی عملکرد حفار تمام مقطع تونل بسیاری از جمله مدل مدرسه معدن کلرادو (*CSM*) [۶] و دانشگاه علم و فناوری نروژ (*NTNU*) [۷] ارائه شده است. در تحقیقات پیشین می‌توان فرمول‌های نظری و نیمه نظری متعددی را پیدا کرد که تمامی این مدل‌های تحلیلی فقط می‌توانند تخمینی تقریبی از نیروهای وارد بر دیسک را ارائه دهند[۸]–[۱۲]. از جمله این روش‌ها می‌توان به پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل با استفاده از شاخص کیفیت توده سنگ (*QTBM*) اشاره نمود. سیستم‌های طبقه بندی توده سنگ مانند سیستم Q و سیستم رتبه بندی توده سنگ (*RMR*) نیز برای تخمین عملکرد ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل استفاده شده‌اند[۱۳]. ژائو و همکاران یک مدل پیش‌بینی عملکرد *TBM* را با استفاده از تحلیل شبکه عصبی مجموعه‌ای برای توده‌های سنگ گرانیتی ایجاد کردند[۱۴].

*نویسنده مسئول: دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر،
پست الکترونیک: **e.farrokh@aut.ac.ir**

آزمایش برش خطی در کنار مدل سازی عددی یکی از بهترین روش‌ها برای پیش بینی عملکرد دیسک‌های برشی می‌باشد، به این صورت که از آزمایش برش خطی به عنوان اعتبارسنجی نتایج مدلسازی و سپس توسعه مدلسازی برای حالات دیگر استفاده شود. محققان متعددی از مدلسازی عددی برای شبیه‌سازی برش سنگ استفاده نموده‌اند. طبق بررسی‌های منز و همکاران [۱۵] چندین روش برای شبیه‌سازی فرآیند برش از جمله روش تفاصل محدود (*FDM*)، روش المان مجزا (*DEM*) و روش المان محدود (*FEM*) استفاده شده است. ایناوراتو و همکاران[۱۶] شکستگی سنگ و تشکیل تراشه با یک دیسک برشی را به وسیله مدل موهر کلمب شبیه‌سازی و مطالعه کردند. تولو و هاسلی [۱۷] کد تجاری دیفرانسیل محدود سه بعدی نرم‌افزار *FLAC* را برای شبیه‌سازی برش دایره‌ای به کار گرفتند. یک مدل نقوذ در سنگ توسط تانگ و همکاران [۱۸] توسعه داده شد که در آن یک معیار انرژی اصلاح شده در یک کد ناپیوستگی جابجایی گنجانده شده است. تانگ [۱۹] یک رویکرد عددی با عنوان تجزیه و تحلیل فرآیند شکست سنگ بر اساس اجزا محدود ایجاد کرد. تانگ و همکاران [۲۰] شکستگی سنگ حاوی دانه‌ها یا همان آخال‌ها را با استفاده از تجزیه و تحلیل فرآیند شکست سنگ شبیه‌سازی کردند. لیو و همکاران [۲۱] شبیه‌سازی برش سنگ به روش اجزا محدود را با کد *R-T2D* برای ارزیابی فرآیند تشکیل تراشه و برش سنگ ناشی از یک یا دو دیسک را انجام دادند. چو و همکاران [۵] از روش اجزا محدود با نرم افزار ادغام زمان صریح اتوداین سه بعدی برای شبیه‌سازی فرآیند شکست سنگ در طول آزمایش برش خطی سنگ استفاده کردند.

هیون لی و همکاران با استفاده از نرم‌افزار *LS-DYNA* به بررسی تغییرات نیرو بر اثر عمق نفوذ و فاصله‌داری پرداختند که مشخص شد با افزایش عمق نفوذ و فاصله‌درای نیروهای برشی وارده بر دیسک افزایش می‌یابد[۲۲].

ونجدون به بررسی تاثیر شکل لبه و عمق نفوذ دیسک پرداخت که مشخص شد به لبه‌های مسطح نیروهای به مراتب بیشتری نسبت به دیسک‌ها با شکل لبه انحنادار وارد می‌شود همچنین افزایش عمق نفوذ با توجه افزایش مساحت درگیر دیسک با سنگ موجب افزایش نیروها می‌شود[۲۳].

یو [۲۴] از نرم‌افزار *LS-DYNA* برای شبیه سازی چرخش کله حفار در حین برش سنگ استفاده کرده است. جیمه [۲۵] حالت شکست را در برش خطی با استفاده از نرم‌افزار *LS-DYNA* بازتولید کرده است و با موفقیت حالت شکست و خرد شدن را در برش‌های کم عمق، ایجاد ترک، انتشار ترک و برش دینامیک را در برش‌های عمیق مدلسازی کرده است.

با توجه به توضیحات هدف این پروژه بررسی تاثیر زاویه لبه، عمق نفوذ و سرعت خطی و چرخشی دیسک‌های برشی *V* شکل بر نیروهای عمود و چرخشی وارد شده به دیسک با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار *LS-DYNA* می‌باشد. مزیت این کار صرف هزینه و زمان کمتر، عدم نیاز به تکرار آزمایش‌ها در صورت تغییر هریک از متغییرها و همچنین قابلیت تعمیم آن برای انواع دیسک و سنگ می‌باشد.

برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی‌ها ابتدا شبیه‌سازی دیسک ۱۷ اینچی *A30581* مطابق با آزمایشات گرش و همکاران[۳] با مدل‌های مختلف رفتاری برای سنگ شبیه‌سازی شده و پس از مقایسه نتایج هریک از مدل‌های رفتاری مدلی که بیشترین انطباق با نتایج آزمایشات گرش و همکاران را داشته انتخاب و سپس شبیه‌سازی‌ها با دیسک‌های با لبه *V* شکل که شامل سه دیسک با زاویه لبه ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه با سرعت‌های مختلف می‌باشد جایگزین شده است.

۲- مدل‌سازی

برای مدلسازی از نرم‌افزار *LS-DYNA* استفاده شده است که اولین بار در سال ۱۹۷۶ در موسسه لیور مور لورنس تولید شد. این نرم‌افزار امروزه برای شبیه‌سازی کارهای دینامیکی، استاتیک و شبه استاتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

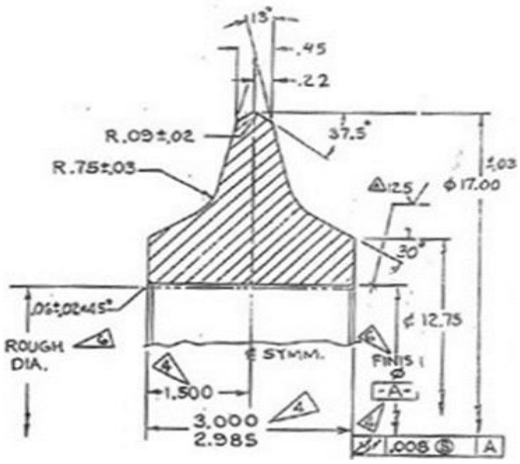
نرم افزار *LS-DYNA* یکپارچه نیست، مدلسازی‌ها ابتدا در محیط *LS-PREPOST* که شامل ایجاد هندسه، شرایط مرزی و حرکتی، شرایط تماسی و مدل رفتاری اجزای مختلف، تعریف و سپس مدل ایجاد شده به حلگر *LS-RUN* منتقل می‌شود. نقطه قوت *LS-DYNA* نسبت به باقی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عددی، کتابخانه قدرتمند این نرم افزار که شامل ۲۰۰ مدل مادی و ۱۳ نوع معادله حالت و انواع روش‌های تماسی سطوح می‌باشد.

با توجه به شرایط شبیه‌سازی‌ها که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود زمان حل حدودی هر یک از مدل‌ها ۱۲ ساعت می‌باشد.

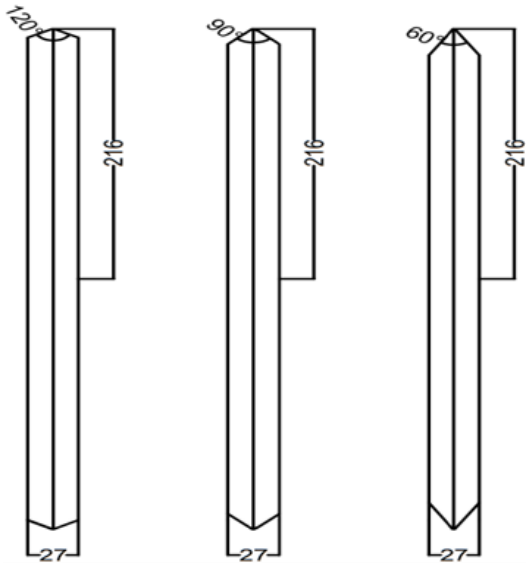
۲-۱- ویژگی دیسک‌ها و سنگ شبیه‌سازی شده

در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای اعتبار سنجی و مقایسه دقیق‌تر نتایج از دیسک برشی ۱۷ اینچی *A30581* که مورد استفاده گرش و همکاران در آزمایش‌های برش خطی بوده استفاده شده است. در شکل ۱ نیمرخی از دیسک برشی ذکر شده نشان داده شده است. درشکل ۲ نیز به ترتیب نیمرخ دیسک‌های ۱۷ اینچی با لبه *V* شکل ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ نمایش داده شده است. در شکل ۳ نمایی از دیسک ۱۲۰ درجه و سنگ نمایش داده شده که ابعاد سنگ ۲۰۰×۱۰۰×۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

المان‌های استفاده شده در سنگ همگی مکعب مربع است که اندازه المان‌های آن در زیر دیسک برشی ۸ میلی‌متر مکعب (۲×۲×۲ میلی‌متر) بوده و در المان‌های دور از دیسک برشی تا ۵۱۲ میلی‌متر مکعب (۸×۸×۸ میلی‌متر) افزایش می‌یابد.



شکل ۱- نیمرخ عرضی دیسک ۱۷ اینچی A30581 [۲۶]

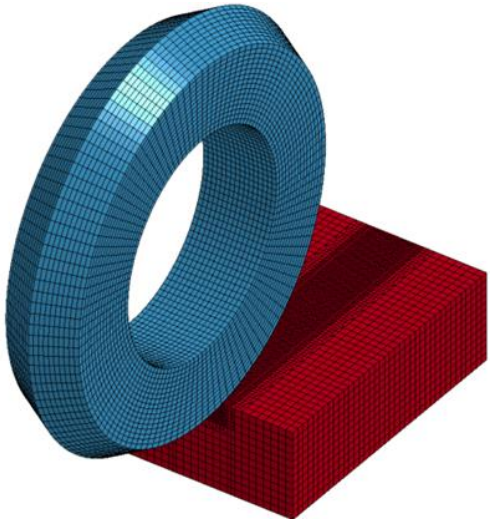


شکل ۲- نیمرخ دیسک‌های با لبه V شکل

حرکت سنگ مدل شده از قسمت زیرین و جوانب کاملاً مطابق با آزمایش برش خطی سنگ محدود شده تا در اثر اعمال نیرو از دیسک به سنگ در حین برش سنگ مورد جابه‌جایی واقع نشود.

۲-۲- مدل رفتاری

از آنجا که آزمایشات برش خطی گرش و همکاران در طول برش کم انجام شده است، دیسک دچار سایش و تغییر شکل‌های عمده نمی‌شود. از این رو در شبیه‌سازی نیز این ویژگی لحاظ شده و برای دیسک از مدلی صلب به نام مدل رفتاری *Rigid* استفاده شده است. این مدل دقیقاً با شرایط حاکم بر مسئله تطابق داشته و مدل مناسبی برای شبیه‌سازی اجسام سخت و صلب می‌باشد.



شکل ۳- هندسه طراحی شده دیسک با لبه V شکل طراحی شده در نرم‌افزار LS-PREPOST

برای شبیه‌سازی سنگ نیز از مدل رفتاری جانسون هالمکوئیست مخصوص بتن (*JHC*) استفاده شده است که در ابتدا برای شبیه‌سازی رفتار بتن تحت فشارهای زیاد و نرخ کرنش بالا توسعه داده شده است[۲۷]. بتن و سنگ هر دو مواد شبه شکننده با مکانیسم شکست مشابه هستند به همین دلیل می‌توان از این مدل برای سنگ نیز استفاده کرد[۲۸]. به‌طور کلی، مدل *JHC* خواص مقاومت نامتقارن مواد را تحت بارهای کششی و فشاری متمایز می‌کند. تنش معادل نرمال شده $\left(\sigma^*\right)$ ناشی از تنش‌های دیفرانسیلی، استفاده از مقاومت فشاری محدود نشده تک محوری شبه استاتیک $\left(f_C^{'}\right)$ *(UCS)* به صورت زیر محاسبه می‌شود[۲۷]:

$$\sigma^* = \sigma / f_C' \qquad (۱)$$

که σ تنش معادل واقعی است. سطح تسلیم با معادله زیر ارائه می‌شود که مدل سازنده نامیده می‌شود[۲۷]:

$$\sigma^* = [A(1-D) + B(p^*)^N][1 + C\ln(\dot{\varepsilon}^*)] \qquad (۲)$$

که در آن A چسبندگی نرمال شده یا همان تنش محاسبه شده در آزمایشگاه که باعث شکستگی مواد در اثر برش می‌شود، B ضریب سخت شوندگی فشار نرمال شده، N ضریب سختی فشاری، C ضریب نرخ کرنش است. P^* فشار نرمال شده است که با رابطه $P^* = P / f_c'$ محاسبه و P با رابطه $P = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}$ بدست می‌آید. $\dot{\varepsilon}^*$ نرخ کرنش نرمال شده ماده و D ضریب آسیب انباشته می‌باشد.

نمایش گرافیکی معادله (۲) در شکل ۴ ارائه شده است. در مدل جانسون هالمکوئیست بتن (*JHC*)، آسیب مواد به شکل کاهش تدریجی سختی آن تا رسیدن به سطح شکست بحرانی که مقاومت باقیمانده را مشخص می‌کند، محسوب می‌شود. مواد کاملاً آسیب دیده یا همان خرد شده فقط می‌توانند بارهای فشاری را منتقل کنند در نتیجه مدل حالتی که ایجاد می‌شود در آن ماده خرد شده به

شکل سنگدانه بدون مقاومت کششی است.

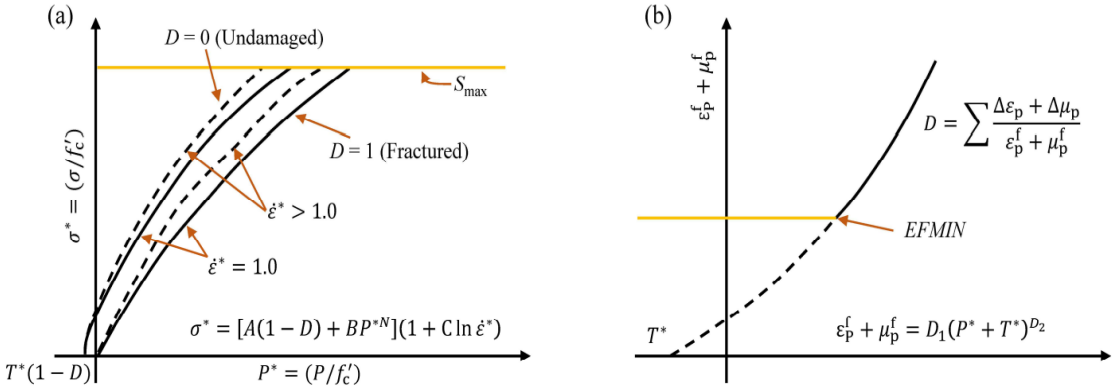
پارامتر آسیب D توسعه‌ای از مدل جانسون کوک (JC) است و کرنش پلاستیک با افزایش کرنش حجمی مطابق با معادله زیر حساب می‌شود[۲۷]:

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon_p + \Delta\mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \qquad (۳)$$

که در آن $\Delta\varepsilon_P$ و $\Delta\mu_p$ به ترتیب کرنش پلاستیک و کرنش حجمی پلاستیک معادل هستند و $\varepsilon_p^f + \mu_p^f$ کرنش پلاستیک برای شکستن تحت فشار ثابت p است و به صورت زیر بیان می شود[۲۷]:

$$\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(p^* + T^*)^{D_2} \geq \varepsilon_{f\,min} \qquad (۴)$$

که در آن $D1$ و $D2$ ثابت، p همانطور که قبلاً تعریف شد فشار ثابت است. حداکثر فشار هیدرواستاتیک کششی نرمال شده $T^* = \frac{ft}{fc}$ است که ft مقاومت کششی تک محوری، $\varepsilon_{f\,min}$ برای ایجاد مقدار محدودی از کرنش پلاستیکی برای شکستن مواد ارائه شده است.

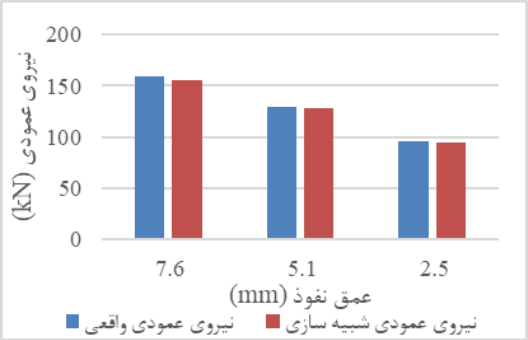


شکل ۴- شکل سطوح شکست و تابع تکامل آسیب در مدل جانسون هالمکوئیست بتن (JHC) [۲۹]

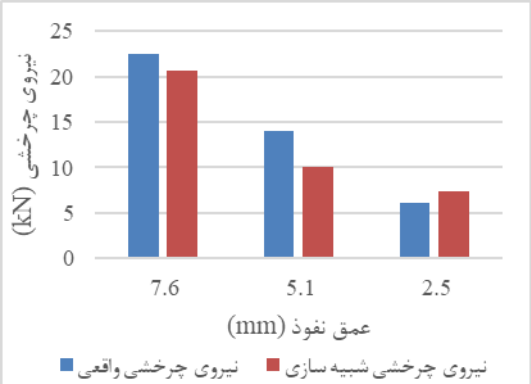
برای اعتبارسنجی، میزان خطای نتایج شبیه‌سازی‌های عددی، با نتایج آزمایشات برش خطی گرش و همکاران [۳] مقایسه شده است. خصوصیات اصلی مورد استفاده در مدل‌های عددی به شرح زیر است:

- مقاومت سنگ : ۱۵۸ MPa
- سرعت چرخشی دیسک : ۰/۰۰۱۵ رادیان بر میلی‌ثانیه
- سرعت برش خطی دیسک: ۰/۳۳ میلی‌متر بر میلی‌ثانیه
- عمق نفوذ : ۲/۵، ۵/۱ و ۷/۶ میلی‌متر

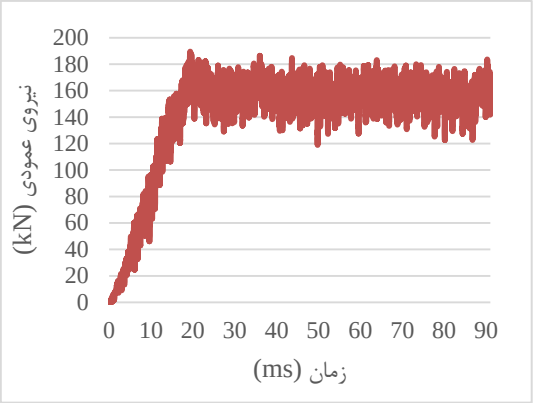
در این مقاله از تاثیر فاصله‌داری چشم پوشی شده و به محاسبه نیروها برای تنها یک دیسک اکتفا شده است. جدول ۱ و شکل ۵ و ۶ مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی انجام شده با نتایج آزمایش برش خطی گرش و همکاران [۳] را نشان می‌دهد، همچنین شکل ۷ و ۸ به ترتیب نمودار نیروهای عمودی و چرخشی دیسک مدل‌سازی شده در عمق نفوذ ۷/۶ میلی‌متر را در طول ۳۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. مقادیر ذکر شده در جدول ۱ برای نیروهای حاصل از مدل‌سازی برابر با میانگین نیرو در بازه زمانی ۴۰ تا ۶۰ میلی ثانیه می‌باشد همچنین مقادیر واقعی نیروهای دیسک مربوط به حداکثر فاصله‌داری دیسک‌ها (۷۶ میلی‌متر) در مقاله گرش و همکاران است. نتایج حاصله برای نیروی عمودی میزان خطایی کمتر از ۳ درصد و برای نیروی چرخشی داری ۱۹ درصد خطا می‌باشد. با توجه به نتایج، مدل‌سازی‌های عددی از اطمینان کافی برخوردار است. در ادامه با تغییر دیسک $A30581$ به دیسک‌های با لبه V شکل و تغییر هریک از پارامترها می‌توان تاثیر آن‌ها را بررسی کرد.



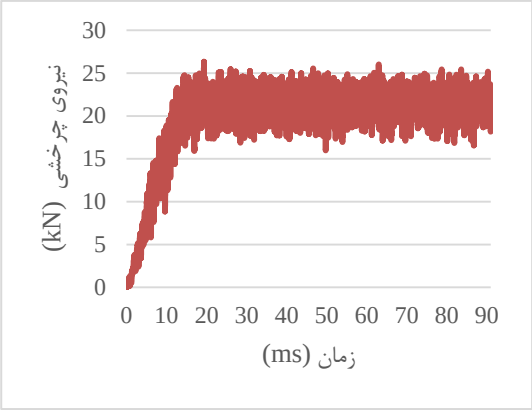
شکل ۵- نتایج مدل‌سازی و آزمایشات برش خطی گرش



شکل ۶- نتایج مدل‌سازی و آزمایشات برش خطی گرش



شکل ۷- نیروی عمودی دیسک مدل‌سازی شده در عمق نفوذ ۷/۶میلی‌متر



شکل ۸- نیروی چرخشی دیسک مدل‌سازی شده در عمق نفوذ ۷/۶میلی‌متر

جدول ۱-نتایج حاصل از آزمایشات برش خطی گرش و همکاران و مدل‌سازی‌ها

نفوذ	نیروی عمودی واقعی	نیروی عمودی شبیه سازی	٪ میزان خطا نیروی عمودی	نیروی چرخشی واقعی	نیروی چرخشی شبیه سازی	٪ میزان خطا نیروی چرخشی
۷/۶	۱۵۹	۱۵۵	-۲/۵۲	۲۲/۵	۲۰/۶	-۸/۴۴
۵/۱	۱۲۹	۱۲۸/۱	-۰/۷۰	۱۴	۱۰/۰۶	-۲۸/۱۴
۲/۵	۹۶	۹۴/۷۲	-۱/۳۳	۶/۱	۷/۳۸	۲۰/۹۸

پارامترهای مساحت، عمق نفوذ و سرعت بر نیروهای عمودی و چرخشی در این قسمت بررسی خواهند شد.

۴-۱- تاثیرسرعت، عمق نفوذ و زاویه لبه در شبیه‌سازی عددی دیسک‌های برشی با لبه V شکل

برای حالت برش سنگ با تک دیسک برشی با لبه V شکل که در شکل ۳ نشان داده شده است در سه عمق ۲/۵، ۵/۱ و ۷/۶ میلی‌متر با سه سرعت مختلف (مبنا که سرعت آزمایشات گرش (سرعت خطی ۰/۳۳ میلی‌متر بر ثانیه و سرعت چرخشی ۰/۰۰۱۵)، پنج برابر سرعت مبنا و ده برابر سرعت مبنا) شبیه‌سازی‌ها انجام گرفت که نتایج آن در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ به نمایش درآمده است.

جدول ۲-نتایج مدل‌سازی دیسک با لبه V شکل ۶۰ درجه

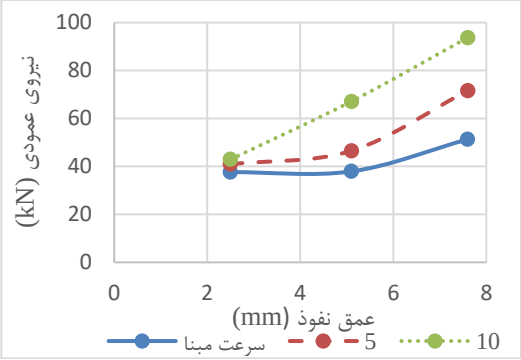
عمق نفوذ	سرعت	نیروی عمودی	نیروی چرخشی
۲/۵	مبنا	۳۷/۶	۲/۹
	۵ برابر	۴۰/۹	۳/۶
	۱۰ برابر	۴۲/۹	۴/۱
۵/۱	مبنا	۳۷/۹	۳/۶
	۵ برابر	۴۶/۵	۶/۳
	۱۰ برابر	۶۷/۱	۷/۷
۷/۶	مبنا	۵۱/۳	۵/۲
	۵ برابر	۷۱/۶	۹/۳
	۱۰ برابر	۹۳/۷	۱۲/۸

جدول ۳- نتایج مدل‌سازی دیسک V شکل با لبه ۹۰ درجه

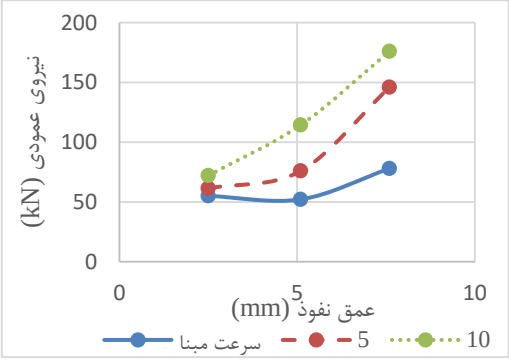
عمق نفوذ	سرعت	نیروی عمودی	نیروی چرخشی
۲/۵	مبنا	۵۲/۱	۳/۲
	۵ برابر	۶۱/۴	۴/۶
	۱۰ برابر	۷۲/۱	۵/۳
۵/۱	مبنا	۵۵/۲	۱۰/۱
	۵ برابر	۷۶	۱۳/۲
	۱۰ برابر	۱۱۴/۵	۱۴/۹
۷/۶	مبنا	۷۸/۴	۱۵/۳
	۵ برابر	۱۴۶	۱۷/۳
	۱۰ برابر	۱۷۶/۳	۲۰/۷

جدول ۴-نتایج شبیه‌سازی دیسک با لبه V شکل ۱۲۰ درجه

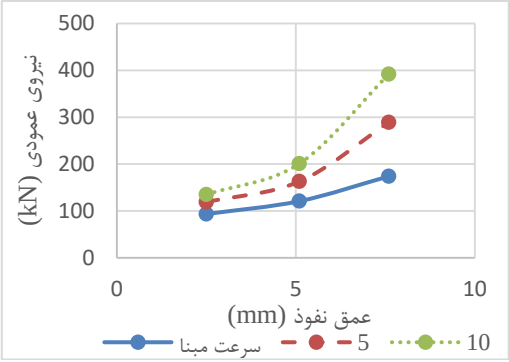
عمق نفوذ	سرعت	نیروی عمودی	نیروی چرخشی
۲/۵	مبنا	۹۳/۵	۱۱/۵
	۵ برابر	۱۱۹/۷	۱۷/۴
	۱۰ برابر	۱۳۵/۴	۲۱/۸
۵/۱	مبنا	۱۲۱	۲۱/۶
	۵ برابر	۱۶۳/۴	۳۵/۷
	۱۰ برابر	۲۰۱/۸	۴۸
۷/۶	مبنا	۱۷۴/۴	۳۵/۷
	۵ برابر	۲۸۹	۵۵/۴
	۱۰ برابر	۳۹۲/۵	۶۷/۵



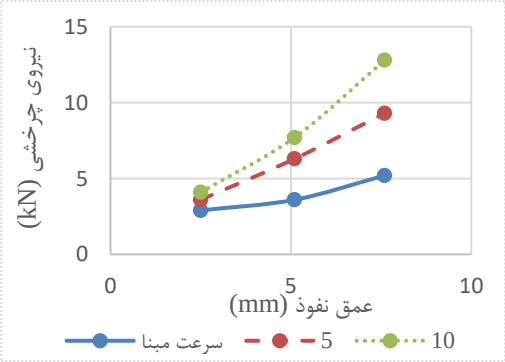
شکل ۹-نیروی عمودی دیسک با لبه V شکل ۶۰ درجه



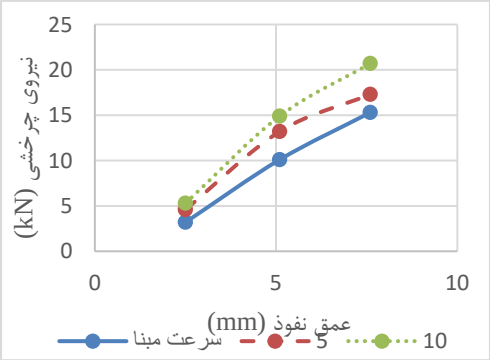
شکل ۱۰- نیروی عمودی دیسک با لبه V شکل ۹۰ درجه



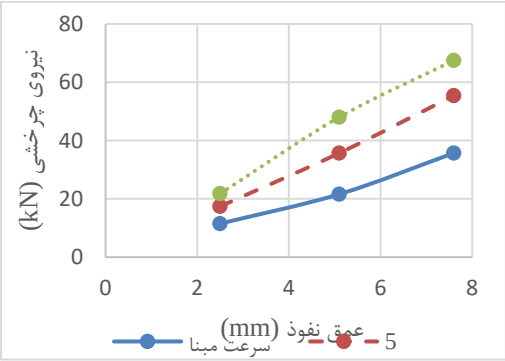
شکل ۱۱- نیروی عمودی دیسک با لبه V شکل ۱۲۰ درجه



شکل ۱۲- نیروی چرخشی دیسک با لبه V شکل ۶۰ درجه



شکل ۱۳- نیروی چرخشی دیسک با لبه V شکل ۹۰ درجه



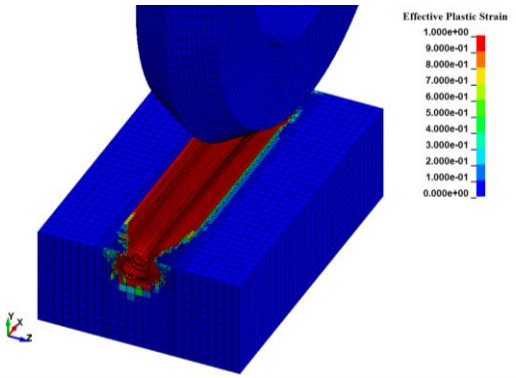
شکل ۱۴- نیروی چرخشی دیسک با لبه V شکل ۱۲۰ درجه

نمودارهای فوق نشان می‌دهند نیروی عمودی در تمامی دیسک‌ها با افزایش عمق زیاد می‌شوند که این نتیجه با آزمایشات و مطالعات گرش و همکاران [۳]، فیلیپس و راکسبور [۹] و هیون لی [۲۲] مطالقت دارد. همچنین نتایج حاصله نشان می‌دهد افزایش سرعت موجب افزایش نیروی عمودی وارده بر دیسک می‌شود. میزان این افزایش با بیشتر شدن عمق نفوذ زیادتر می‌شود به طوری که برای هر سه نوع دیسک در عمق نفوذ ۷/۶ میلی‌متر افزایش سرعت از سرعت مبنا به ده برابر سرعت مبنا جهشی دو برابری را نشان می‌دهد.

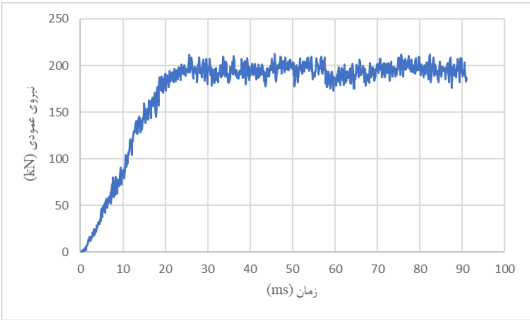
در عمق نفوذ ۷/۶ میلی‌متر نیروهای عمودی وارد بر دیسک با لبه V شکل ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب ۵۱/۳، ۷۸ و ۱۷۴ کیلونیوتن می‌باشد. در عمق نفوذ ۲/۵ و ۵/۱ هم با افزایش زاویه لبه دیسک نیروهای عمودی بیشتر می‌شود که این نتیجه‌گیری در تمامی سرعت‌ها قابل رویت می‌باشد. تاثیر نیروی چرخشی هم مانند نیروی عمودی با افزایش عمق نفوذ به سرعت بیشتر می‌شود. با این تفاوت که این افزایش برای دیسک ۶۰ درجه بر اثر افزایش سرعت از مبنا به ده برابر سرعت مبنا حدود سه برابر می‌باشد، این افزایش برای دیسک ۹۰ و ۱۲۰ حدود دو برابر می‌باشد.

نیروی چرخشی هم به مانند نیروی عمودی با زاویه دیسک رابطه مستقیم دارد، به عنوان مثال در عمق ۷/۶ میلی‌متر و سرعت مبنا نیروی چرخشی به ترتیب برای دیسک‌ها با لبه V شکل ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه ۵/۲، ۱۵/۳ و ۳۷/۷ کیلونیوتن می‌باشد. افزایش زاویه مشابه نیروی عمودی باعث افزایش نیروی چرخشی می‌شود، این نتیجه‌گیری برای عمق نفوذ ۲/۵ و ۵/۱ میلی‌متر نیز در تمامی سرعت‌ها صدق می‌کند.

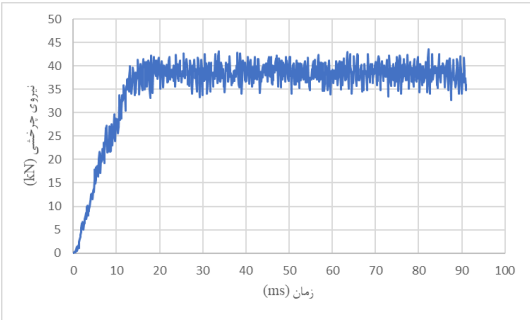
در شکل ۱۵ نمایی از مدل‌سازی برش خطی سنگ و در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب نیروی عمودی و چرخشی به‌وسیله دیسک برشی ۱۲۰ درجه در عمق نفوذ ۷/۶ میلی‌متر به نمایش در آمده است.



شکل ۱۵- نمایی از برش خطی سنگ شبیه‌سازی شده



شکل ۱۶- نیروی عمودی حاصل از شبیه‌سازی دیسک برشی ۱۲۰ درجه



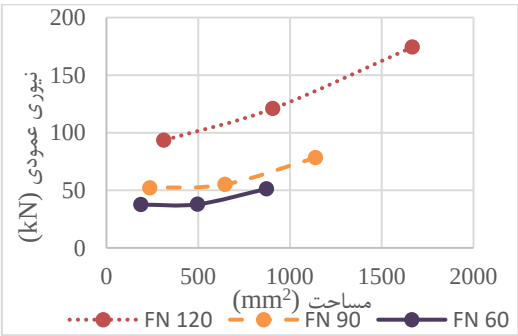
شکل ۱۷- نیروی عمودی حاصل از شبیه‌سازی دیسک برشی ۱۲۰ درجه

۴-۲- تاثیر مساحت در تماس دیسک برشی با لبه V شکل در شبیه‌سازی عددی

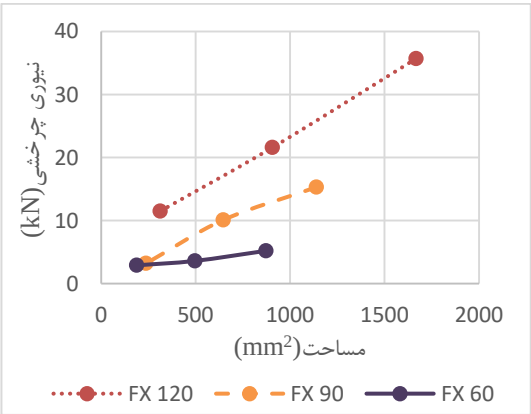
با توجه به نتایج حاصله که در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ آورده شده هرچه مساحت در تماس دیسک با لبه V شکل حین برش سنگ بیشتر باشد نیروی عمودی و چرخشی بیشتری نیز به سنگ وارد خواهد شد. از آنجا که مساحت درگیر با افزایش عمق نفوذ بیشتر می‌شود، می‌توان بجای محاسبه مساحت در تماس که دشوار است از آن چشم پوشی کرده و از عمق نفوذ استفاده شود با این وجود برای محاسبه مساحت در تماس دیسک برشی با لبه V شکل می‌توان از رابطه ۵ استفاده کرد. برای دستیابی به این رابطه ابتدا مساحت درگیر با سنگ برای هر سه دیسک ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه در سه عمق نفوذ ۲/۵، ۵/۱ و ۷/۶ میلی‌متر در نرم‌افزار *LS-PREPOST* محاسبه شده و سپس با استفاده از رگرسون در نرم‌افزار *Mini-Tab* رابطه زیر به‌دست آمده.

$$A = -919 + 7.38\varphi + 192.1\,P \qquad (۵)$$

که در آن φ زاویه لبه دیسک و P عمق نفوذ می‌باشد.



شکل ۱۸- تاثیر مساحت بر نیروی عمودی دیسک با لبه V شکل



شکل ۱۹- نمودار تاثیر مساحت بر نیروی چرخشی دیسک با لبه V شکل

۴-۳- تحلیل آماری تاثیر عمق نفوذ، سرعت، زاویه لبه و مساحت دیسک برشی V شکل بر نیروی عمودی و چرخشی

با استفاده از آنالیز رگرسیون چند جمله‌ای در نرم‌افزار *Mini-tab* می‌توان رابطه تجربی ساده بین متغیر هدف و چند متغیر مستقل را بررسی کرد. دو معیار مقدار پارامتر سطح معناداری *(P-Value)* کمتر از ۰/۰۵ (که نشان دهنده اهمیت بالای یک پارامتر و معنادار بودن رابطه بین پارامتر وابسته (یا ورودی) و پارامتر هدف در روش تحلیل رگرسیون است) و ضریب تورم واریانس *(VIF)* کمتر از ۱۰ (که بیانگر همبستگی کم بین پارامترهای وابسته است) برای تحلیل معناداری یک رابطه رگرسیون مورد استفاده قرار گرفته است. براین اساس، بررسی رابطه بین عمق نفوذ، سرعت خطی و چرخشی دیسک و نیروهای عمودی و چرخشی در سرعت‌های مختلف اعمال شده به دیسک برشی نشان می‌دهد که با افزایش عمق نفوذ و سرعت‌ها، مقادیر نیروها نیز افزایش می‌یابد و این نتیجه برای هر سه دیسک در هر سه سرعت مختلف یکسان است. با توجه به تاثیر سرعت خطی و دورانی در افزایش نیروها می‌توان استنباط کرد که دیسک‌های پیرامونی دستگاه حفار تمام مقطع تونل که دارای سرعت خطی بیشتری نسبت به دیسک‌های مرکزی هستند تحت نیروی بیشتری قرار دارند. همچنین نیروهای وارد بر سه دیسک با زاویه لبه *V* شکل در عمق نفوذهای مختلف نشان می‌دهد که دیسک با لبه *V* شکل داری زاویه لبه بیشتر به دلیل بیشتر بودن سطح تماس بین دیسک و سنگ تحت تاثیر نیروهای بیشتری نیز قرار دارد. روابط ۶، ۷ به ترتیب نیروی عمودی و چرخشی را بر حسب عمق نفوذ، سرعت و زاویه دیسک و روابط ۸ و ۹ برحسب مساحت در تماس با سنگ و عمق نفوذ محاسبه می‌کند.

$$\mathrm{FN} = 163.7 - 48.1\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) - 53.5\mathrm{P} - 38.7\mathrm{V} + 2.7P^2 + 25.9\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)\times\mathrm{P} + 21.5\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)\times\mathrm{V} + 7.8\mathrm{PV} \qquad R^2 = 0.89 \qquad (۶)$$

$$\mathrm{FR} = 33.7 - 53.3\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) - 4.0\mathrm{P} - 6.5\mathrm{V} + 17.9\left(\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right)^2 + 5.4\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)\times\mathrm{P} + 5.4\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)\times\mathrm{V} + 0.8\mathrm{PV} \qquad R^2 = 0.87 \qquad (۷)$$

$$\mathrm{FN} = -93 + 1.456\varphi + 7.88\mathrm{P} \qquad R^2 = 0.92 \qquad (۸)$$

$$\mathrm{FR} = 29.2 + 0.32\varphi + 2.52\mathrm{P} \qquad R^2 = 0.87 \qquad (۹)$$

در روابط بالا P عمق نفوذ برحسب میلی‌متر، Vسرعت خطی برحسب میلی‌متر بر ثانیه φ و زاویه دیسک برحسب درجه می‌باشد.

در این مقاله با انجام شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی در محیط نرم‌افزار *LS-DYNA* به بررسی تغییرات نیروهای عمودی و چرخشی وارده بر دیسک‌های برشی با لبه *V* شکل در اثر تغییر عمق نفوذ (که خود باعث تغییر مساحت دیسک در تماس با سنگ حین برش می‌شود) و سرعت‌های خطی و چرخشی دیسک در سنگ گرانیت قرمز کلرادو با مقاومت ۱۵۸ مگاپاسکال پرداخته شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که نیروهای یاد شده بسیار به تغییر عمق نفوذ حساس است و با افزایش عمق نفوذ از ۲/۵ به ۷/۶ میلی‌متر در سرعت مبنا، نیروهای عمودی برای دیسک‌هایی با زاویه لبه ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب حدود ۳۵، ۴۰ و ۸۰ درصد و نیروهای چرخشی ۷۹، ۹۶ و ۱۲۰ درصد افزایش می‌یابند که این افزایش نیرو در اثر عمق نفوذ مطابق با نتایج آزمون‌های گرش[۳] و راکسبور و فیلیپس[۹] می‌باشد. میزان این تغییرات نیرو برای سرعت‌های ۵ و ۱۰ برابر به مراتب بیشتر از سرعت مبنا می‌باشد اما میزان این تغییرات نسبت به سرعت مبنا زیاد نیست. با توجه به نتایج ذکر شده، افزایش سرعت موجب افزایش نیروها وارده بر دیسک می‌شود که آهنگ این افزایش برای نیروی عمود ۲۳/۸۵ کیلونیوتن و برای نیروی چرخشی ۳/۸۶ کیلونیوتن می‌باشد این افزایش نشان می‌دهد که به دیسک‌های پیرامونی به نسبت دیسک‌های مرکز در اثر سرعت خطی بیشتر نیروهای بیشتری نیز وارد می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که نیروها در دیسک با زاویه لبه بیشتر، زیادتر می‌باشد که بر اثر سطح تماسی بیشتر این دیسک‌ها با سنگ مورد خردایش می‌باشد.

از دیگر نتایج این پروژه دقت خوب شبیه‌سازی برش خطی سنگ به وسیله دیسک برشی با نرم¬افزار *LS-DYNA* می‌باشد، تنها شرط لازم برای حصول نتایج با کمترین میزان خطا دقت در مدل¬سازی اولیه برای اعتبار سنجی می‌باشد. اگر این مرحله که شامل انتخاب روش حل مسئله، انتخاب مدل رفتاری مواد و برخی دیگر از پارامترها می‌باشد به درستی انجام شود نتایج حاصله از دقت و صحت خوبی برخوردار می‌باشند. در انتها، با استفاده از روش رگرسیون چند جمله¬ای و با در نظر گرفتن سه پارامتر عمق نفوذ، زاویه دیسک و سرعت، رابطه‌ای برای برآورد نیروهای عمودی و چرخشی ارائه شده است.

d S. [1] Jeon, "Performance prediction of TBM disc cutting on granitic rock by the linear cutting test," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 21, no. 3–4, p. 271, 2006, doi: 10.1016/j.tust.2005.12.131.
[2] J. Rostami and L. Ozdemir, "Computer modeling of mechanical excavators cutterhead," 1996.
[3] R. Gertsch, L. Gertsch, and J. Rostami, "Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 44, no. 2, pp. 238–246, 2007, doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.07.007.
[4] J. W. Cho, S. Jeon, H. Y. Jeong, and S. H. Chang, "Evaluation of cutting efficiency during TBM

disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 35, no. April 2013, pp. 37–54, 2013, doi: 10.1016/j.tust.2012.08.006.

[5] J. W. Cho, S. Jeon, S. H. Yu, and S. H. Chang, "Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 230–244, 2010, doi: 10.1016/j.tust.2009.11.007.

[6] J. Rostami and L. Ozdemir, "A new model for performance prediction of hard rock TBMs. In: Proceedings of the rapid excavation and tunneling conference," 1993.

[7] A. Bruland, *Norwegian TBM tunneling - Publication No. 11*, no. 11. 1998.

[8] R. J. Fowell, "The mechanics of rock cutting," *Compr. rock Eng. Vol. 4*, vol. 9, no. February 1971, pp. 155–176, 1993, doi: 10.1016/b978-0-08-042067-7.50014-3.

[9] F. F. Roxborough and H. R. Phillips, "Rock excavation by disc cutter," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 12, no. 12, pp. 361–366, 1975, doi: 10.1016/0148-9062(75)90547-1.

[10] F. D. Wang and L. Ozdemir, "Tunnel-boring penetration rate and machine design," *Transp. Res. Rec.*, no. 684, 1978.

[11] H. P. Sanio, "Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 22, no. 3, pp. 153–161, 1985, doi: 10.1016/0148-9062(85)93229-2.

[12] E. Farrokh, J. Rostami, and C. Laughton, "Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 30, pp. 110–123, 2012, doi: 10.1016/j.tust.2012.02.012.

[13] S. Yagiz, "Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 326–339, 2008, doi: 10.1016/j.tust.2007.04.011.

[14] Z. Zhao, Q. Gong, Y. Zhang, and J. Zhao, "Prediction model of tunnel boring machine performance by ensemble neural networks," *Geomech. Geoengin.*, vol. 2, no. 2, pp. 123–128, 2007, doi: 10.1080/17486020701377140.

[15] P. L. Menezes, M. R. Lovell, I. V. Avdeev, J. S. Lin, and C. F. Higgs, "Studies on the formation of discontinuous chips during rock cutting using an explicit finite element model," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 70, no. 1–4, pp. 635–648, 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5309-y.

[16] N. Innaurato, C. Oggeri, P. P. Oreste, and R. Vinai, "Experimental and numerical studies on rock breaking with TBM tools under high stress confinement," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 40, no. 5, pp. 429–451, 2007, doi: 10.1007/s00603-006-0109-4.

[17] I. B. Tulu and K. A. Heasley, "Calibration of 3D cutter-rock model with single cutter tests," 2009.

[18] X. C. Tan, S. Q. Kou, and P. A. Lindqvist, "Application of the DDM and fracture mechanics model on the simulation of rock breakage by mechanical tools," *Eng. Geol.*, vol. 49, no. 3–4, pp. 277–284, 1998, doi: 10.1016/S0013-7952(97)00059-8.

[19] Chun'an Tang, "Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity," *Int. J. rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol. 34, no. 2, pp. 249–261, 1997, doi: 10.1016/S0148-9062(96)00039-3.

[20] C. A. Tang, Y. F. Fu, S. Q. Kou, and P.-A. Lindqvist, "Numerical simulation of loading inhomogeneous rocks," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 35, no. 7, pp. 1001–1007, 1998.

[21] G. Li, B. Wang, Y. Chen, and W. Wang, "Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by TBM cutters," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 249–250, pp. 1069–1072, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.249-250.1069.

[22] H. Li and E. Du, "Simulation of rock fragmentation induced by a tunnel boring machine disk cutter," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 6, p. 1687814016651557, 2016.

[23] W. Duan, L. Zhang, M. Zhang, Y. Su, J. Mo, and Z. Zhou, "Numerical and experimental studies on the effects of the tbm cutter profile on rock cutting," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 26, pp. 416–432, 2022.

[24] B. Yu and W. Virginia, "Numerical Simulation of Continuous Miner Rock Cutting Process Numerical Simulation of Continuous Miner Rock Cutting Process," 2005.

[25] M. C. Jaime, "Numerical modeling of rock cutting and its associated fragmentation process using the finite element method." University of Pittsburgh, 2011.

[26] J. Rostami, "Development of a Force Estimation Model for Rock Fragmentation With Disc Cutters Through Theoretical Modeling and Physical Measurement," no. August, 1997.

[27] T. J. Holmquist, G. R. Johnson, and W. H. Cook, "A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures The 14th International Symposium on Ballistics." Qucbec, 1993.

[28] S. P. Shah, S. E. Swartz, and C. Ouyang, *Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*. John Wiley & Sons, 1995.

[29] M. Kucewicz, P. Baranowski, and J. Małachowski, "Dolomite fracture modeling using the Johnson-Holmquist concrete material model: Parameter determination and validation," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 2020, doi: 10.1016/j.jrmge.2020.09.007.