



بررسی تاثیر عمق نفوذ و سرعت دیسک بر نیروهای برش سنگ بر اساس نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار LS-DYNA

شاهین فتاحی دهکبودی^۱، ابراهیم فرخ^{۲*}، داود لطفی^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- شرکت تونل‌ساز ماشین، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۳۱

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳

کلمات کلیدی:

دیسک برشی

شبیه‌سازی با LS-DYNA

آزمایش برش خطی سنگ

نیروی عمودی

نیروی غلطشی

خلاصه: نیروهای اعمال شده به دیسک‌های برشی از جمله مهم‌ترین پارامترهای طراحی ماشین‌های حفار در زمین‌های سخت هستند. این نیروها شامل نیروی عمودی و غلطشی می‌باشند. برای طراحی ماشین حفار نیاز به بررسی دقیق نیروهای یادشده می‌باشد که تحت تاثیر عواملی چون عمق نفوذ، فاصله‌داری، سرعت خطی و چرخشی دیسک تغییر می‌کنند. از این رو نیاز به آزمایشات برش خطی برای درک تاثیر هریک از موارد یاد شده می‌باشد. از آنجا که آزمایشات برش خطی زمان‌بر و پرهزینه است شبیه‌سازی‌های عددی با دقت زیاد می‌تواند جایگزین مناسبی باشد. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA ابتدا شبیه‌سازی‌های لازم برای اعتبارسنجی با بررسی دو مدل رفتاری جانسون هالکوتیست بتن (JHC) و RHT انجام شده است. پس از این مرحله با تکیه بر تغییر متغیرهایی از جمله عمق نفوذ، سرعت خطی و چرخشی دیسک به بررسی تاثیر آن‌ها پرداخته شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، عمق نفوذ پارامتری بسیار موثر بر نیروی عمودی است. با افزایش عمق نفوذ از ۲/۵ به ۷/۶ میلی‌متر نیروی عمودی از ۹۶ به ۱۵۹ کیلونیوتن می‌رسد. این نتیجه با تاثیری بیشتر برای نیروی غلطشی صادق می‌باشد، به این صورت که نیروی غلطشی از ۶/۱ به ۲۲/۵ کیلونیوتن افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت خطی و چرخشی دیسک‌ها، نیروهای عمودی و غلطشی کاهش می‌یابد، اما مقدار این کاهش بسیار کم است. بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش سرعت خطی از ۰/۳۳ به ۱/۶۵ میلی‌متر تنها باعث کاهش ۱۳ درصدی نیروی عمودی (از ۱۵۵ به ۱۳۵ کیلونیوتن) و کاهش ۵ درصدی نیروی غلطشی (از ۲۰/۶ به ۱۹/۵ کیلونیوتن) می‌شود.

۱- مقدمه

ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل (TBM¹) به‌طور گسترده در ساخت تونل برای اهداف مختلف مانند بزرگراه‌ها و متروها استفاده شده‌اند. طراحی کله حفار یکی از جنبه‌های اصلی و حیاتی فرآیند تولید ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل است. قطر کله، تعداد دیسک، نیروی رانش، نیروی غلطشی، عمق نفوذ و فاصله دیسک‌ها از جمله پارامترهای مهم در طراحی کله حفار هستند.

در این میان نیروهای عمودی، فاصله مناسب دیسک‌ها و عمق نفوذ از عوامل اصلی موثر بر راندمان دیسک‌های برشی هستند [۱]. دیسک برشی ابزار اصلی استفاده شده توسط ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل برای خرد کردن سنگ است. بنابراین، تجزیه و تحلیل نیروهای عمودی و غلطشی وارد بر دیسک برای طراحی بهینه کله ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل و بهبود

راندمان برش ضروری است.

برای تعیین نیروهای وارد بر دیسک‌ها و برای ایجاد تنظیمات بهینه برش، آزمایش ماشین برش خطی در مقیاس کامل (LCM²) به عنوان یک روش قابل اعتماد تایید شده است [۲-۵]. اگرچه آزمایش‌های تمام مقیاس مزایای قابل توجهی دارند، اما نیازمند هزینه و زمان بسیاری هستند [۶]. برای حل این مشکل مدل‌های پیش‌بینی معروفی به عنوان مثال مدل مدرسه معدن کلرادو (CSM³) [۶] و دانشگاه علم و فناوری نروژ [۷] برای پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل ایجاد شده‌اند. در تحقیقات گذشته، نمونه‌های متعددی از فرمول‌های نظری و نیمه نظری را می‌توان پیدا کرد [۸-۱۴]. با این حال، این مدل‌های تحلیلی فقط می‌توانند تخمین تقریبی از نیروهای وارد بر دیسک را ارائه دهند [۱۵]. از جمله این روش‌ها می‌توان به پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل با استفاده از شاخص

2 Liner cutting machine
3 Colorado school of mine

1 Tunnel boring machine

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.farrokh@aut.ac.ir



برش خطی سنگ استفاده کردند.

یو [۲۵] از نرم افزار LS-DYNA برای شبیه سازی چرخش کله حفار در حین برش سنگ استفاده کرده است. جیمه [۲۶] حالت شکست را در برش خطی با استفاده از نرم افزار LS-DYNA بازتولید کرده است و با موفقیت حالت شکست و خرد شدن را در برش های کم عمق، ایجاد ترک، انتشار ترک و برش دینامیک را در برش های عمیق مدل سازی کرده است.

با توجه به توضیحات گفته شده هدف اصلی این مقاله بررسی تاثیر در تغییر عمق نفوذ و سرعت خطی و چرخشی بر نیروی عمودی و غلطشی اعمال شده به دیسک می باشد، که با بهره گیری از روش اجزای محدود و نرم افزار LS-DYNA انجام گرفته که مزیت آن نسبت به انجام آزمایش برش خطی شامل صرف هزینه و زمان کمتر، عدم نیاز به تکرار آزمایش در صورت تغییر هر یک از متغیرها و پارامترها و همچنین قابلیت تعمیم آن برای انواع دیسک و سنگ می باشد. همچنین تمامی مطالعات انجام گرفته تا به امروز برای حالت تک دیسک یا دو دیسک در کنار هم بوده است. در این مقاله حالت سه دیسک در کنار هم مطالعه شده است. این باعث می شود که شرایط مرزی تنها بر دیسک های کناری اثر گذار باشد و دیسک میانی مشابه شرایط واقعی تنها متاثر از فاصله داری دیسک های کناری باشد. موضوع مهم دیگر این است که سرعت خطی دیسک های پیرامونی کله حفار به نسبت دیسک های میانی به مراتب بیشتر می باشد و بررسی تاثیر سرعت خطی بر نیروهای وارده بر دیسک از جمله مواردی است که در مطالعات قبلی به آن پرداخته نشده است و در مطالعه حاضر به صورت جزئی مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که آزمایش های آزمایشگاهی عموماً بر اساس سرعت خطی متوسط دیسک ها انجام می شود، اما در عمل سرعت خطی دیسک ها متفاوت بوده و این سرعت برای دیسک های پیرامونی کله حفار به مراتب بیشتر از دیسک های میانی است، از این رو بررسی تاثیر سرعت بر نیروها از اهمیت به سزایی برخوردار می باشد چون گشتاور کله حفار عمدتاً متاثر از نیروهای دیسک های پیرامونی کله حفار است.

در این زمینه برای حصول نتایج قابل اعتماد در این مقاله، مطالعات در سه بخش به شرح زیر انجام شده است:

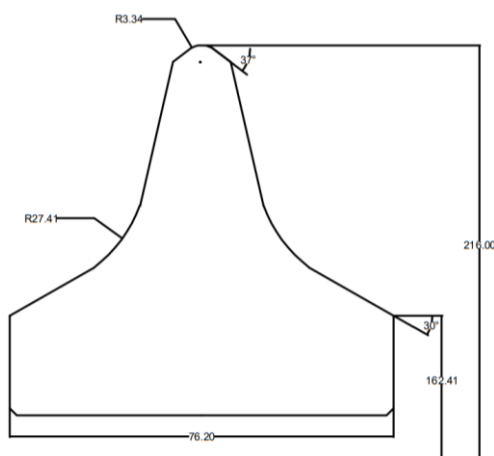
- اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی برای آزمایش برش خطی سنگ قرمز کلرادو.
- بررسی مدل های رفتاری مختلف برای سنگ و انتخاب مناسب ترین مدل با توجه به اهداف مقاله.
- بررسی سرعت های خطی و چرخشی مختلف دیسک و تاثیر آن

کیفیت توده سنگ (Q_{TBM}) اشاره نمود. سیستم های طبقه بندی توده سنگ مانند سیستم Q و سیستم رتبه بندی توده سنگ (RMR^1) نیز برای تخمین عملکرد ماشین های حفار تمام مقطع تونل استفاده شده اند [۱۶]. ژائو و همکاران [۱۷] یک مدل پیش بینی عملکرد TBM را با استفاده از تحلیل شبکه عصبی مجموعه ای برای توده های سنگ گرانبی ایجاد کردند.

مدل های پیش بینی تجربی عمدتاً بر اساس تجربه و داده های ثبت شده قبلی در این زمینه ایجاد می شوند. دقت و قابلیت اطمینان این مدل ها به کیفیت و میزان داده های موجود بستگی دارد. به طور کلی جمع آوری مقادیر قابل توجهی از داده ها با کیفیت بالا دشوار است.

محققان متعددی از مدل سازی عددی برای شبیه سازی برش سنگ توسط ماشین های حفار تمام مقطع تونل استفاده کرده اند. پیش بینی فرآیند برش سنگ با استفاده از روش های عددی مختلف توسط منز و همکاران بررسی شده است [۱۸]. اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه، به دلیل سادگی بر روی مدل سازی برش خطی متمرکز بوده است. چندین روش برای شبیه سازی فرآیند برش استفاده شده است مانند روش تفاضل محدود (FDM^2)، روش المان مجزا (DEM^3) و روش اجزای محدود (FEM^4). برای مثال، برنامه فلک (FLAC) از یک روش حل معادلات دیفرانسیل محدود صریح برای کاربردهای مهندسی مکانیک محاسباتی استفاده می کند. ایناوراتو و همکاران [۱۹] شکستگی سنگ و تشکیل تراشه با یک دیسک برشی را به وسیله مدل موهر کلمب شبیه سازی و مطالعه کردند. تولو و هاسلی [۲۰] کد تجاری دیفرانسیل محدود سه بعدی فلک را برای شبیه سازی برش شیار دایره ای به کار گرفتند. یک مدل فرورفتگی سنگ توسط تان و همکاران [۲۱] توسعه داده شد که در آن یک معیار انرژی اصلاح شده در یک کد ناپوستگی جابجایی گنجانده شده است. تانگ [۲۲] یک رویکرد عددی با عنوان تجزیه و تحلیل فرآیند شکست سنگ بر اساس اجزا محدود ایجاد کرد. تانگ و همکاران [۲۳] شکستگی سنگ حاوی دانه ها یا همان آخال ها را با استفاده از تجزیه و تحلیل فرآیند شکست سنگ شبیه سازی کردند. لیو و همکاران [۲۴] شبیه سازی برش سنگ به روش اجزا محدود را با کد $R-T^{2D}$ برای ارزیابی فرآیند تشکیل تراشه و برش سنگ ناشی از یک یا دو دیسک را انجام دادند. چو و همکاران [۱] از روش اجزا محدود با نرم افزار ادغام زمان صریح اتوداین سه بعدی برای شبیه سازی فرآیند شکست سنگ در طول آزمایش

-
- 1 Rock mass rating
 - 2 Finite difference method
 - 3 Discrete element method
 - 4 Finite element method



شکل ۱. نیمرخ عرضی دیسک ۱۷ اینچی کد A30581 (تمامی مقادیر ذکر شده داری واحد mm و درجه می‌باشند.) که در آزمایش‌های برش خطی مدرسه معدن کلرادو بر روی گرانیت قرمز کلرادو مورد استفاده قرار گرفته است [۲۸].

Fig. 1. Transverse profile of the 17-inch disc code A30581 (all values are in mm and degrees) used in the Colorado School of Mines linear cutting tests on Colorado red granite [28]

می‌تواند در بسیاری از مسائل دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد [۲۷].

بر مقادیر نیروها.

۲-۲- اعتبار سنجی و خصوصیات سنگ

در شبیه‌سازی‌ها از نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده بر روی سنگ قرمز کلرادو توسط گرش و همکاران [۲]، به عنوان مبنایی برای اعتبار سنجی شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. کانی‌های تشکیل دهنده سنگ گرانیت قرمز کلرادو، فلدسپات، کوارتز و بیوتیت است. بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط گرش و همکاران [۲]، مقاومت فشاری و کششی تک محوره به ترتیب ۱۵۸ و ۶/۹ مگاپاسکال، چگالی سنگ ۲۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول برشی ۱۶/۶۱ گیگاپاسکال، و مدول حجمی آن ۲۵/۷ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

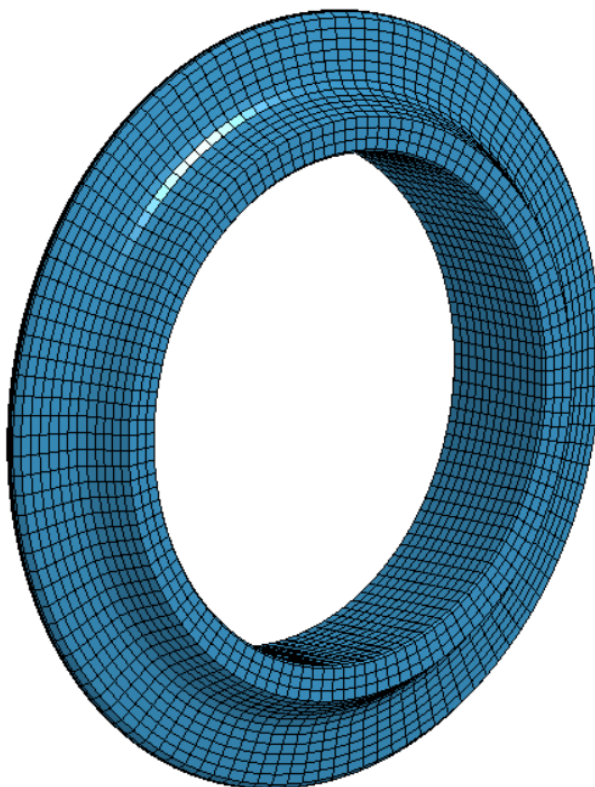
۲-۳- ویژگی دیسک

در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای کاهش متغیرهای مسئله و مقایسه دقیق‌تر نتایج تنها از دیسک مورد استفاده گرش و همکاران استفاده شده است که در شکل ۱ نیمرخ از دیسک مذکور و در شکل ۲ هندسه طراحی شده دیسک در نرم‌افزار LS-PREPOST نشان داده شده لازم به ذکر است که مجموع تعداد المان در نظر گرفته شده دیسک برشی در شبیه‌سازی‌ها ۱۰۵۶۰ المان می‌باشد.

۲- مدلسازی

۲-۱- معرفی نرم‌افزار LS-DYNA

LS-DYNA یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهایی است که امروزه برای شبیه‌سازی پدیده‌های دینامیکی پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار در سال ۱۹۷۶ در موسسه لیور مور لورنس کالیفرنیا تولید شد که علاوه بر تحلیل‌های دینامیکی قادر به حل مسائل مختلف فیزیکی از جمله مکانیک جامدات، انتقال حرارت و دینامیک سیالات می‌باشد. نرم‌افزار LS-DYNA به صورت یکپارچه نبوده و قسمت‌های مختلف آن به صورت مجزا تشکیل می‌شوند. به این صورت که عملیات پیش‌پردازش و نمایش نتایج حاصله از شبیه‌سازی در نرم‌افزاری LS-PREPOST انجام می‌شود. کد خروجی که شامل اطلاعاتی مثل شرایط کنترل حل مسئله و دریافت خروجی، نوع بارگذاری‌ها و قیدها، مختصات المان‌ها و گره‌ها، نوع الگوریتم‌های برخورد و موارد دیگر می‌باشد به قسمت حل مسئله وارد شده و محاسبات انجام می‌شود. توان بالای این کد در تحلیل مسائل انفجار، انتشار امواج شوک، شکل‌دهی فلزات با تغییر شکل‌های زیاد، برخورد اجسام، نفوذ پرتابه در هدف، برش سنگ و غیره با داشتن تقریباً ۲۰۰ نوع مدل ماده و ۱۳ نوع معادله حالت و انواع روش‌های تماس سطوح این کد را به یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی تبدیل کرده است که



شکل ۲. نمایی از دیسک ۱۷ اینچی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار LS-DYNA

Fig. 2. A view of the 17-inch disc simulated in LS-DYNA software

لاگرانژ^۱ و SPH^۲ اشاره کرد. روش حل SPH روش حلی دقیق و واقعی‌تر نسبت به روش لاگرانژ می‌باشد اما با توجه به حجم محاسبات زیاد در آن، این روش نیازمند سیستم رایانه‌ای قوی و صرف زمان حل بسیار زیاد و طاقت فرسا بوده و همچنین یکی دیگر از مشکلات این روش، پیچیدگی در ایجاد شرایط مرزی است، از آنجا که روش SPH به صورت ذرات کروی جدا از هم می‌باشد، باید دقت شود که ذرات به مرزهای یکدیگر نفوذ نکنند، چرا که نفوذ ذرات در یکدیگر از دقت مسئله به شدت می‌کاهد. با توجه به مطالب گفته شده در ارتباط با روش SPH از این روش چشم پوشی شده و فقط به شبیه‌سازی برش خطی سنگ با روش لاگرانژی اکتفا شده است. شایان ذکر است که در روش حل لاگرانژی، گره‌های شبکه لاگرانژی به اجزای ماده مورد نظر متصل هستند و لذا هر گره، یک جز از ماده را دنبال می‌کند، در نتیجه مش مسئله همراه با ماده مانند شکل ۴ تغییر شکل می‌دهد و

۲-۴- ویژگی سنگ

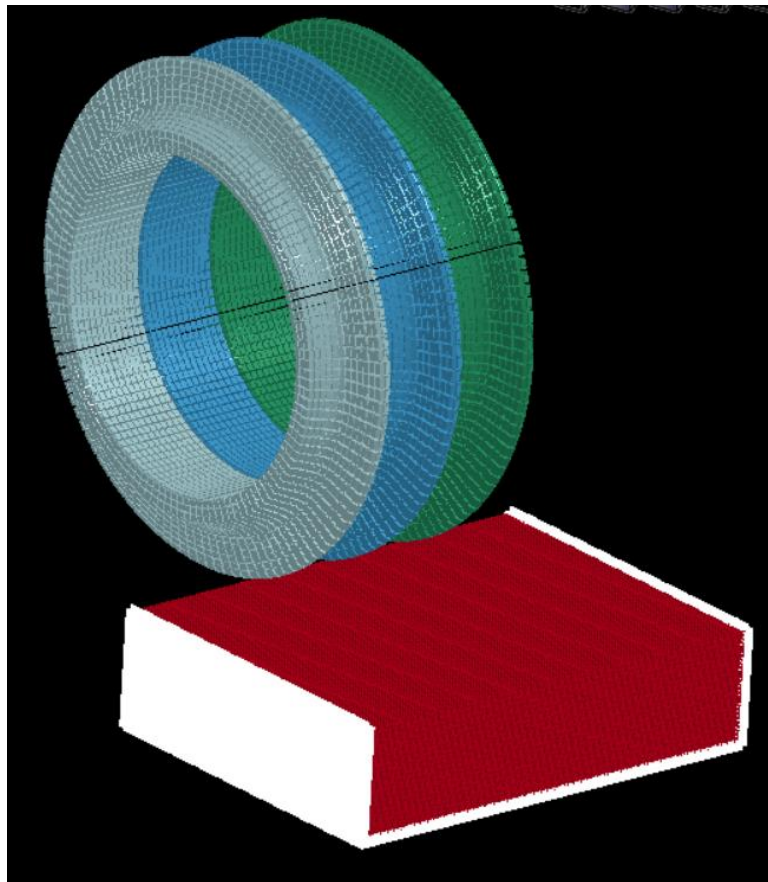
سنگ طراحی شده دارای ابعاد ۳۰۰×۱۰۰×۴۰۰ میلی‌متر بوده و هریک از المان‌ها داری اندازه ۲ میلی‌متر مکعب است که در مجموع تعداد کل المان‌های سنگ ۱۵۰۰۰۰۰ می‌باشد. همانطور که در شکل ۳ نمایش داده شده با توجه به شرایط حاکم بر آزمایش برش خطی سنگ به وسیله گرش و همکاران در شبیه‌سازی انجام شده، حرکت سنگ از دو طرف و همچنین از قسمت زیرین محدود شده است. این محدودیت در آزمایش و شبیه‌سازی برای جلوگیری از حرکت سنگ در اثر اعمال نیرو به وسیله دیسک برشی تعریف شده است.

۲-۵- روش حل

روش‌های المان محدود مختلفی برای مدل‌سازی پدیده‌های دینامیکی در نرم‌افزار LS-DYNA قرار دارد که می‌توان از آن‌ها به روش‌های

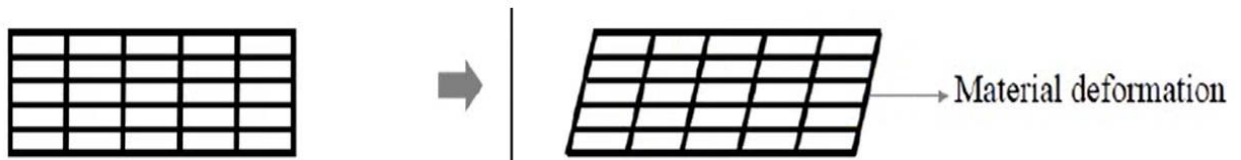
1 Lagrange

2 Smooth particle hydrodynamics



شکل ۳. نمایی از سنگ به همراه سه دیسک و شرایط مرزی حاکم بر مسئله

Fig. 3. A view of the rock, three discs, and the boundary conditions



شکل ۴. نمایی از تغییر شکل مش بندی همراه با هندسه مسئله در روش لاگرانژی

Fig. 4. A view of the mesh deformation along with the geometry of the problem in the Lagrangian method

نشده‌اند [۳۱]. به طور کلی، مدل JHC خواص مقاومت نامتقارن مواد را تحت بارهای کششی و فشاری متمایز می‌کند. مدل جانسون هالمکوئیست فشار داخلی و تنش دیفرانسیلی را در حالت ماده تغییر شکل یافته برای تعیین مقاومت واقعی مرتبط می‌کند. تنش معادل نرمال شده (σ^*) ناشی از تنش‌های دیفرانسیلی، استفاده از مقاومت فشاری محدود نشده تک محوری شبه استاتیکی (UCS^2) f_c' به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$\sigma^* = \sigma / f_c' \quad (1)$$

که σ تنش معادل واقعی است. سطح تسلیم با معادله زیر ارائه می‌شود که مدل سازنده نامیده می‌شود [۳۰]:

$$\sigma^* = [A(1-D) + B(p^*)^N] [1 + C \ln(\epsilon^*)] \quad (2)$$

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 شوندهگی فشار نرمال شده، N ضریب سختی فشاری، C ضریب نرخ کرنش است. σ_m^* فشار نرمال شده است که با رابطه $\sigma_m^* = \sigma_m / f_c'$ محاسبه و σ_m ذکر شده در آن هم با رابطه $\sigma_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}$ به دست می‌آید که سه تنش ذکر شده در این معادله سه مولفه تنش نرمال تانسور تنش هستند. ϵ^* نرخ کرنش نرمال شده ماده است و با $\epsilon^* = \epsilon / \epsilon_0$ محاسبه می‌شود که در آن نرخ کرنش مرجع ϵ_0 (اکثراً $1S^{-1}$ در نظر گرفته می‌شود) و D فاکتور آسیب است و مقداری از صفر برای مواد آسیب ندیده تا یک برای مواد کاملاً آسیب دیده و شکسته را به خود اختصاص می‌دهد. در تعاریف فوق نرمال سازی با تقسیم مقدار یک پارامتر بر f_c' محاسبه شده است.

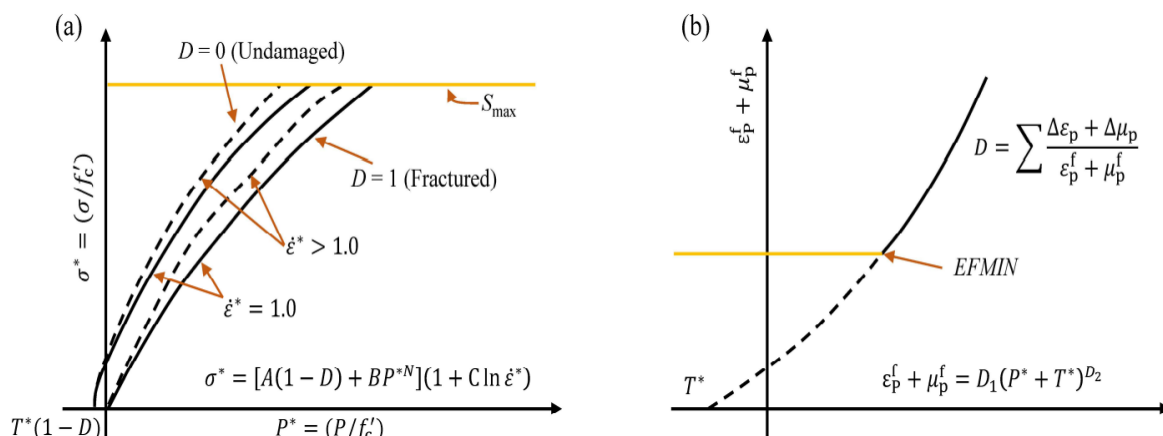
نمایش گرافیکی معادله (۲) در شکل ۵ ارائه شده است. در مدل جانسون هالمکوئیست بتن (JHC)، آسیب مواد به شکل کاهش تدریجی سختی آن تا رسیدن به سطح شکست بحرانی که مقاومت باقیمانده را مشخص می‌کند، محسوب می‌شود. مواد کاملاً آسیب دیده یا همان خرد شده فقط می‌توانند بارهای فشاری را منتقل کنند در نتیجه مدل حالتی که ایجاد می‌شود در آن ماده خرد شده به شکل سنگدانه بدون مقاومت کششی است.

جرم، گشتاور و انرژی داخل شبکه‌ها ثابت می‌ماند [۲۹]. باید دقت شود که تغییر شکل‌های بسیار زیاد که باعث ایجاد زوایای خیلی کوچک و یا زوایای باز بسیار بیشتر از زاویه قائمه می‌شود، باعث بروز خطای محاسباتی در روش لاگرانژ می‌شود. به همین دلیل این روش مناسب مسائل همراه با تغییر شکل‌های زیاد نمی‌باشد. بهترین روش مش بندی در روش لاگرانژ به صورت مش‌های منظم یک شکل و یک اندازه می‌باشد که هرچه المان‌های تشکیل شده به مکعب مربع نزدیک‌تر باشند میزان خطای روش لاگرانژی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که برای یافتن اندازه بهینه المان‌ها در زیر دیسک، تعدادی مدل‌سازی آزمایشی با اندازه مش‌های مختلف با المان‌های مکعب مربع انجام گرفت. زمانی که اندازه مش به حالت بهینه برسد، جواب‌ها به یک عدد خاص که جواب مسئله می‌باشد همگرا می‌شود و کوچک کردن المان‌ها دیگر تاثیر چندانی بر جواب‌های حاصله از مدل‌سازی نمی‌گذارد. در این مسئله تاثیر اندازه ضلع‌های کمتر از ۲ میلی‌متر بر نیروهای عمودی و چرخشی بسیار ناچیز بوده است. در نتیجه اندازه مناسب ضلع‌های المان‌های مکعب مربع، ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

۲-۶- 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 است.

برای شبیه‌سازی سنگ نیز از مدل رفتاری جانسون هالمکوئیست مخصوص بتن (JHC^1) استفاده شده است که در ابتدا برای شبیه‌سازی رفتار بتن تحت فشارهای زیاد و نرخ کرنش بالا توسعه داده شده است [۳۰]. بتن و سنگ هر دو مواد شبه شکننده با مکانیسم شکست مشابه هستند، اما دو تفاوت عمده وجود دارد. اولاً سنگ از طریق فرآیندهای طبیعی ایجاد می‌شود و نمونه‌هایی از توده سنگ درجا با استفاده از فرآیندهای مکانیکی مانند برش به دست می‌آید. در مقابل، بتن ماده‌ای است که در شرایط آزمایشگاهی از چندین جز (آب، سنگدانه و سیمان) ایجاد می‌شود. ثانیاً، سنگ دارای صفحاتی است که بر ناهمسانگردی خواص مکانیکی آن تاثیر می‌گذارد، و این صفحات در بسیاری از مدل‌های سازنده متداول برای مواد ترد گنجانده



شکل ۵. شکل سطوح شکست و تابع تکامل آسیب در مدل جانسون هالمکوئیست بتن (JHC) [۳۲]

Fig. 5. The shape of the failure surfaces and damage evolution function in the Johnson Halmquist Concrete (JHC) model [32]

مدل‌های دیگری نیز مانند RHT² قابل استفاده بودند اما RHT برخلاف رفتار مناسب در گزارش ناحیه شکست، برای گزارش نیروی عمودی و غلطی با توجه به تغییر عمق نفوذ و سرعت رفتار مناسبی نسبت به مدل جانسون هالمکوئیست که ناحیه شکست را کمتر از واقعیت گزارش کرده از خود نشان نمی‌دهد، به همین دلیل از مدل RHT چشم پوشی کرده و فقط به مدل جانسون هالمکوئیست بتن اکتفا شده است.

برای افزایش دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده، برش هم زمان سه دیسک با فاصله‌داری معین در نظر گرفته شده است. در این زمینه برای جلوگیری از اثر شرایط مرزی بر روی نیروهای دیسک برشی، تنها نیروهای اعمال شده به دیسک وسط برای محاسبه و مقایسه مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی

برای اعتبارسنجی و یافتن میزان خطای شبیه‌سازی ۳ شبیه‌سازی مطابق با آزمایشات برش خطی گرش و همکاران [۴] مورد بررسی قرار گرفته است:

- مقاومت سنگ : ۱۵۸ MPa
- سرعت چرخشی دیسک : ۰/۰۰۱۵ رادیان بر میلی ثانیه
- سرعت برش خطی دیسک : ۰/۳۳ میلی متر بر میلی ثانیه

پارامتر آسیب D توسعه‌ای از مدل جانسون کوک (JC¹) است و کرنش پلاستیک با افزایش کرنش حجمی (برای در نظر گرفتن تراکم پذیری هیدرواستاتیک) مطابق با معادله زیر حساب می‌شود [۳۰]:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p \Delta \mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (3)$$

که در آن $\Delta \epsilon_p$ و $\Delta \mu_p$ به ترتیب کرنش پلاستیک و کرنش حجمی پلاستیک معادل هستند و $\epsilon_p^f + \mu_p^f$ کرنش پلاستیک برای شکستن تحت فشار ثابت p است و به صورت زیر بیان می‌شود [۳۰]:

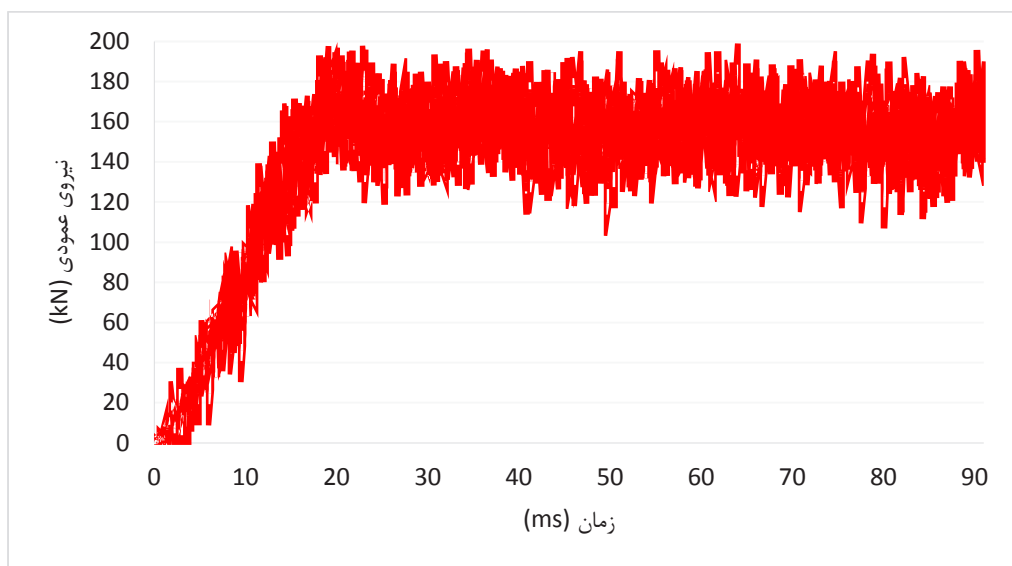
$$\epsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(p^* + T^*)^{D_2} \geq \epsilon_{f \min} \quad (4)$$

که در آن D_1 و D_2 ثابت، p همانطور که قبلاً تعریف شد فشار ثابت است. حداکثر فشار هیدرواستاتیک کششی نرمال شده $T^* = \frac{f_t}{f_c}$ است که ft مقاومت کششی تک محوری، $\epsilon_{f \min}$ برای ایجاد مقدار محدودی از کرنش پلاستیکی برای شکستن مواد ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایشات برش خطی گرش و همکاران

Table 1. Comparison of results obtained from simulation and linear cutting experiments by Gersh et al.

درصد خطای نیروی غلطشی	درصد خطای نیروی عمودی	نیروی غلطشی شبیه‌سازی (kN)	نیروی غلطشی واقعی (kN)	نیروی عمودی شبیه‌سازی (kN)	نیروی عمودی واقعی (kN)	نفوذ (mm)
-۸/۴۴	-۲/۵۲	۲۰/۶	۲۲/۵	۱۵۵	۱۵۹	۷/۶
-۱۹/۱۴	-۰/۷۰	۱۱/۳۵	۱۴	۱۲۸/۱	۱۲۹	۵/۱
۲۰/۹۸	-۱/۳۳	۷/۳۸	۶/۱	۹۴/۷۲	۹۶	۲/۵



شکل ۶. نیروی عمودی دیسک شبیه‌سازی شده در عمق نفوذ ۷/۶ میلی‌متر

Fig. 6. The normal force of the simulated disc at the penetration depth of 7.6 mm

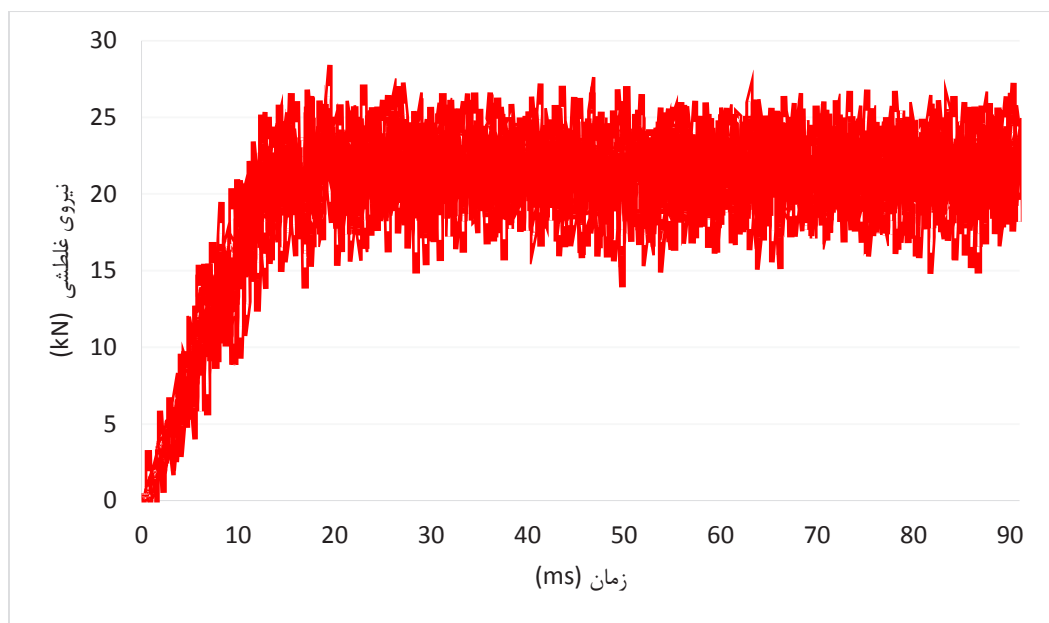
۳۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. نتایج حاصله برای نیروی عمودی میزان خطایی کمتر از ۳ درصد را نشان می‌دهد که از دقت خوبی برخوردار می‌باشد، اما برای نیروی غلطشی میزان این خطا کمتر از ۲۱ درصد است که به مراتب از خطای نیروی عمودی بیشتر است.

۴- تغییر پارامترهای عمق نفوذ و سرعت دیسک در شبیه‌سازی

در این قسمت با توجه به هدف اصلی تحقیق که بررسی تاثیر تغییر عمق نفوذ، سرعت خطی و سرعت چرخشی دیسک می‌باشد و بررسی‌های

- عمق نفوذ: ۲/۵، ۵/۱ و ۷/۶ میلی‌متر
- فاصله داری: ۷۶ میلی‌متر

لازم به ذکر است در این مقاله بررسی‌ها فقط برای فاصله‌داری ۷۶ میلی‌متر سه دیسک انجام شده است که نتایج حاصله برای سایر فواصل دیسک‌ها نیز قابل تعمیم و توسعه می‌باشد. جدول ۱ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده با نتایج آزمایش برش خطی گرش و همکاران [۲] را نشان می‌دهد، همچنین شکل ۶ و ۷ به ترتیب نمودار نیروهای عمودی و غلطشی دیسک شبیه‌سازی شده در عمق نفوذ ۷/۶ میلی‌متر را در طول



شکل ۷. نیروی غلطشی دیسک شبیه‌سازی شده در عمق نفوذ ۷/۶ میلی‌متر

Fig. 7. The rolling force of the simulated disc at the penetration depth of 7.6 mm

آزمایش گرش و همکاران [۲] و چه در شبیه‌سازی‌ها با سرعت‌ها مختلف، افزایش عمق نفوذ نیروی عمودی را افزایش می‌دهد. این نتیجه با نتایج ارائه شده توسط راکسبور و فیلیپس [۱۰]، هیون لی [۳۳] و گرش و همکاران [۲] تطابق خوبی داشته و نشان می‌دهد که تاثیر تغییر عمق نفوذ دیسک بسیار بیشتر از تاثیر تغییر سرعت بر نیروی عمودی می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش عمق از تاثیر سرعت کاسته می‌شود به گونه‌ای که ما بین نیروی‌های عمودی بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها با سرعت‌ها ۱، ۵ و ۱۰ برابر تفاوت محسوسی دیده نمی‌شود.

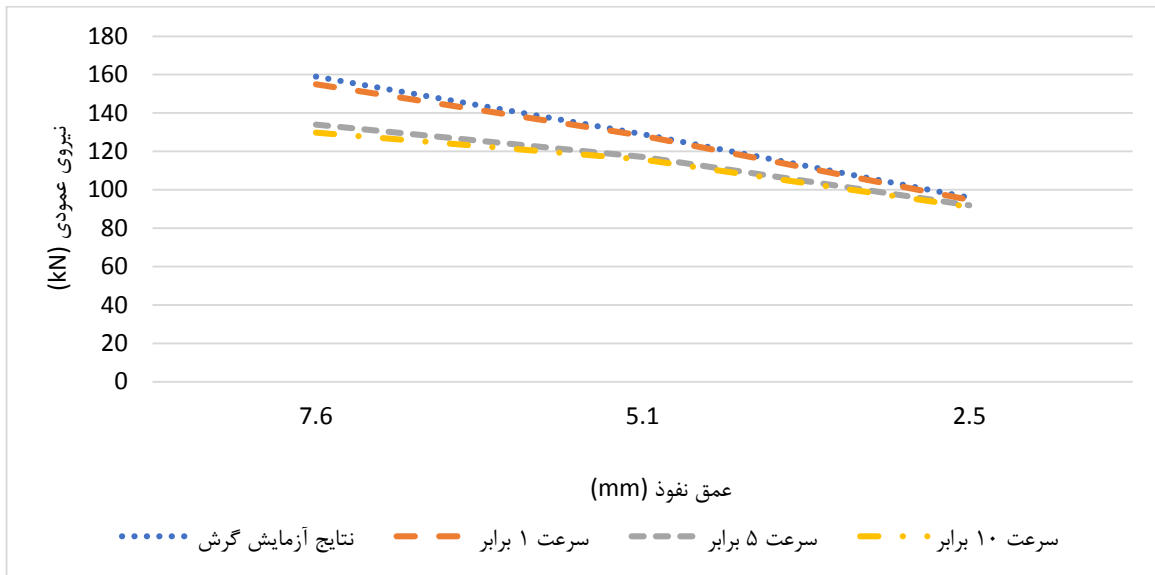
تمامی مقادیر نیروهای غلطشی گزارش شده در شبیه‌سازی‌های انجام شده، از دید روند کلی با افزایش عمق نفوذ مانند آزمایش برش خطی گرش و همکاران [۲] افزایش می‌یابند. در آزمایش گرش و همکاران شیب افزایش نیرو غلطشی به ازای افزایش عمق نفوذ به صورت خطی است مطابق با شکل ۹ در حالی که شیب افزایش نیروی غلطشی در شبیه‌سازی‌ها انجام شده برای افزایش عمق نفوذ از ۲/۵ به ۵/۱ میلی‌متر کمتر از شیب آزمایش برش خطی گرش و همکاران و در افزایش عمق نفوذ از ۵/۱ به ۷/۶ میلی‌متر برابر با شیب آزمایش می‌باشد. به طور خلاصه می‌توان گفت که نیروهای عمود و غلطشی با افزایش عمق نفوذ افزایش یافته است که شیب این

انجام شده باتوجه به آزمایش برش خطی گرش و همکاران [۲] و توان ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل سرعت‌های ۵ و ۱۰ برابر سرعت برش در آزمایشات برش خطی گرش و همکاران مورد بررسی قرار گرفته، همچنین شبیه‌سازی‌ها برای تمامی عمق نفوذهای ذکر شده در مقاله گرش و همکاران انجام شده است اما از آن جهت که نتایج حاصله همسویی خوبی را از خود به نمایش گذاشتند در اینجا به نمایندگی فقط به سه عمق نفوذ بسنده شده است. پارامترهای هندسه دیسک و سنگ مطابق با شبیه‌سازی‌های قسمت اعتبارسنجی بوده و سایر پارامترها به شرح زیر می‌باشد.

- مقاومت سنگ : ۱۵۸ MPa
- سرعت چرخشی دیسک : ۰/۰۷۵ و ۰/۱۵ رادیان بر میلی‌ثانیه
- سرعت برش خطی دیسک : ۱/۶۵ و ۳/۳ میلی‌متر بر میلی‌ثانیه
- عمق نفوذ : ۲/۵، ۵/۱ و ۷/۶ میلی‌متر
- فاصله داری : ۷۶ میلی‌متر

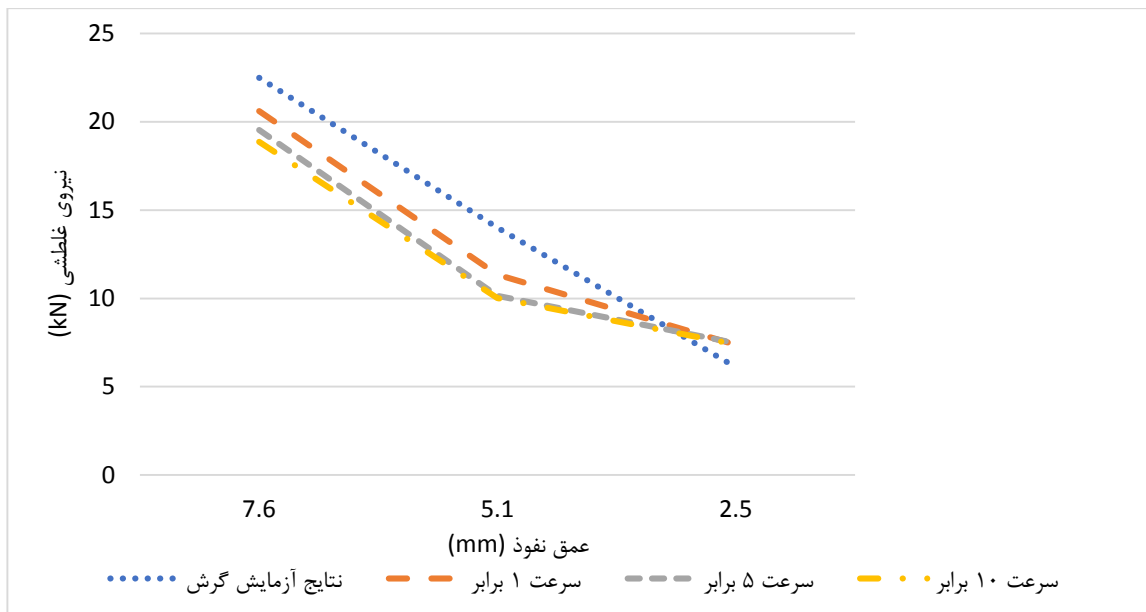
۴-۱- تاثیر عمق نفوذ بر نیروها

نتایج حاصله از شبیه‌سازی برای بدست آوردن نیروی عمودی در عمق نفوذهای ۲/۵، ۵/۱ و ۷/۶ میلی‌متر در شکل ۸ نشان داده شده است. چه در



شکل ۸. تاثیر عمق بر نیروی عمودی در آزمایش گرش و همکاران و شرایط مختلف شبیه‌سازی

Fig. 8. The effect of penetration depth on normal force in Gersh et al.'s experiment and different simulation conditions



شکل ۹. تاثیر عمق بر نیروی غلطشی در آزمایش گرش و همکاران و شرایط مختلف شبیه‌سازی

Fig. 9. The effect of penetration depth on rolling force in Gersh et al.'s experiment and different simulation conditions

جدول ۲. مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با سرعت ۵ برابر سرعت مبنا با نتایج آزمایش گرش و همکاران

Table 2. Comparison of the results obtained from the simulation at a speed 5 times the base speed with the results of Gersh et al.

نیروی عمودی شبیه‌سازی (kN)	درصد تغییر نیروی عمودی نسبت به نیرو در سرعت مبنا	نیروی غلطشی شبیه‌سازی (kN)	درصد تغییر نیروی غلطشی نسبت به نیرو در سرعت مبنا	نفوذ (mm)
۱۳۴/۹	-۱۲/۹۶	۱۹/۵۳	-۵/۱۹	۷/۶
۱۱۷/۱	-۸/۵۸	۱۰/۱۵	۰/۸۹	۵/۱
۹۱/۹۷	-۲/۹۰	۷/۴۶	۱/۱۰	۲/۵

جدول ۳. مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با سرعت ۱۰ برابر سرعت مبنا با نتایج آزمایش گرش و همکاران

Table 3. Comparison of the results obtained from the simulation at a speed 10 times the base speed with the results of Gersh et al.

نیروی عمودی شبیه‌سازی (kN)	درصد تغییر نیروی عمودی نسبت به نیرو در سرعت مبنا	نیروی غلطشی شبیه‌سازی (kN)	درصد تغییر نیروی غلطشی نسبت به نیرو در سرعت مبنا	نفوذ (mm)
۱۲۹/۸	-۱۶/۲۵	۱۸/۸۷	-۸/۴۰	۷/۶
۱۱۵/۸	-۹/۶۰	۱۰/۰۲	-۰/۳۹	۵/۱
۹۱/۱۲	-۳/۸۰	۷/۴	۰/۲۷	۲/۵

جدول ۴. مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی سرعت ۵ برابر سرعت مبنا با ۱۰ برابر سرعت مبنا

Table 4. Comparison of the results obtained from the simulation of 5 times the base speed with 10 times the base speed

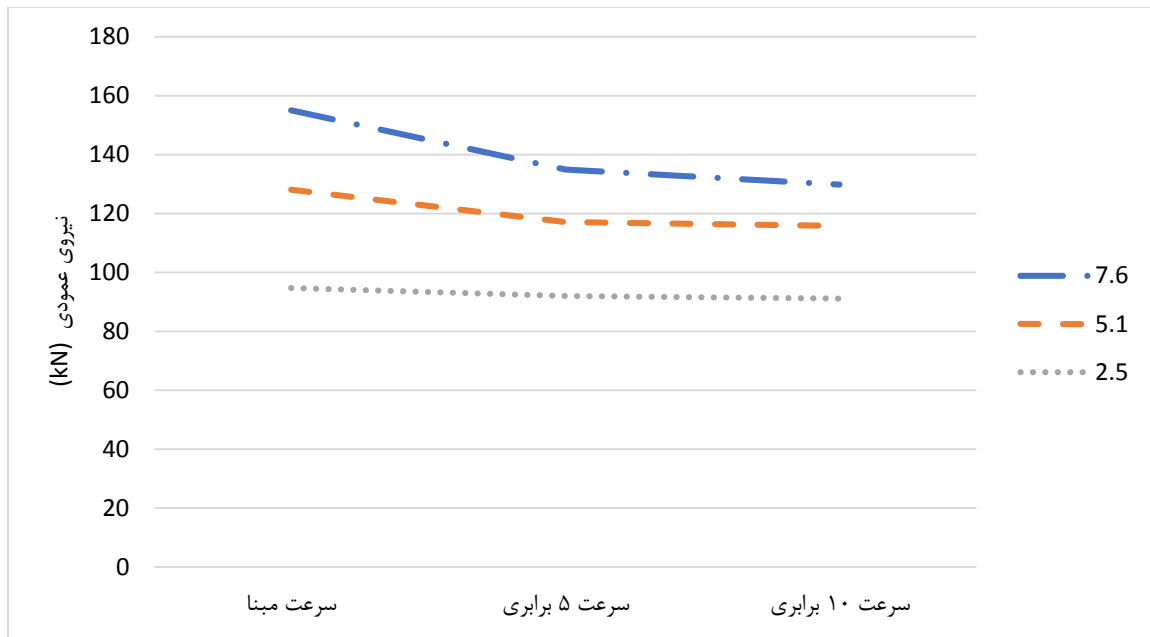
نیروی عمودی شبیه‌سازی (kN)	درصد تغییر نیروی عمودی نسبت به نیرو در سرعت مبنا	نیروی غلطشی شبیه‌سازی (kN)	درصد تغییر نیروی غلطشی نسبت به نیرو در سرعت مبنا	نفوذ (mm)
۱۲۹/۸	-۳/۷۸	۱۸/۸۷	-۳/۳۸	۷/۶
۱۲۴/۸	-۱/۱۱	۱۰/۰۲	-۱/۲۸	۵/۱
۹۱/۱۲	-۰/۹۲	۷/۴	-۰/۸۲	۲/۵

افزایش برای نیروی غلطشی به مراتب بیشتر می‌باشد.

شبیه‌سازی‌ها این است که با افزایش ۵ برابری سرعت نسبت به سرعت مبنا (سرعت خطی ۰/۳۳ میلی‌متر بر میلی‌ثانیه و سرعت دورانی ۰/۰۱۵ رادیان بر میلی‌ثانیه که برابر با سرعت آزمایش برش خطی گرش و همکاران است) نیروی عمودی وارد بر دیسک و سنگ کاهش یافته است (جدول ۲). مقدار این کاهش با افزایش عمق رابطه‌ای مستقیم را نشان می‌دهد، به این صورت که برای عمق ۷/۶، ۵/۱، و ۲/۵ میلی‌متر به ترتیب مقدار این کاهش

۲-۴ تاثیر سرعت خطی و چرخشی دیسک بر نیروها

بر اساس نتایج حاصله از شبیه‌سازی‌ها که در جداول ۲ تا ۴ آورده شده است، افزایش سرعت باعث تغییر قابل ملاحظه نیروها نمی‌شود. این نتایج با نتایج فیلیپس و راکسبورو [۱۰] مطابقت دارد. نکته مهم در مورد



شکل ۱۰. مقایسه تغییر نیروی عمودی با توجه به تغییر سرعت

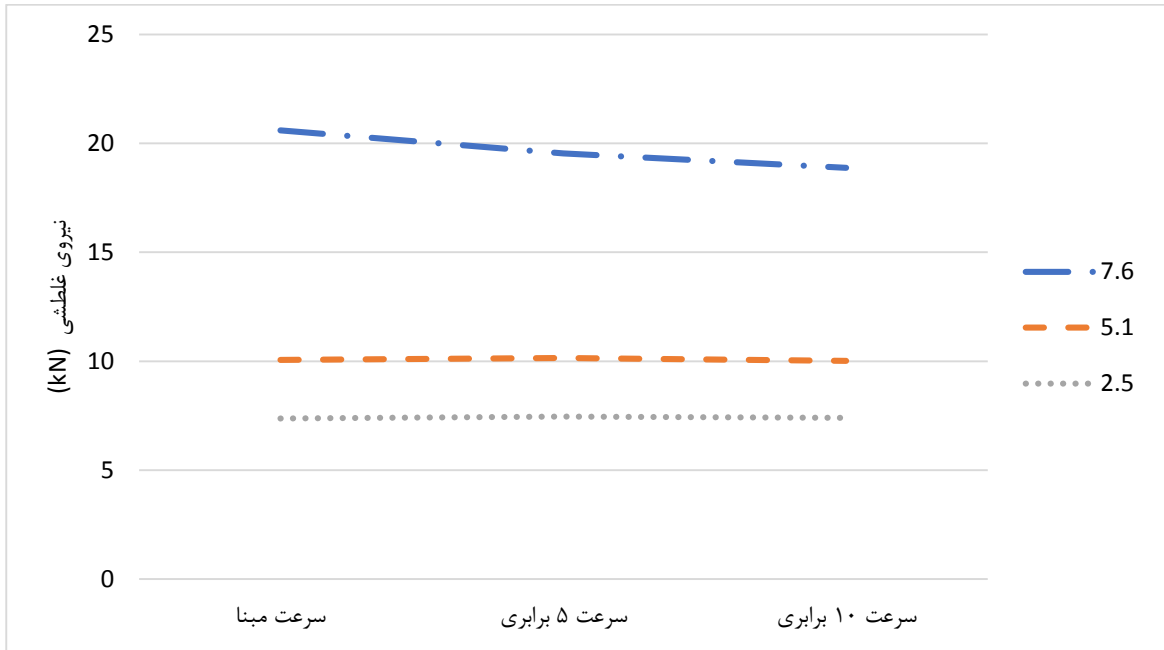
Fig. 10. Comparison of normal force change according to speed change

(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 و نیروهای عمودی و غلطشی در سرعت‌های مختلف اعمال شده به دیسک برشی نشان می‌دهد که با افزایش عمق نفوذ، مقادیر این پارامترها نیز افزایش می‌یابد و این نتیجه برای هر سه سرعت مختلف یکسان است. این نتیجه در تحقیقات قبلی انجام شده با آزمایش برش خطی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری نیز تایید شده است. شکل ۱۲ مقادیر نیروی عمودی در عمق نفوذهای مختلف و در سرعت‌های مبنا، ۵ برابر و ۱۰ برابر را نشان می‌دهد. روابط ۵، ۶ و ۷ نیز به ترتیب نیروی عمودی را بر حسب عمق نفوذ برای سرعت‌های مبنا، پنج و ده برابر ارائه می‌کند. لازم به ذکر است که نمودارهای شکل ۱۲ نشان می‌دهد که در عمق نفوذهای کمتر از ۴ میلی‌متر، شیب نمودارها کمی بیشتر است. این موضوع به این دلیل است که در عمق نفوذهای کمتر از ۴ میلی‌متر، انرژی ویژه مصرفی برای نفوذ و حفاری نسبتاً بیشتر است.

حدود ۱۳، ۹، و ۳ درصد است. نتایج نشان می‌دهد که نیروها بعد از افزایش ۵ برابری سرعت دیگر به افزایش سرعت واکنش چندانی نشان نمی‌دهند (جداول ۳ و ۴). تمامی نتایج یاد شده در شکل ۱۰ برای نیروی عمودی و در شکل ۱۱ برای نیروی غلطشی قابل مشاهده می‌باشد. برای نیروی غلطشی تغییرات سرعت، تاثیر بسیار کمی بر نتایج داشته است، بر این اساس تنها برای عمق نفوذ ۷/۶ میلی‌متر با افزایش سرعت از سرعت مبنا به ۱۰ برابر، نیروی غلطشی کاهش حدود ۱۰ درصدی را نشان می‌دهد.

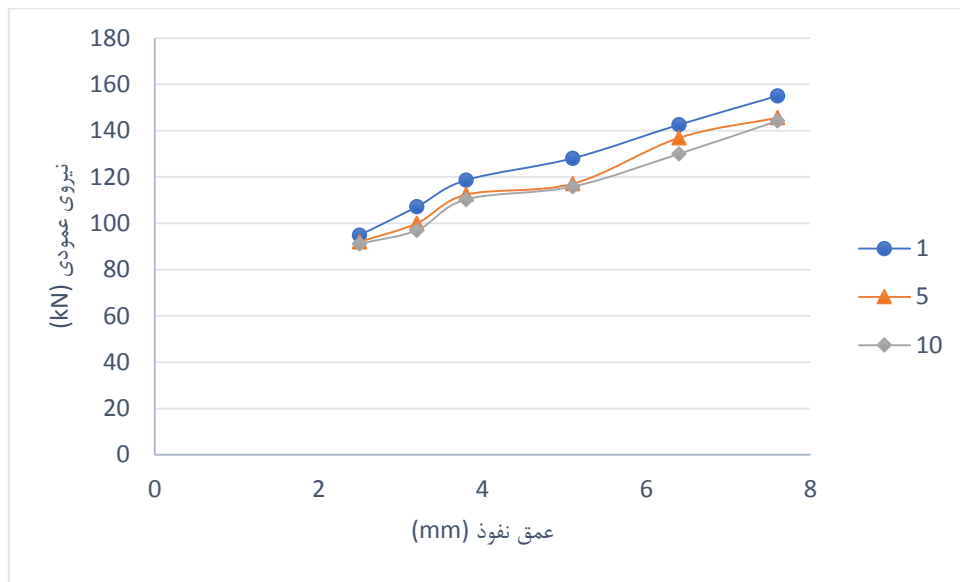
۳-۴- تحلیل آماری تاثیر عمق نفوذ بر نیروی عمودی

با استفاده از آنالیز رگرسیون ساده می‌توان رابطه تجربی ساده بین متغیر هدف و یک 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



شکل ۱۱. مقایسه تغییر نیروی غلطشی با توجه به تغییر سرعت

Fig. 11. Comparison of rolling force change according to speed change



شکل ۱۲. نمودار نیروهای عمودی مدل‌سازی شده در عمق نفوذهای مختلف با سرعت‌های مبنا، ۵ برابر و ۱۰ برابر

Fig. 12. Diagram of modeled normal forces at different penetration depths with base speeds, 5 times and 10 times

غلطشی ۷۲ درصد افزایش می‌یابند. میزان تغییر نیروی عمودی برای افزایش سرعت از سرعت مبنا به ۵ برابر آن در عمق‌های نفوذ ۲/۵ و ۷/۶ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۳ و ۱۳ درصد کاهش و به ازای تغییر سرعت از سرعت مبنا به ۱۰ برابر آن کاهش ۴ و ۱۶ درصدی را از خود نشان می‌دهند. نیروهایی غلطشی نیز در افزایش سرعت ۵ برابری -۵ و +۱ درصد و در افزایش سرعت ۱۰ برابری حدود ۸- و ۵/۰+ درصد تغییر می‌کنند. نتایج ذکر شده نشان می‌دهد که سرعت بر نیروهای عمودی و غلطشی در عمق نفوذ کمتر از ۷/۶ میلی‌متر تأثیری کمتر از ۱۰ درصد داشته و این تغییر برای عمق نفوذ ۷/۶ میلی‌متر هم زیر ۲۰ درصد می‌باشد.

از دیگر نتایج این مقاله دقت خوب شبیه‌سازی برش خطی سنگ به وسیله دیسک برشی با نرم‌افزار LS-DYNA می‌باشد، تنها شرط این نتیجه دقت در مدل‌سازی 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 جمله‌ای و با در نظر گرفتن دو پارامتر عمق نفوذ و سرعت، روابطی برای برآورد نیروهای عمودی ارائه شده است.

تقدیر و تشکر

مولفان از حمایت مدیریت محترم عامل شرکت تونل‌ساز ماشین و همچنین هر گونه کمک از طرف همکاران محترم شرکت تونل‌ساز برای تهیه و تنظیم این مقاله کمال تقدیر و تشکر را دارند.

منابع

- [1] J.-W. Cho, S. Jeon, S.-H. Yu, S.-H. Chang, Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(3) (2010) 230-244.
- [2] R. Gertsch, L. Gertsch, J. Rostami, Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction, *International Journal of rock mechanics and mining sciences*, 44(2) (2007) 238-246.
- [3] J. Rostami, L. Ozdemir, B. Nilson, Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models, in: *Proceedings of Annual Technical Meeting*

$$F_N = 70.97 + 11.215P \quad R^2 = 0.982 \quad (5)$$

$$P - Value = 0.00 \quad VIF = 1.00$$

$$F_N = 77.60 + 10.440P \quad R^2 = 0.976 \quad (6)$$

$$P - Value = 0.00 \quad VIF = 1.00$$

$$F_N = 66.81 + 10.054P \quad R^2 = 0.979 \quad (7)$$

$$P - Value = 0.00 \quad VIF = 1.00$$

در معادلات بالا F_N نیروی عمودی برحسب kN و P عمق نفوذ برحسب میلی‌متر می‌باشد.

با توجه به مطالب گفته شده و همچنین پایین بودن میزان خطای نیروی عمودی بدست آمده از شبیه‌سازی برش خطی دیسک با سرعت مبنا در مقایسه با نتایج آزمایش برش خطی گرش و همکاران [۲] تصمیم بر آن شد تا با استفاده از رگرسیون چند جمله‌ای در نرم‌افزار Minitab برای سنگ قرمز کلرادو با مقاومت تک محوری ۱۵۸ MPa رابطه‌ای برای محاسبه نیروی عمودی در عمق‌نفوذها و سرعت‌های خطی مختلف ارائه شود، این رابطه به صورت معادله ۸ می‌باشد. در معادله زیر همانطور که ذکر شد، P عمق نفوذ برحسب میلی‌متر و V سرعت خطی دیسک برحسب میلی‌متر بر میلی‌ثانیه می‌باشد.

$$F_N = 74.93 - 1.054V + 10.569P \quad (8)$$

$$R^2 = 0.971 \quad P - Value \quad VIF = 1.00$$

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار LS-DYNA با روش حل لاگرانژی و دیگر شرایطی که به تفصیل در متن ارائه شده است، به بررسی تغییرات نیروهای عمودی و غلطشی وارده بر دیسک‌های برشی در اثر تغییر عمق نفوذ و سرعت‌های خطی و دورانی 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 بوده و با افزایش عمق نفوذ از ۲/۵ به ۷/۶ میلی‌متر نیروهای عمودی حدود ۴۰ درصد و نیروهای

- Tunnelling and underground space technology, 43 (2014) 222-231.
- [14] E. Farrokh, J. Rostami, C. Laughton, Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30 (2012) 110-123.
- [15] N.R. Barton, *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*, Crc Press, 2000.
- [16] S. Yagiz, Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3) (2008) 326-339.
- [17] Z. Zhao, Q. Gong, Y. Zhang, J. Zhao, Prediction model of tunnel boring machine performance by ensemble neural networks, *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 2(2) (2007) 123-128.
- [18] P.L. Menezes, M.R. Lovell, I.V. Avdeev, J.-S. Lin, C.F. Higgs, Studies on the formation of discontinuous chips during rock cutting using an explicit finite element model, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70 (2014) 635-648.
- [19] N. Innaurato, C. Oggeri, P.P. Oreste, R. Vinai, Experimental and numerical studies on rock breaking with TBM tools under high stress confinement, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40 (2007) 429-451.
- [20] I. Tulu, K. Heasley, Calibration of 3D cutter-rock model with single cutter tests, in: *ARMA US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium*, ARMA, 2009, pp. ARMA-09-160.
- [21] X. Tan, S.Q. Kou, P.-A. Lindqvist, Application of the DDM and fracture mechanics model on the simulation of rock breakage by mechanical tools, *Engineering Geology*, 49(3-4) (1998) 277-284.
- [22] C. Tang, Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(2) (1997) 249-261.
- [23] C. Tang, Y. Fu, S. Kou, P.-A. Lindqvist, Numerical simulation of loading inhomogeneous rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(7) of the Institute of Shaft Drilling Technology, Las Vegas, 1996, pp. 1-10.
- [4] J.-W. Cho, S. Jeon, H.-Y. Jeong, 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, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35 (2013) 37-54.
- [5] S.-H. Chang, S.-W. Choi, G.-J. Bae, S. Jeon, Performance prediction of TBM disc cutting on granitic rock by the linear cutting test, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3) (2006) 271.
- [6] J. Rosutami, A new model for performance prediction of hard rock TBMs, in: *Proceedings/1993 rapid excavation and tunneling conference*, 1993.
- [7] A. Bruland, *Hard rock tunnel boring, performance data and back-mapping*, Project report E, 1 (1998).
- [8] F. Wang, L. Ozdemir, Tunnel-boring penetration rate and machine design, *Transportation Research Record*, (684) (1978).
- [9] H. Sanio, Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock, in: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Elsevier, 1985, pp. 153-161.
- [10] F.F. Roxborough, H.R. Phillips, Rock excavation by disc cutter, in: *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, Elsevier, 1975, pp. 361-366.
- [11] Y. Nishimatsu, The mechanics of rock cutting, in: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Elsevier, 1972, pp. 261-270.
- [12] J. Hassanpour, J. Rostami, J. Zhao, A new hard rock TBM performance prediction model for project planning, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(5) (2011) 595-603.
- [13] J. Hassanpour, J. Rostami, S.T. Azali, J. Zhao, Introduction of an empirical TBM cutter wear prediction model for pyroclastic and mafic igneous rocks; a case history of Karaj water conveyance tunnel, Iran,

- Journal of Civil and Environmental Engineering, 6(8) (2012) 693-695.
- [30] G.R. Johnson, T.J. Holmquist, An improved computational constitutive model for brittle materials, in: AIP conference proceedings, American Institute of Physics, 1994, pp. 981-984.
- [31] S.P. Shah, S.E. Swartz, C. Ouyang, Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials, John Wiley & Sons, 1995.
- [32] M. Kuczewicz, P. Baranowski, J. Małachowski, Dolomite fracture modeling using the Johnson-Holmquist concrete material model: Parameter determination and validation, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 13(2) (2021) 335-350.
- [33] H. Li, E. Du, Simulation of rock fragmentation induced by a tunnel boring machine disk cutter, Advances in Mechanical Engineering, 8(6) (2016) 1687814016651557.
- (1998) 1001-1007.
- [24] G. Li, B. Wang, Y.D. Chen, W.S. Wang, Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by TBM cutters, Applied Mechanics and Materials, 249 (2013) 1069-1072.
- [25] B. Yu, Numerical simulation of continuous miner rock cutting process, West Virginia University, 2005.
- [26] M.C. Jaime, Numerical modeling of rock cutting and its associated fragmentation process using the finite element method, University of Pittsburgh, 2011.
- [27] J.O. Hallquist, L.-D.T. Manual, Livermore software technology corporation, Livermore, Ca, (1998) 94550-91740.
- [28] J. Rostami, 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 Golden, CO, USA, 1997.
- [29] L. Hao, Y. Zhang, J. Cui, An Eulerian numerical method and its application to explosion problems, International

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Sh. Fattahi Dehkaboodi, E. Farrokh, D. Lotfi, Study of the effect of penetration depth and disc speed on cutting forces using LS-DYNA simulations, Amirkabir J. Civil Eng., 55(12) (2024) 2487-2502.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21617.7778

