

شبیه‌سازی عددی برش سنگ با تیغه دیسکی TBM در آزمون برش خطی

رسول فرجی تسوجی^۱؛ جعفر خادمی حمیدی^{۲*}؛ محمدحسین بصیری^۲؛ عباس افتخاری^۴

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد استخراج معدن؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۴- مدیر مهندسی پروژه تونل انتقال آب گلاب؛ مهندسین مشاور ایمن‌سازان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۱/۱۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2017.4100.1261

واژگان کلیدی	چکیده
ماشین تونل‌زنی تمام مقطع آزمون برش خطی سنگ نیروهای برش انرژی ویژه	برآورد دقیق نیروهای برشی وارد بر تیغه‌ها برای طراحی عوامل عملیاتی TBM مثل نیروی پیشران و گشتاور بسیار مهم است. برای انجام این کار، ابتدا نیروهای برشی وارد بر یک دیسک منفرد و همچنین عملکرد آن برای یک سنگ خاص با انجام آزمون‌های برش سنگ تعیین می‌شود. سپس نتایج آن برای استفاده و طراحی TBM در همان نوع سنگ تعمیم داده می‌شود. با توجه به عدم امکان انجام آزمون‌های برش خطی بزرگ‌مقیاس در کشور، در این تحقیق آزمون برش خطی با استفاده از روش عددی شبیه‌سازی شد. ابتدا نیروهای وارد بر یک دیسک سالم از نوع مقطع ثابت و همچنین انرژی ویژه برش با استفاده از کد المان محدود ABAQUS تخمین زده شد و برای صحت‌سنجی، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی آزمون برش خطی مقایسه شد. مقایسه نیروها و انرژی ویژه برش حاصل از شبیه‌سازی عددی با آزمون‌های برش خطی واقعی تطابق بسیار خوبی را نشان داد. مقایسه نتایج نشان داد که نیروهای برش حاصل از شبیه‌سازی، انحراف حداکثر ۱۵ و ۲۱ درصدی به ترتیب برای نیروی قائم و نیروی غلتشی نسبت به میانگین نیروها در کار آزمایشگاهی دارد.

۱- پیش‌گفتار

کاربرد ماشین در تونل‌سازی باگذشت زمان هرروز ابعاد تازه‌تری می‌گیرد و به اهمیت آن افزوده می‌شود. ماشین تونل-بری تمام مقطع (TBM) نه‌تنها نرخ پیشروی و ایمنی بالایی را فراهم می‌کند بلکه ارتعاشات و وسعت منطقه تخریب فراتر از پروفیل برنامه‌ریزی شده تونل در روش حفاری کلاسیک با چالزنی و انفجار را نیز کاهش می‌دهد (Acaroglu, et al., 2008) و (Friant & Ozdemir, 1994).

طراحی کله‌حفار یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در ساخت TBM است که شامل پارامترهای قطر، تعداد تیغه‌های دیسکی، نیروی محوری، نیروی غلتشی، عمق نفوذ و فاصله بین دیسک‌ها بر روی آن است (Acaroglu, et al., 2008).

و (Rostami & Ozdemir, 1993). یکی از آزمون‌های رایج برای طراحی کله‌حفار و پیش‌بینی عملکرد آن، آزمون برش خطی سنگ (Linear Cutting Test, LCT) با استفاده از ماشین برش ساخته شده در مدرسه معدن کلرادو (Colorado School of Mines) است. بزرگ‌ترین مزیت دستگاه برش خطی، کنترل پارامترهای طراحی و همچنین حذف اثر مقیاس است (Rostami & Ozdemir, 1993). از آنجا که آزمون برش خطی قادر به انطباق طیف گسترده‌ای از بارهای برش و عمق‌های نفوذ است، از نتایج حاصل می‌توان به‌طور مستقیم برای ارزیابی عملکرد TBM در شرایط واقعی استفاده کرد (Ozdemir & Nilsen, 1999). اگرچه استفاده از آزمون تمام‌مقیاس برش سنگ مزایایی

* تهران؛ بزرگراه جلال آل احمد؛ پل نصر؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی؛ بخش مهندسی معدن؛ صندوق پستی: ۱۱۶-۱۴۱۱۵؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۳۶۴؛ دورنگار: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۳۲۴؛ رایانامه: jafarkhademi@modares.ac.ir

فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها بر مکانیزم برش سنگ با تیغه‌های TBM و همچنین در سال ۲۰۰۶، روند خردایش سنگ با دو تیغه و نیز فاصله بهینه بین آن‌ها را با استفاده از نرم‌افزار UDEC، بر پایه المان مجزا شبیه‌سازی کردند (Gong et al., 2006b).

روژک و همکاران (Rojek, et al., 2009, 2010) با استفاده از روش المان مجزا، مکانیزم برش سنگ به‌وسیله ابزار برشی در رودهدرها و TBM را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق‌ها، المان‌های سنگ از نوع المان مجزای کروی انتخاب شده است.

چو و همکاران (Cho, et al., 2010, 2013) فرآیند شکست سنگ با تیغه‌های دیسکی V شکل را با استفاده از کد صریح المان محدود AUTODYN-3D، بررسی کردند. در مطالعه آنها، حجم سنگ کنده‌شده با استفاده از معیار سایش، مدل‌سازی شد به قسمی که المان‌هایی از سنگ در صورت رسیدن به آستانه شکست کششی از مدل حذف می‌شود.

لی و شی (Li & Shi, 2012) با استفاده از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA، فرآیند برش سنگ با تیغه دیسکی مقطع ثابت را با در نظر گرفتن فشار محصورکنندگی و با در نظر گرفتن مکانیک آسیب، بررسی کردند. من و لی (Man & Li, 2011) به بررسی خردایش سنگ به‌وسیله دو تیغه دیسکی V شکل با شعاع ۲۱۶ میلی‌متر با فاصله‌های برش متفاوت با نرم‌افزار ABAQUS پرداخته‌اند. برای مدل کردن رفتار الاستوپلاستیک سنگ، از معیار دراگر-پراگر (Drucker-Prager) خطی استفاده شده است.

بجاری و خادمی حمیدی در سال ۲۰۱۳، تأثیر هم‌زمان فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها بر راندمان برش TBM در توده سنگ درزه‌دار را با استفاده از نرم‌افزار UDEC، شبیه‌سازی کرده‌اند (Bejari & Khademi Hamidi, 2013). ژانگ و همکاران (Zhang, et al., 2014) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، فرآیند برش سنگ به‌وسیله دیسک مقطع ثابت با قطر ۱۷ اینچ را زمینه مطالعه خود قرار دادند. برای رفتار الاستوپلاستیک سنگ از مدل غیرخطی دراگر-پراگر استفاده شده است.

در جدول ۱ خلاصه‌ای از سایر تحقیق‌های مربوط به شبیه‌سازی عددی برش سنگ آورده شده است.

دارد اما تهیه نمونه‌های سنگ با ابعاد بزرگ از مسیر تونل، حمل به آزمایشگاه، آماده‌سازی و قرار دادن آن در جعبه فلزی به همراه بتن ریزی برای انجام آزمایش، گران و زمان‌بر است. در عوض، آزمون کوچک‌مقیاس برش خطی سنگ (Small scale LCT) یا آزمون برش مغزه (Core cutting test)، روشی آسان و سریع است. مزیت اساسی آزمون برش کوچک-مقیاس در مقایسه با بزرگ‌مقیاس، نیاز آن به تهیه نمونه‌های بلوکی یا مغزه‌ای کوچک از سنگ بکر است که با توجه به دشواری‌های نمونه‌گیری از مسیر تونل در شروع به‌کار یک پروژه حائز اهمیت است. به‌تازگی و برای اولین بار در ایران، آزمون کوچک‌مقیاس برش خطی سنگ در آزمایشگاه حفاری مکانیزه بخش معدن دانشگاه تربیت مدرس ساخته شده است (Alimadad et al., 2017).

در مطالعه حاضر، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS/CAE، فرآیند برش سنگ در آزمون برش خطی با دیسک مقطع ثابت (CCS) به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و نیروهای برش و همچنین انرژی ویژه محاسبه می‌شود. شبیه‌سازی عددی مطابق با هندسه برش، مدل سنگ و دیسک مورد استفاده در آزمون برش خطی در تحقیق رستمی (Rostami, 1997, 2013) انجام و در ادامه با نتایج آزمایشگاهی ایشان مقایسه می‌شود.

۲- سابقه تحقیق

با ورود نسل‌های جدید از سوپر کامپیوترها و افزایش سرعت پردازش محاسبات در آن‌ها، استفاده از روش‌های عددی در زمینه‌های مختلف مهندسی از جمله مهندسی سنگ رشد چشمگیری داشته است. در زمینه شبیه‌سازی فرآیند برش سنگ، از روش‌های عددی از جمله روش تفاضل محدود (Finite Difference Method)، روش المان محدود (Finite Element Method) و روش المان مجزا (Discrete Element Method) استفاده شده است.

جینگ (Jing) در سال ۲۰۰۳، آخرین پیشرفت‌ها و مسائل مهم روش‌های عددی در مکانیک سنگ و مهندسی سنگ را بررسی کرده است (Jing, 2003).

گانگ و همکاران (Gong, et al. 2005, 2006a) اثر

جدول ۱- پیشینه مدل‌سازی عددی برش سنگ با تیغه دیسکی

ردیف	سال	موضوع	روش عددی	نرم‌افزار	منبع
۱	۲۰۱۰	مدل‌سازی المان محدود برش سنگ	FEM	LS-DYNA	(Jaime, et al., 2010)
۲	۲۰۱۱	مطالعه عددی اثر تنش محصورکننده در خردایش سنگ به‌وسیله دیسک‌های TBM	FEA	RFPA ^{2D}	(Ma, et al., 2011)
۳	۲۰۱۳	شکستن سنگ در بستر آزمایش به‌وسیله دو تیغه دیسکی	FEM	ANSYS	(Zhou, et al., 2013)
۴	۲۰۱۳	طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌آلات حفاری تونل با شبیه‌سازی فرآیند سنگ برش با استفاده از روش المان گسسته	DEM	DEMPACK code	(Medel-Morales & Botello-Rionda, 2013)
۵	۲۰۱۵	تجزیه و تحلیل تنش و سایش تیغه دیسکی ماشین تونل‌زنی سنگ	FEM	ANSYS	(Jian, et al., 2015)

داده شده است.

ضخامت لبه حدوداً ۱٫۵ میلی‌متر (۰٫۴۵ اینچ) است که با زاویه ۵ درجه از لبه به سمت مرکز دیسک به تدریج افزایش می‌یابد (Rostami, 2013).

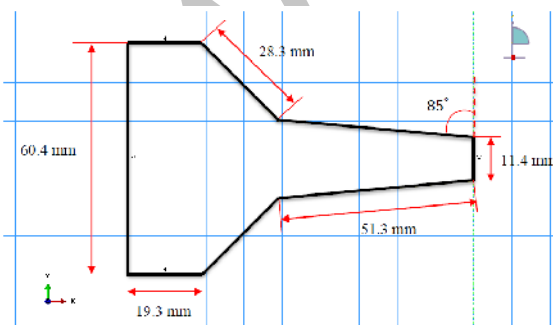
جدول ۲- خصوصیات مکانیکی در نظر گرفته شده برای مدل تیغه‌های دیسکی (Rostami, 1997) و (Cho, et al., 2010)

نوع مواد	مدول الاستیسیته (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون
فولاد ۴۳۴۰-AISI	۲۰۰	۸۶۰	۰٫۲۹

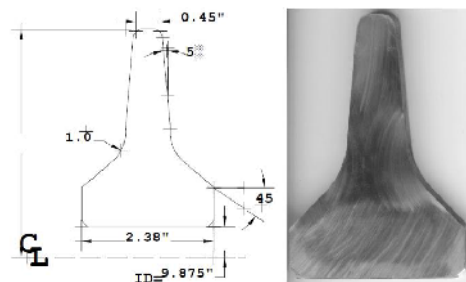
۳- شبیه‌سازی عددی آزمون برش خطی

۳-۱- طراحی مدل دیسک مقطع ثابت

خصوصیات مکانیکی برای دیسک در این شبیه‌سازی، مطابق با جدول ۲ فولاد ۴۳۴۰-AISI در نظر گرفته شده است. این نوع فولاد به علت این که در ساختار خود نیکل، کروم و مولیبدن را نیز دارد، مقاومت کششی بالایی دارد. این دیسک از نوع مقطع ثابت با قطر ۴۳۲ میلی‌متر (۱۷ اینچ) و ساخت شرکت رابینز (Robbins) است و در مطالعه رستمی (Rostami, 1997) برای آزمون برش خطی استفاده شد. مطابق با نظر رستمی، این دیسک (مدل B-۴۹۲۲۵) به خاطر باریک و بلند بودن پروفیل تیغه، در یک نیروی محوری ثابت، در عمق‌های بیشتری از سنگ نفوذ می‌کند و عمر سایشی بیشتری دارد. در شکل ۱ شماتیکی از مقطع این دیسک نشان



ب

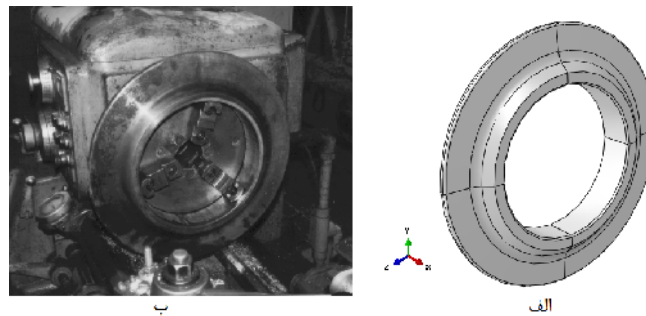


الف

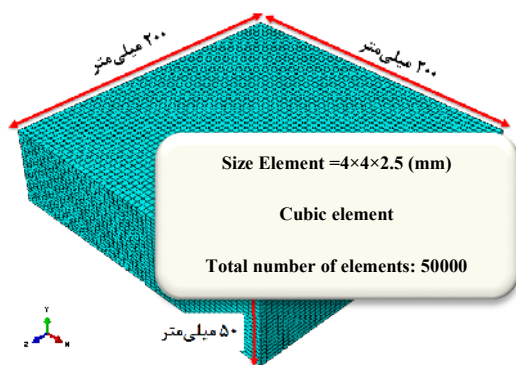
شکل ۱- مقطع دیسک ۱۷ اینچی نوع B-۴۹۲۲۵ شرکت رابینز، الف) نمونه واقعی (Rostami, 1997) ب) در محیط نرم‌افزار آباکوس

آجری C3D8R با اندازه ۹ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین با توجه به این که در این تحقیق مکانیزم خردشدگی سنگ بیشتر از ماندگاری نوک تیغه است، سایش تیغه‌های دیسکی در این مدل لحاظ نشده است.

در شکل ۲، مدل دیسک در پیش پردازنده نرم‌افزار با نوع واقعی آن مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مدل ساخته‌شده تطابق هندسی خوبی با دیسک واقعی نشان می‌دهد. با توجه به خمیدگی اطراف مدل دیسک، از المان‌های



شکل ۲- دیسک نوع B-۴۹۲۲۵، الف) مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار آباکوس، ب) نمونه واقعی در آزمایش برش خطی (Rostami, 1997)



شکل ۳- نمایش سه‌بعدی مدل قطعه سنگ در نرم‌افزار آباکوس

از سنگ‌آهک ایندیانا (*Indiana limestone*) و مشخصات آن برای مدل‌سازی نمونه سنگ در این مطالعه استفاده شد. این سنگ یکی از سه نوع سنگ استفاده‌شده در تحقیق Rostami (1997) است که همچنین مبنای صحت‌سنجی نتایج و راستی آزمایشی مدل عددی در مطالعه حاضر قرار گرفت. علت انتخاب این نوع سنگ، دسترسی بهتر به اطلاعات آن در مقایسه با دو نوع دیگر است. سنگ‌آهک ایندیانا از سنگ‌های رایج در آزمون‌های مکانیک سنگ و برش خطی در آمریکای شمالی بوده است (Hart, 2000) و (Mattar, 2009). آثار حفاری و استفاده از این سنگ به اوایل

۲-۳- مدل‌سازی نمونه سنگ

ابعاد هندسه بلوک سنگ در آزمایش برش خطی معمولاً حداکثر تا $1 \times 1 \times 0.7$ متر انتخاب می‌شود؛ اما در این تحقیق، به‌منظور کاهش زمان محاسبات با اندازه $0.2 \times 0.2 \times 0.05$ متر در نظر گرفته شده است. این شرایط برای هندسه مدل سنگ به‌گونه‌ای انتخاب شده است که بر نتایج تحلیل‌ها اثری نداشته باشد. برای مش‌بندی بلوک سنگی، به‌منظور عدم وابستگی نتایج به مش، پس از انتخاب و بررسی انواع مش‌های موجود در پیش پردازنده نرم‌افزار آباکوس، درنهایت المان‌های آجری سه‌بعدی با ۸ گره (*C3D8R*) با اندازه $2/5 \times 4 \times 4$ میلی‌متر، انتخاب شده است. حجم هر المان ۴۰ میلی‌متر مکعب است که دانه‌های سنگی را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند. تعداد المان‌ها، ۵۰۰۰۰ عدد برای نمونه سنگی است (شکل ۳).

مدل سنگی به‌صورت همسانگرد در نظر گرفته شده است. برای مشخص کردن رفتار الاستوپلاستیک مدل سنگی از معیار خطی دراکر-پراگر استفاده شده است. این معیار تنها از ورودی مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی، رفتار الاستوپلاستیک سنگ را مدل می‌کند. معیار دراکر-پراگر برای تعیین اینکه ماده‌ای شکسته شده یا تحت تسلیم پلاستیک قرار می‌گیرد، یک مدل وابسته به فشار است.

سوی کمپانی سنگ‌آهک ایندیانا آمریکا (Indiana Limestone Institute of America)، در جدول ۳ آورده شده است (Mattar, 2009).
به‌منظور برآورد پارامتر حالت اول چقرمگی شکست (K_C) از منحنی ارائه‌شده توسط اشمیت (Schmidt, 1976) استفاده شد (شکل ۴).

دهه ۱۸۰۰ برمی‌گردد (ILIA, 1998).
طبیعی است که تمامی اطلاعات موردنیاز سنگ‌آهک ایندیانا به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل عددی در تحقیق رستمی یافت نمی‌شود. از این‌رو، برخی از داده‌های موردنیاز مدل از پایگاه داده حاصل از مرور منابع کتابخانه‌ای انتخاب و یا تخمین زده شده است. خلاصه برخی از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این سنگ، بر اساس هجدهمین نسخه ارائه‌شده از

جدول ۳- خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگ‌آهک ایندیانا (Mattar, 2009)

مقدار	خصوصیات
۲۸ مگاپاسکال	مقاومت فشارشی نهایی نمونه‌های خشک
۴٫۸ مگاپاسکال	مدول گسیختگی نمونه‌های خشک
۲٫۳ تا ۳۷٫۲ گیگاپاسکال	مدول الاستیسیته
۶٫۳ تا ۱۲٫۴ مگاپاسکال	مقاومت برشی
۲٫۱ تا ۴٫۹ مگاپاسکال	مقاومت کششی
۲۳۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب	چگالی

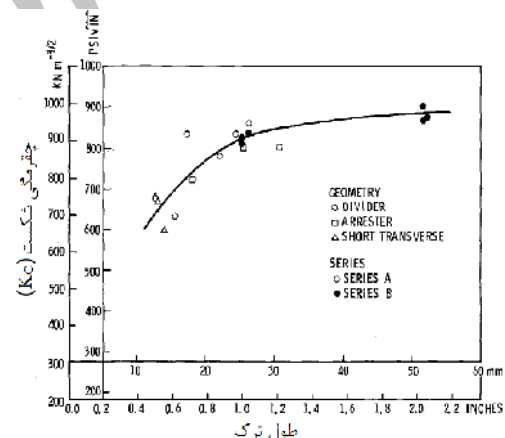
۳-۳- مونتاز و اعمال شرایط مرزی

مدل با استفاده از شرایط یکسان در آزمون آزمایشگاهی برش خطی تنظیم و ساخته شد. دیسک همانند مطالعه Rostami (1997) با عمق نفوذ ۲٫۵، ۵ و ۷٫۵ میلی‌متر، در راستای محور y تنظیم شده است.

برای مدل‌سازی بلبرینگ در کنار دیسک، مدل تیغه دیسکی به‌غیر از راستای حرکت خود (محور x)، با اعمال شرایط مرزی محدود شده است. با اعمال چنین شرایط مرزی، حرکت‌های جانبی و عمودی دیسک در مدل‌سازی حذف می‌شود و دیسک کاملاً در یک خط راست و با عمق نفوذ یکسان در طول مسیر برش قرار می‌گیرد.

شرایط مرزی مدل سنگ به نحوی انتخاب شد که پنج وجه (شامل دو وجه کناری، یک وجه پایینی و وجه‌های در راستای حرکت دیسک) از شش وجه مدل محدود شد و وجه بالایی به‌صورت آزاد انتخاب شد و شرایط اولیه در آزمون آزمایشگاهی برش خطی شبیه‌سازی شد.

با توجه به مطالعات قبلی انجام‌شده توسط راکس‌بورو و فیلیپس (Roxborough & Phillips, 1975) و کوک و همکاران (Cook, et al., 1984)، مشخص است که



شکل ۴- چقرمگی شکست نسبت به اندازه ترک برای ۱۸ نمونه سنگ‌آهک ایندیانا (Schmidt, 1976)

با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده با اندازه‌های متفاوت ترک، چقرمگی شکست بین ۰٫۸ تا ۰٫۹ قرار می‌گیرد که به‌صورت میانگین ۰٫۸۵ در نظر گرفته شد.
مدل رفتاری سنگ الاستیک خطی و از نوع همسانگرد با پارامترهای ورودی مدل الاستیسیته (E) و نسبت پواسون (ν) در نظر گرفته شد.

جسم با یکدیگر فراهم آورده است. برای این مدل، بعد از انتخاب انواع تماس‌ها، تماس عمومی انتخاب و مدل با این نوع تماس حل شد. در محیط اندرکنش، به مجموعه داده‌هایی که معرف خاصیت فیزیکی یک تماس است، خواص اندرکنش گفته می‌شود. خاصیت اندرکنش‌ها به‌طور مستقل از اندرکنش تعریف می‌شود و ممکن است به بیش از یک اندرکنش نسبت داده شود. برای این مدل خاصیت اندرکنش از نوع تماس انتخاب شده است. خصوصیات تماس با رفتار مماسی (*Tangential Behavior*) تعریف و برای مشخص کردن رفتار اصطکاکی، از تماس پنالتی (*Penalty Contact*) استفاده شد که در آن از فنر برای برقراری تماس بین دو سطح استفاده می‌شود. سختی این فنر بین دو جسم با سختی تماس تعریف می‌شود. در این مدل، ضریب اصطکاک بین دیسک و سنگ صفر در نظر گرفته شده است تا تنها حالت لغزش بین دو جسم برقرار شود.

۳-۵- انتخاب روش حل مناسب برای مدل

با توجه به اینکه نوع المان‌ها به‌صورت صریح در نظر گرفته شده است و همچنین مدل به‌صورت دینامیکی است، لذا روش حل صریح انتخاب شده است. همچنین به خاطر اینکه تعداد پیشروهای زمانی در مدل‌های دینامیکی افزایش می‌یابد، حل صریح بر ضمنی ارجحیت خواهد داشت.

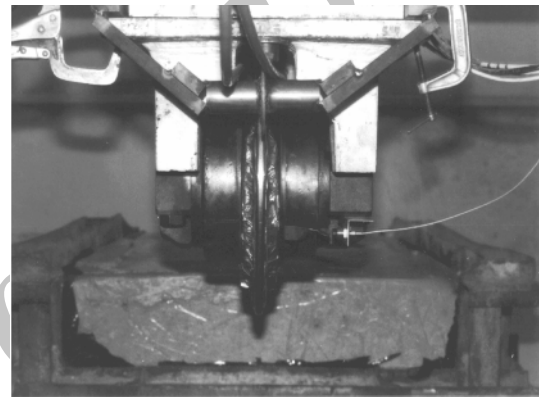
۴- نتایج حاصل از آزمون آزمایشگاهی

آزمون آزمایشگاهی با استفاده از بلوک‌های مکعبی شکل از سنگ‌آهک ایندیانا با اندازه $0.4 \times 1 \times 0.9$ متر انجام شده است. این نمونه در قالب بتنی با مقاومت بالا بر صفحه محرک ماشین تمام‌مقیاس آزمون برش خطی قرار داده شده است. تعداد آزمون‌های انجام‌شده برای سنگ‌آهک ایندیانا در عمق‌های نفوذ ۲/۵، ۵ و ۷/۵ میلی‌متر به ترتیب ۱۱، ۱۹ و ۱۰ عدد است (*Rostami, 1997*). تصاویری از قبل و بعد از آزمون این نمونه سنگی در شکل ۷ قابل مشاهده است.

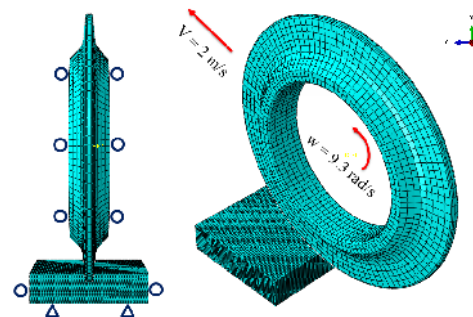
شکل ۸ نمونه‌ای از نمودار روند تغییرات نیروهای غلتشی و عمودی وارد بر دیسک را در آزمایش برش خطی نشان می‌دهد. در این شکل، نمودار خط‌چین و خط پیوسته به ترتیب بیانگر نیروی غلتشی و عمودی وارد بر دیسک است. نتایج حاصل از این آزمون‌ها و اندازه‌گیری نیروهای برش برای عمق‌های نفوذ مختلف در جدول ۴ آمده است.

انرژی ویژه و نیروهای برش، تحت تأثیر سرعت تیغه (البته تا زمانی که سرعت حرکت دیسک به سرعت انتشار ترک در سنگ نرسد) نیست؛ بنابراین به‌منظور افزایش سرعت محاسبات حل مدل عددی، سرعت تیغه دیسکی با سرعت خطی ۲ متر بر ثانیه و سرعت زاویه‌ای ۹/۲۶ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب نمایش مونتاز تیغه دیسکی و سنگ آزمایش برش خطی در آزمایشگاه و مونتاز دیسک مقطع ثابت و مدل سنگ و اعمال شرایط مرزی در محیط نرم‌افزار آباکوس است.



شکل ۵- نمایش مونتاز تیغه دیسکی و سنگ جهت انجام آزمایش برش خطی (*Rostami, 1997*)



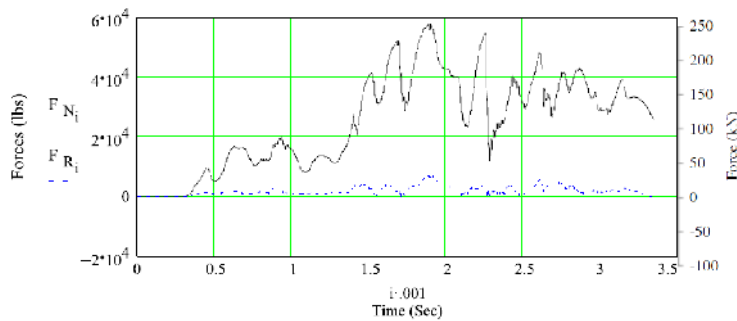
شکل ۶- شرایط مرزی اعمال‌شده به مدل سنگ و دیسک مقطع ثابت در محیط نرم‌افزار

۳-۴- مدل‌سازی تماس سنگ و دیسک

با توجه به اینکه مدل از دو جزء متفاوت دیسک و سنگ ساخته شده است، لذا باید اندرکنش میان آن‌ها تعریف شود. نرم‌افزار آباکوس مدل‌های مختلفی را از اندرکنش میان دو



شکل ۷- آزمون آزمایشگاهی برش سنگ، الف) قبل از انجام آزمایش ب) بعد از انجام آزمایش در عمق نفوذ ۵ میلی‌متر (Rostami, 1997)



شکل ۸- روند تغییرات نیروهای غلتشی و عمودی وارد بر دیسک در آزمایش برش خطی (Rostami, 1997)

جدول ۴- نتایج حاصل از آزمون آزمایشگاهی برش خطی برای سه نمونه سنگ (Rostami, 1997)

Earth Mechanics Institute		Robbins Cutter Instrumentation (J.R. Thesis)						Colorado School Of Mines										
		Cutter: 17 inch Atlas Copco Robbins Duro-cutter						Date: Sep. 30, 1996										
Rock	Test#	Spac Penet. (in)	S/P (in)	S/P ratio	Average forces (lbs)			Maximum forces (lbs)			Minimum Forces (lbs)			Cutting Coef. ratio	Specific Energy hp-hr/yd ³	Standard Deviations (lbs)		
					Norm	Roll	Side	Norm	Roll	Side	Norm	Roll	Side			Norm	Roll	Side
Indiana Limestone	IL01	3	0.1	30	10,309	753	121	19,928	1,749	4,896	2,347	88	-4,769	0.07	4.93	4,456	376	2,371
	IL02	3	0.2	15	14,454	1,229	1,337	27,564	2,570	8,991	2,949	107	-6,854	0.09	4.02	5,963	585	3,779
	IL03	3	0.3	10	18,847	2,241	2,502	36,260	4,543	14,884	3,838	219	-9,814	0.12	4.89	7,707	1,036	6,149
Colo Red Granite	RG01	3	0.1	30	31,258	1,597	8,760	50,618	4,429	18,407	8,884	-1,006	-2,803	0.05	10.46	11,042	1,260	5,694
	RG02	3	0.2	15	36,753	2,956	6,383	61,174	8,200	20,539	11,101	-1,435	-8,048	0.08	9.68	13,620	2,125	7,063
	RG03	3	0.3	10	39,835	3,461	8,981	68,462	10,967	27,023	9,076	-3,639	-8,294	0.09	7.55	14,653	2,865	9,032
Umsettela Basalt	BS01	3	0.1	30	34,390	3,220	-912	58,620	9,338	8,599	9,150	-1,007	-9,803	0.09	21.09	11,953	2,221	4,391
	BS02	3	0.2	15	37,424	3,606	4,164	76,616	12,022	21,181	7,837	-2,650	-12,352	0.10	11.81	15,122	2,892	7,707
	BS03	3	0.3	10	40,335	4,985	4,667	73,478	15,059	23,252	9,054	-2,719	-14,162	0.13	10.88	14,290	3,393	9,090

به‌منظور تدقیق پارامترهای ورودی مدل عددی، برخی از این پارامترها از تحقیق سایر محققان از جمله (Schmidt, 1976)، (Hart, 2000) و (Mattar, 2009)، که بر روی همین سنگ کار کرده‌اند، تخمین زده شد. برای این کار، مدل‌سازی‌های متعددی با خصوصیات متفاوت برای سنگ‌آهک ایندیانا حول مقادیر اعلام‌شده از محققان انجام و نتایج حاصل از حل مدل با نتایج آزمایشگاهی برش خطی مقایسه شد.

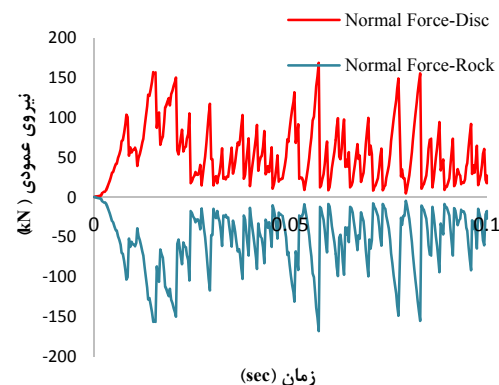
۵- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی

برای به دست آوردن نیروهای برش و مقایسه آن با نتایج حاصل از آزمون آزمایشگاهی برش خطی سنگ‌آهک ایندیانا، مدل‌های زیادی توسعه داده شد و کلیه پارامترهای مؤثر بر نتایج به‌صورت کامل بررسی شده است که در ادامه به بعضی از این پارامترها پرداخته می‌شود. به علت در دسترس نبودن مشخصات کامل سنگ‌آهک ایندیانا در رساله رستمی و

۵-۱- برآورد نیروهای برش

با حل مدل ارائه شده برای آزمایش برش خطی سنگ آهک ایندیانا، نمودار نیروهای برشی وارد بر تیغه دیسکی در سه جهت محورهای x ، y و z به دست آمده است.

مقدار نیرو در راستای محور x نیروی غلتشی (Rolling force) و در راستای محور y ، نیروی عمودی (Normal force) و در راستای محور z ، نیروی جانبی (Side force) در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه، شکل ۹ روند تغییرات نیروی عمودی وارد بر سطح تیغه دیسکی و سنگ در عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و در راستای محور y را نشان می‌دهد. با توجه به الگوریتم لاگرانژی استفاده شده و همچنین طبق قانون سوم نیوتن که عنوان می‌کند "هر عملی، عکس‌العملی دارد، هم‌اندازه با آن و در خلاف جهت آن" می‌توان به صحت این الگوریتم پی برد که مدل، درست حل شده است.



شکل ۹- نمودار روند تغییرات نیروی عمودی وارد بر دیسک و سنگ از حل مدل برش سنگ برای نفوذ ۵ میلی‌متر

نمودار نیروهای برش برحسب زمان مشابه آزمون برش خطی به صورت دندانه اره‌ای است. در روند تشکیل خرده‌های حفاری، با شکل‌گیری تراشه سنگی، فشار در ناحیه خردشده و به دنبال آن نیروی مؤثر بر تیغه کاهش می‌یابد و علت دندانه اره‌ای بودن نمودار را توجیه می‌کند.

رفتار نمودار دندانه اره‌ای به مقاومت سنگ وابسته است. هرچه سنگ مقاوم‌تر باشد، این نمودار با دامنه تغییرات بزرگ‌تر و دوره زمانی کوتاه‌تری همراه خواهد بود و برای سنگ‌های ضعیف‌تر عکس این حالت صادق است

(Rostami, et al., 2002).

نیروهای برش برای دیسک در عمق نفوذ ۵ میلی‌متر از حل عددی مدل برش سنگ برآورد شده است. میانگین مقادیر نیروهای به دست آمده در سه راستا به صورت میانگین نیروی جانبی (MSF)، میانگین نیروی غلتشی (MRF) و میانگین نیروی نرمال (MNF) در طول برش ۲۰۰ میلی‌متر و نفوذ ۵ میلی‌متر در جدول ۵ خلاصه شده است.

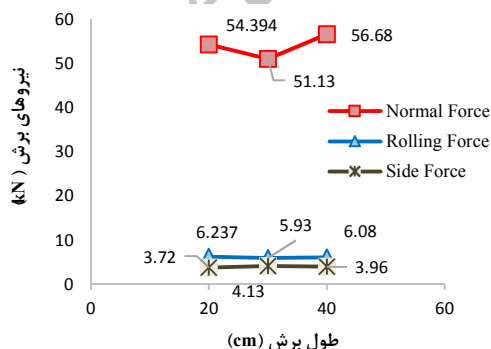
جدول ۵- مقادیر میانگین نیروهای برش از حل مدل عددی در عمق نفوذ ۵ میلی‌متر برای دیسک مقطع ثابت

میانگین نیروی عمودی (kN)	میانگین نیروی غلتشی (kN)	میانگین نیروی جانبی (kN)
۵۴٫۴	۶٫۲۴	۳٫۷۲

۵-۲- بررسی پارامترهای مؤثر بر برش خطی

۵-۲-۱- طول برش

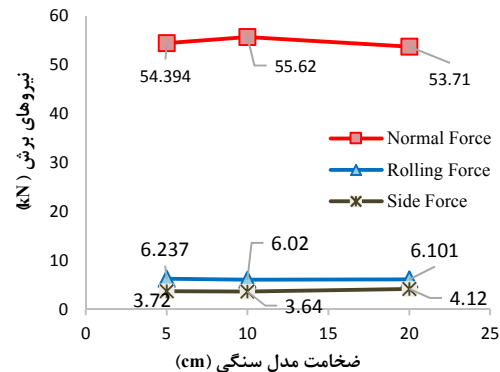
ابعاد بلوک سنگ در آزمون برش خطی در تحقیق رستمی، طول ۱ متر در راستای برش و ضخامت ۰٫۴ متر دارد. به منظور بررسی تأثیر طول برش بر نتایج و اندازه نیروها، مدل‌هایی با طول برش متفاوت طراحی و حل شد و نتایج حاصل در شکل ۱۰ آورده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش طول برش، تأثیر چندانی بر روی نیروهای برش نداشته است؛ بنابراین طول ۲۰۰ میلی‌متر برای ادامه تحلیل‌ها با توجه به زمان حل کمتر، انتخاب می‌شود.



شکل ۱۰- تغییرات نیروهای برش حاصل از شبیه‌سازی عددی در عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و طول‌های برش متفاوت

۵-۲-۲- ضخامت مدل سنگی

با افزایش ضخامت مدل سنگی از ۵۰ به ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر، نیروهای برش برآورد شده و نتایج حاصل در شکل ۱۱ آمده است. همانند طول برش، با افزایش ضخامت مدل سنگی تغییراتی در نیروی برش مشاهده نمی‌شود.



شکل ۱۱- تغییرات نیروهای برش حاصل از شبیه‌سازی عددی در عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و ضخامت‌های متفاوت مدل سنگی

۵-۲-۲- سرعت برش

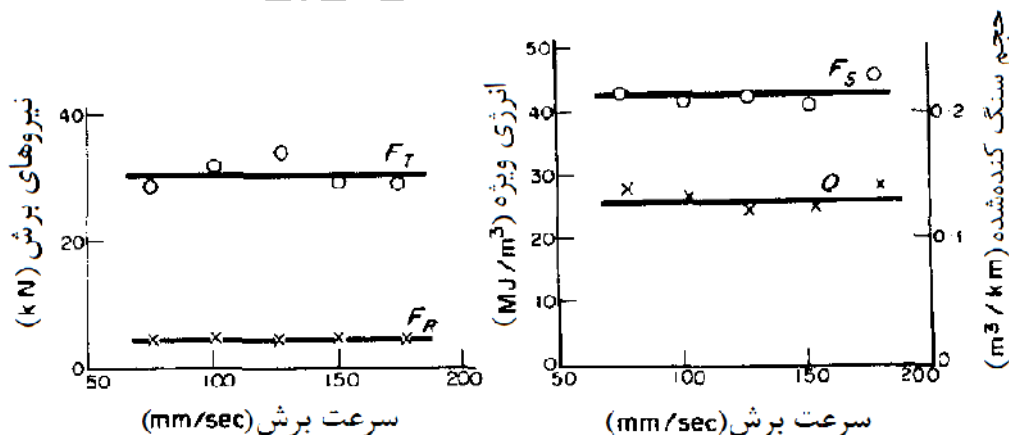
از نتایج تحقیق‌های راکس‌برو و فیلیپس

(Roxborough & Phillips, 1975) و کوک و همکاران (Cook et al., 1984) در خصوص تأثیر سرعت برش بر نتایج، چنین برمی‌آید که سرعت برش تأثیر ناچیزی بر روی نیروهای برش، انرژی ویژه و مقدار حجم سنگ کنده‌شده در واحد طول برش (Q) دارد (شکل ۱۲). به‌منظور بررسی تأثیر سرعت خطی بر روی نیروهای برش و انرژی ویژه، مدل‌هایی با سرعت‌های متفاوت با عمق نفوذ ۵ میلی‌متر طراحی و حل شد. نتایج حاصل در شکل ۱۳ آورده شده است.

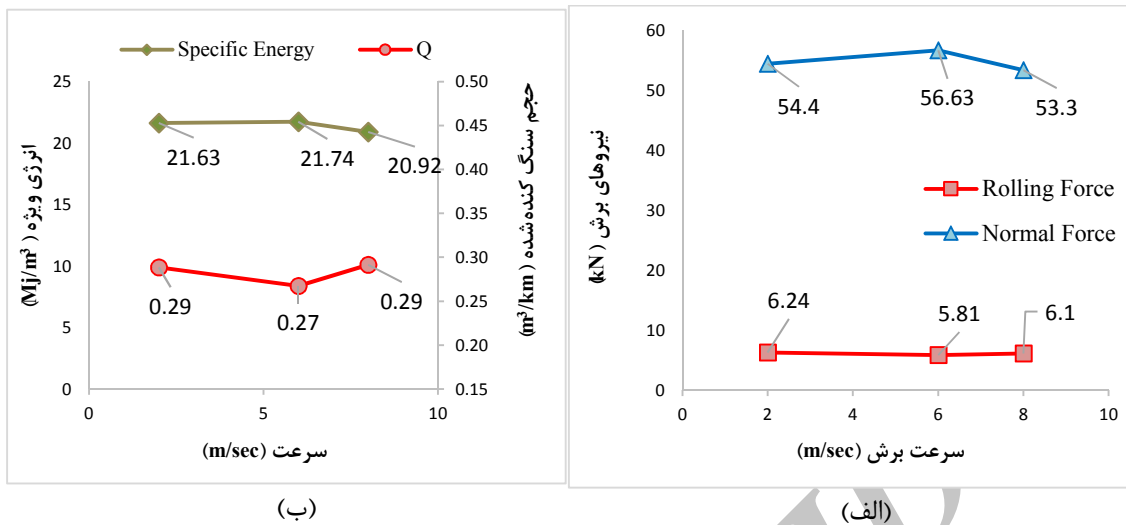
با توجه به نتایج حاصل، می‌توان نتیجه گرفت که سرعت برش تأثیر ناچیزی بر روی نیروهای برش دارد؛ اما برای افزایش دقت شبیه‌سازی بهتر است از سرعت برش استفاده‌شده در آزمایش خطی استفاده شود.

بنا به نظر راکس‌برو و فیلیپس، تنها در صورتی که سرعت برش به نرخ رشد و انتشار ترک‌ها در سنگ نزدیک شود، انتظار می‌رود اثر سرعت برش بر نتایج ظاهر شود؛ اما برش‌های مکانیکی، شامل محدوده سرعت مرتبط با ماشین‌آلات حفاری، یک عملیات شبه استاتیکی (Quasi-Static) است.

همچنین حجم تراشه‌های ایجادشده حین آزمایش مستقل از سرعت تیغه است (Cook, et al., 1984).



شکل ۱۲- تأثیر سرعت برش بر نیروهای برش و انرژی ویژه از کار آزمایشگاهی (Roxborough & Phillips, 1975)



شکل ۱۳- تأثیر سرعت برش بر الف) نیروهای برش، ب) انرژی ویژه و حجم سنگ کنده‌شده از مدل عددی

داده‌های آزمایشگاهی انجام شد.

مقدار انحراف از میانگین با استفاده از گزاره‌ی (۱) برآورد شده است.

$$(1) \quad \text{انحراف \%} = \frac{\text{مقدار آزمایشگاهی} - \text{مقدار برآورد شده از حل مدل عددی}}{\text{مقدار آزمایشگاهی}} \times 100$$

مقادیر انحراف نیروهای عمودی و غلتشی برآورد شده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی رستمی به ترتیب در جدول ۶ و جدول ۷ آورده شده است.

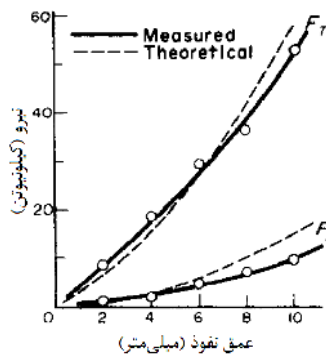
جدول ۶- مقادیر انحراف نیروی عمودی برآورد شده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی

درصد انحراف از میانگین	نتایج آزمایشگاهی (رستمی - ۱۹۹۷)		عمق نفوذ (mm)
	میانگین	میانگین ± معیار	
۷,۳۴	۴۵,۸۶	± ۱۶,۲۶	۲,۵
۱۵,۴	۶۴,۳	± ۱۷,۷۴	۵
۱۰,۷۵	۸۳,۸۴	± ۱۱,۴۲	۷,۵

۶- اعتبارسنجی مدل

تیغه دیسکی مقطع ثابت در عمق‌های نفوذ ۲,۵، ۵ و ۷,۵ میلی‌متر مونتاژ و حل شد، در نهایت میانگین نیروهای عمودی و غلتشی از حل عددی مدل برش سنگ برآورد شده است.

در کار آزمایشگاهی رستمی، برای هر هندسه برش چند آزمایش متوالی با شیارهای منفرد (*Unrelieved cutting*) انجام شده است. به‌عنوان مثال، برای نفوذ ۲,۵ میلی‌متر، آزمایش ۱۱ بار تکرار شده است و در نتیجه ۱۱ مقدار مختلف برای نیروها و سایر پارامترها ثبت شده است. این موضوع با توجه به طبیعت تغییرپذیری سنگ و همچنین مشخصه مطالعات آزمایشگاهی طبیعی است. کاهش داده (*Data reduction*) با میانگین‌گیری از نتایج این تعداد آزمایش انجام شد و در نهایت یک مقدار مشخص برای نیرو و سایر پارامترها به دست آمد. واضح است در شبیه‌سازی عددی با ثابت نگه‌داشتن هندسه برش، با هر بار اجرای مدل، نتایج (اندازه نیرو و سایر پارامترها) تغییری نخواهد داشت. لذا برای مقایسه نتایج و اعتبارسنجی مدل، خروجی کار عددی با میانگین و انحراف معیار نیروها و سایر پارامترهای موردبررسی در کار آزمایشگاهی مقایسه شد. به‌عنوان مثال این مقایسه برای نیروی برش، با درصد انحراف خروجی مدل عددی از میانگین نیروهای برش آزمایشگاهی و همچنین مقایسه خروجی مدل عددی با بازه اطمینان (میانگین بعلاوه منهای انحراف معیار)



شکل ۱۴- اثر عمق نفوذ بر نیروهای برش از مدل راکس‌بورو و فیلیپس (Roxborough & Phillips, 1975)

از اطلاعات جدول ۶ و جدول ۷ چنین برمی‌آید که مطابق با تحقیق‌های قبلی، با افزایش عمق نفوذ، مقدار نیروها در مدل ارائه‌شده برای برش سنگ‌آهک ایندیانا نیز افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۵، نیروهای برشی برآورد شده از شبیه‌سازی عددی با نیروهای برشی به‌دست آمده از نتایج رستمی با در نظر گرفتن انحراف معیار در عمق‌های نفوذ متفاوت مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که تمامی مقادیر نیروهای برش حاصل از شبیه‌سازی عددی در بازه اطمینان داده‌های آزمایشگاهی قرار دارد.

نمودار روند تغییرات نیروهای برش برای عمق‌های نفوذ مختلف از حل مدل عددی برش سنگ به‌وسیله دیسک مقطع ثابت در شکل ۱۶ قابل مشاهده است.

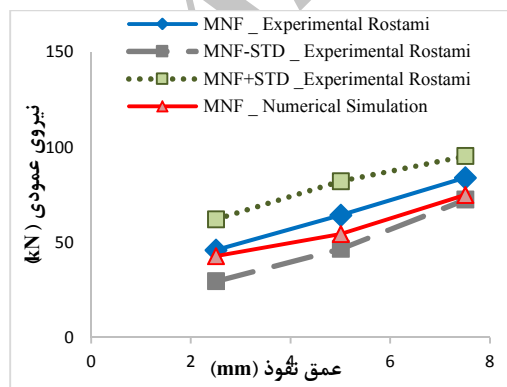
جدول ۷- مقادیر انحراف نیروی غلتشی برآورد شده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی

عمق نفوذ (mm)	میانگین نیروی غلتشی (kN)		درصد انحراف از میانگین
	نتایج حاصل از شبیه‌سازی	نتایج آزمایشگاهی (رستمی - ۱۹۹۷) (انحراف معیار ± میانگین)	
۲٫۵	۴٫۰۶۳	۳٫۳۵ ± ۱٫۲۵	۲۱٫۲۸
۵	۶٫۲۴	۵٫۴۷ ± ۱٫۵۱	۱۴٫۰۲
۷٫۵	۱۱٫۷	۹٫۹۷ ± ۲٫۱۸	۱۷٫۲۵

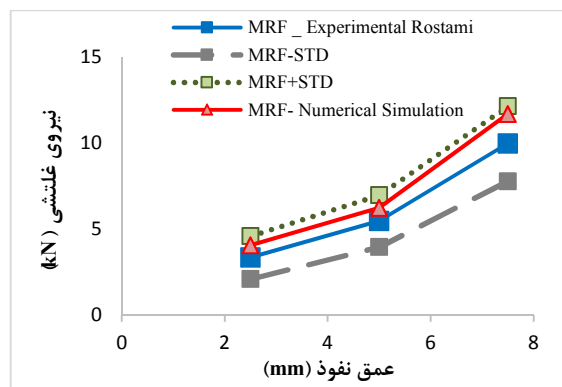
برای تمامی حل‌های مدل عددی، نتایج حاصل در بازه میانگین به علاوه منهای انحراف معیار نتایج آزمایشگاهی قرار گرفته است. از این رو می‌توان گفت که انحراف نتایج مدل عددی از میانگین نتایج آزمایشگاهی صحت مدل عددی را نقض نمی‌کند.

۶-۱- اثر عمق نفوذ بر نیروهای برش

با توجه به مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیر عمق نفوذ بر نیروهای برش از جمله توسط (Roxborough & Phillips, 1975) و (Yang et al., 2014) می‌توان گفت که با افزایش عمق نفوذ، نیروی عمودی و نیروی غلتشی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۴ نیز نشان داده شده است، حساسیت نیروی عمودی نسبت به عمق نفوذ بیشتر است.

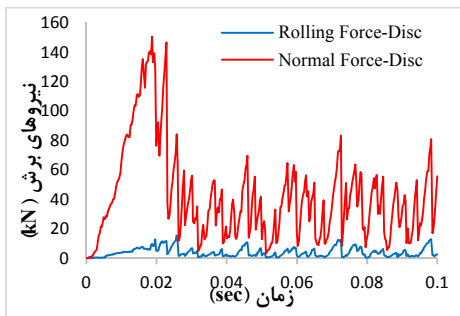


ب

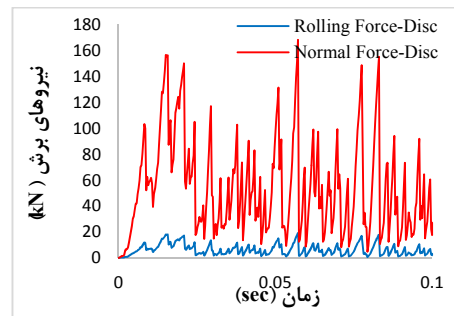


الف

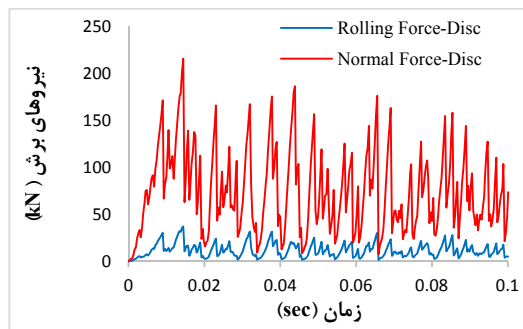
شکل ۱۵- روند تغییرات، الف) نیروی غلتشی و ب) نیروی عمودی حاصل از آزمون برش خطی رستمی و شبیه‌سازی عددی



ب

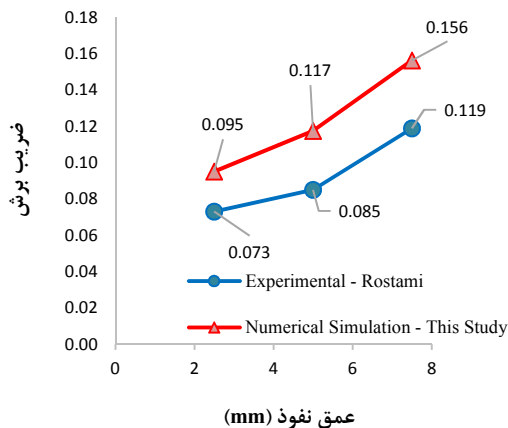


الف



ج

شکل ۱۶- روند تغییرات نیروهای برش وارد بر دیسک مقطع ثابت در عمق‌های نفوذ، الف) ۲/۵، ب) ۵ و ج) ۷/۵ میلی‌متر



شکل ۱۷- روند تغییرات ضریب برش از نتایج کار آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی با احتساب عمق نفوذ

۷- برآورد انرژی ویژه برش سنگ

در مدل‌سازی عددی با روش المان محدود، المان‌هایی که دچار پیچش بسیار زیادی می‌شود و همچنین المان‌هایی که برای آن‌ها مکانیک آسیب تعریف می‌شود؛ در صورت رسیدن

۶-۲- برآورد ضریب برش

نیست نیروی غلتشی به نیروی عمودی، ضریب برش (*Cutting Coefficient*) نامیده می‌شود. این ضریب از گزاره‌ی (۲) قابل محاسبه است. مطالعات انجام شده توسط *Rostami & Ozdemir (1993)* نشان می‌دهد که این ضریب با افزایش عمق نفوذ، افزایش می‌یابد. ضریب برش (*CC*) با احتساب عمق‌های نفوذ متفاوت برای این مطالعه محاسبه شده و با ضرایب برش به‌دست‌آمده از نتایج آزمایشگاهی توسط رستمی مقایسه شده است (شکل ۱۷).

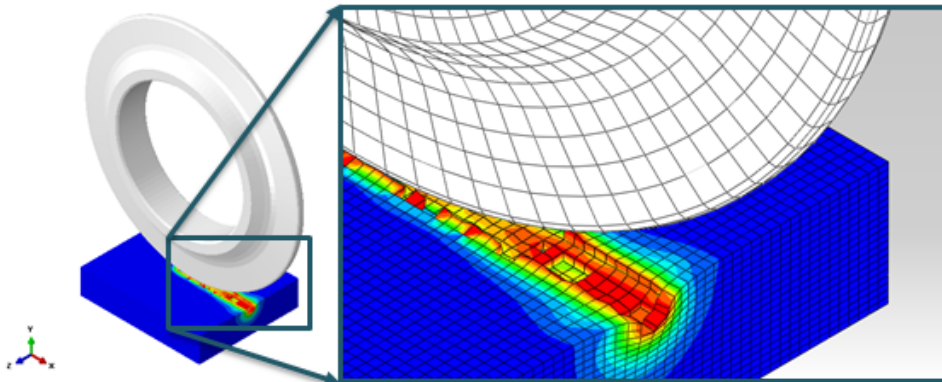
$$CC = \frac{F_R}{F_N} \quad (2)$$

که در آن F_N و F_R به ترتیب نیروی غلتشی و نیروی نرمال است.

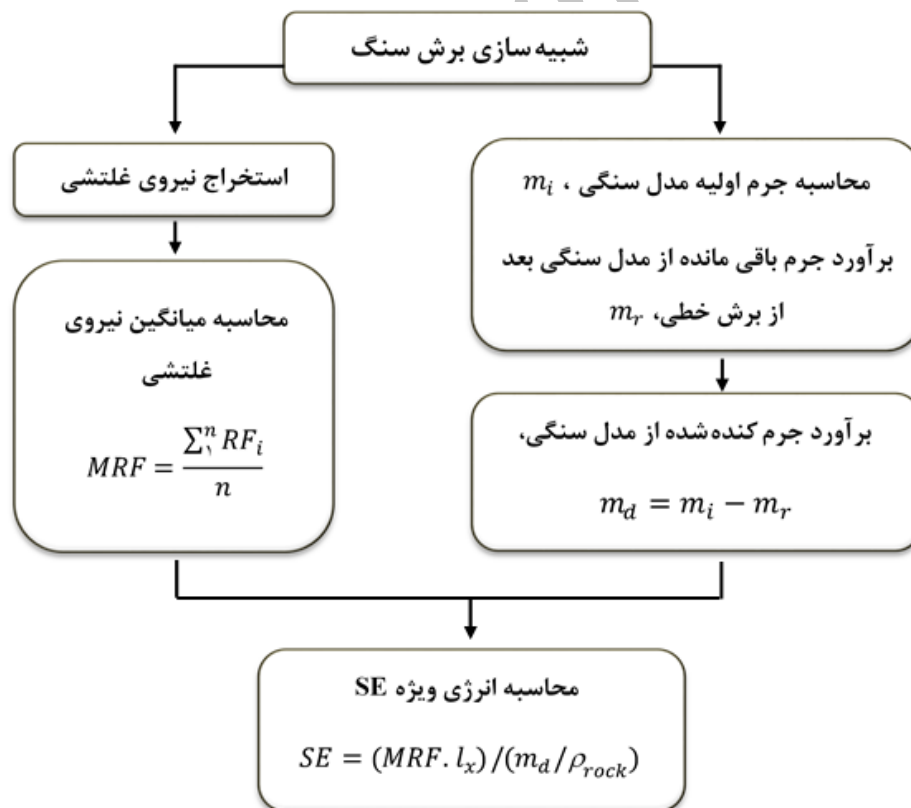
با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که ضریب برش برای این مطالعه با افزایش عمق نفوذ روند صعودی دارد.

برای تعیین انرژی ویژه و ویژه برش از الگوریتم ارائه‌شده در شکل ۱۹ استفاده شده است. انرژی ویژه برای عمق‌های نفوذ مختلف در طول برش ۲۰۰ میلی‌متر برای تیغه دیسکی مقطع ثابت محاسبه و در جدول ۸ آورده شده است.

مقدار آسیب به ۱ از مدل حذف می‌شود (شکل ۱۸). در این مطالعه، جرم کل المان‌های حذف‌شده از مدل محاسبه و با توجه به مشخص بودن چگالی، حجم کلی سنگ کنده‌شده و در نهایت انرژی ویژه (SE) برش محاسبه می‌شود.



شکل ۱۸- شماتیکی از المان‌های حذف‌شده در شبیه‌سازی برش خطی



شکل ۱۹- نحوه محاسبه انرژی ویژه در شبیه‌سازی عددی برش خطی

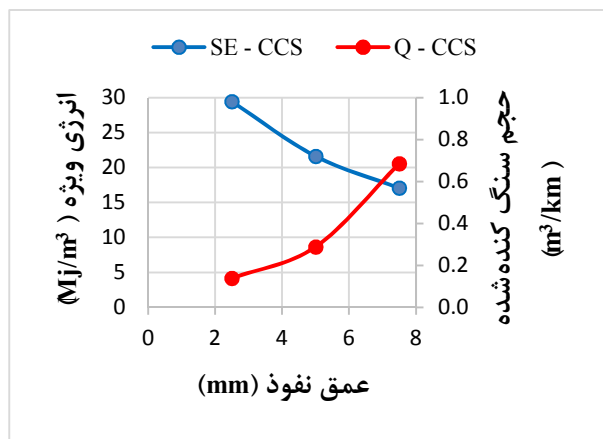
Roxborough & Phillips (1975) که روند تغییرات انرژی ویژه را با احتساب عمق نفوذ ارائه کرده‌اند، بررسی شد. با توجه به نمودار ارائه‌شده در شکل ۲۰-الف، قابل مشاهده است که با افزایش عمق نفوذ میزان حجم سنگ کنده‌شده افزایش و انرژی ویژه کاهش می‌یابد.

شکل ۲۰-ب، روند تغییرات حجم سنگ کنده‌شده و انرژی ویژه برآورد شده از حل عددی را با احتساب عمق نفوذ برای دیسک مقطع ثابت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود روند تغییرات انرژی ویژه برش و حجم سنگ کنده‌شده از شبیه‌سازی عددی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

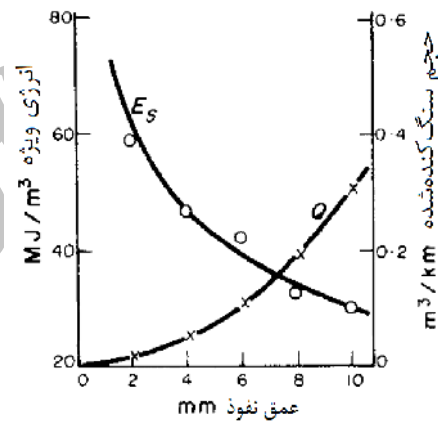
جدول ۸- انرژی ویژه محاسبه‌شده برای تیغه دیسکی

مقطع ثابت با احتساب عمق نفوذ	عمق نفوذ (mm)	حجم سنگ کنده‌شده (cm ³)	انرژی ویژه (MJ/m ³)
	۲٫۵	۲۷٫۶	۲۹٫۵
	۵	۵۷٫۷	۲۱٫۶۳
	۷٫۵	۱۳۷٫۰۵	۱۷٫۰۶

با توجه به اینکه مقادیر انرژی ویژه از نتایج آزمایشگاهی برش منفرد در تحقیق Rostami (1997) موجود نبود، لذا مقادیر انرژی ویژه به‌دست‌آمده از حل عددی با نتایج



ب



الف

شکل ۲۰- اثر عمق نفوذ بر انرژی ویژه و حجم سنگ کنده‌شده، الف) نتایج راکس بورو و فیلیپس (۱۹۷۵) ب) نتایج شبیه‌سازی عددی

عمق برش افزایش می‌یابد. لذا برای این مطالعه ضریب برش برآورد و با نتایج آزمایشگاهی رستمی (Rostami, 1997) و یانگ و همکارانش (Yang et al., 2014) مقایسه شد. روند تغییرات ضریب برش نیز در این مطالعه به‌صورت غیرخطی و صعودی است.

فرآیند برش سنگ از طریق حذف المان‌های زیر دیسک که به آستانه مقاومت کششی خود می‌رسد، شبیه‌سازی شد؛ بنابراین با حل مدل پیشنهادی و برآورد تعداد المان‌های حذف‌شده از مدل سنگ و با در نظر گرفتن ابعاد المان‌ها، حجم برش محاسبه شد. حجم سنگ کنده‌شده با افزایش عمق نفوذ

۸- بحث

نمودار روند تغییرات میانگین نیروهای برش حاصل از نتایج آزمایشگاهی با در نظر گرفتن انحراف معیار ترسیم شد. با توجه به تغییرات موجود مشاهده شد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بازه میانگین نیروهای برش بعلاوه منهای انحراف معیار قرار دارد و مدل ساخته‌شده از اعتبار کافی برخوردار است. با افزایش عمق برش، مقادیر نیروهای برش مطابق با نتایج آزمایشگاهی رستمی، به‌صورت غیرخطی افزایش پیدا کرد.

مطابق با مطالعات انجام‌شده توسط رستمی و ازدمیر (Rostami & Ozdemir, 1993)، ضریب برش با افزایش

آمده از کار عددی در بازه اطمینان (میانگین بعلاوه منهای انحراف معیار) نیروهای برش بدست آمده از کار آزمایشگاهی قرار دارد. همچنین نیروهای برش حاصل از شبیه‌سازی، انحراف حداکثر ۱۵ و ۲۱ درصدی به ترتیب برای نیروی قائم در عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و نیروی غلتشی در عمق نفوذ ۲/۵ میلی‌متر نسبت به میانگین نیروها از نتایج آزمایشگاهی نشان داد.

۱۰- سیاهه‌ی نمادها

سیاهه‌ی نمادها در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹- سیاهه‌ی نمادها		
نماد	واحد	شرح
E	GPa	مدول الاستیسیته
v	-	نسبت پواسون
SE	MJ/m^3	انرژی ویژه
Q	-	حجم سنگ کنده‌شده در واحد طول برش
m_i	gr	محاسبه جرم اولیه مدل سنگی
m_r	gr	جرم باقی‌مانده از مدل سنگی بعد از برش خطی
m_d	gr	جرم کنده‌شده از مدل سنگی
MRF	kN	میانگین نیروی غلتشی
F_R	kN	نیروی غلتشی
F_N	kN	نیروی عمودی
V	cm^3	حجم سنگ کنده‌شده
CC	-	ضریب برش
L_x	mm	طول برش
ρ_{rock}	gr/cm^3	چگالی سنگ
MNF	kN	میانگین نیروی عمودی

۱۱- تشکر و قدردانی

انجام این تحقیق بدون دسترسی به داده‌های آزمایشگاهی آزمون برش خطی سنگ و صحت‌سنجی نتایج میسر نبوده است. از این‌رو، نویسندگان لازم می‌دانند از دکتر جمال رستمی،

مطابق با تحقیق‌های *Roxborough & Phillips (1975)* و *Yang et al. (2014)* روند افزایشی داشت.

با در نظر گرفتن طول برش و میانگین نیروی غلتشی به‌دست‌آمده در راستای محور x و حجم‌المان‌های حذف‌شده، انرژی ویژه برای مدل محاسبه شد. روند به‌دست‌آمده از انرژی ویژه با احتساب عمق برش در این مطالعه به‌صورت غیرخطی و نزولی شد که تطابق خوبی را با روند تغییرات انرژی ویژه برای عمق‌های مختلف نفوذ توسط راکس‌بورو و فیلیپس نشان داد.

در تحقیق حاضر یک مدل عددی پایه برای شبیه‌سازی آزمون برش خطی توسعه داده شد که نتایج اولیه امیدوارکننده‌ای به دنبال داشته است. مطالعه بیشتر در این زمینه در حال انجام است تا با شبیه‌سازی برش‌های هم‌جوار، تعیین نسبت بهینه فاصله‌داری دیسک به عمق برش، تعیین اثر سایش دیسک بر راندمان عملیات برش و غیره، بتوان امکان استفاده کاربردی از این مدل را در برخی از جنبه‌های طراحی ماشین بررسی کرد.

۹- نتیجه‌گیری

آزمون برش سنگ تمام‌مقیاس یکی از آزمون‌های پرکاربرد در طراحی و برنامه‌ریزی پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه با *TBM* است؛ اما به علت پیچیدگی در ساخت و همچنین گران‌بودن انجام آزمایش، تاکنون تعداد محدودی از این دستگاه در مراکز تحقیقاتی دانشگاهی و شرکت‌های سازنده ماشین‌های حفاری و تأمین‌کننده ابزار برش در دنیا ساخته شده است. از این‌رو، این تحقیق با هدف شبیه‌سازی فرایند برش سنگ با تیغه‌های دیسکی مقطع ثابت و بررسی امکان به‌کارگیری نتایج در طراحی این ماشین‌ها در کشور انجام شده است. پس از بررسی پیشینه موضوع تحقیق، فرآیند برش منفرد خطی سنگ به‌وسیله دیسک مقطع ثابت بر پایه روش‌المان محدود با استفاده از کد تجاری آباکوس شبیه‌سازی شد. پس از شبیه‌سازی، اثر پارامترهای مختلف از جمله طول برش، ضخامت مدل سنگی و همچنین سرعت برش خطی بر نتایج آزمون موردتوجه قرار گرفت.

مدل عددی، مونتاژ آن و شرایط مرزی مطابق با شرایط آزمایشگاهی برش خطی بر روی سنگ‌آهک ایندیانا توسعه داده شد. پس از حل مدل عددی، میانگین نیروهای برش شامل نیروهای غلتشی و عمودی برآورد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. مقایسه نتایج نشان داد که مقادیر نیروهای برش بدست

دانشیار مدرسه معدن کلرادو به خاطر در اختیار گذاشتن تشکر و قدردانی نمایند.
اطلاعات آزمایشگاهی موردنیاز این تحقیق و نظرات ارزشمند

۱۲- مراجع

- Acaroglu, O., Ozdemir, L., and Asbury, B., (2008). *A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction*, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 23, PP. 600-608.
- Alimadad, S., Khademi Hamidi, J., Shahriar, K., and Mohammadi, M., (2017). *Measurement of Rock Cutting Forces with Design and Fabrication of Small-scale Linear Cutting Machine*, 6th Iranian Rock Mechanics Conference (IRMC6), Tehran, Iran.
- Bejari, H. and Khademi Hamidi, J., (2013). *Simultaneous Effects of Joint Spacing and Orientation on TBM Cutting Efficiency in Jointed Rock Masses*, Rock Mechanics and Rock Engineering, PP. 897-907.
- Cho, J.W., Jeon, S., Jeong, H.Y. and Chang, S.H., (2013). *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, vol. 35, pp. 37-54.
- Cho, J.W., Jeon, S., Yu, S.H. and Chang, S.H., (2010). *Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method*, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 25, PP. 230-244.
- Cook, N.G.W., Hood, M., and Tsai, F., (1984). *Observations of crack growth in hard rock loaded by an indenter*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 21, PP. 97-107.
- Friant, J. E., and Ozdemir, L., (1994). *Development of the high thrust mini-disc cutter for microtunnelling applications*, No-Dig Engineering, vol. 1, PP. 12-16.
- Gong, Q.M., Jiao, Y.Y. and Zhao, J., (2006a). *Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters*, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 21, PP. 46-55.
- Gong, Q.M., Zhao, J. and Hefny, A.M., (2006b). *Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two TBM cutters and cutter spacing optimization*, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 21, p. 263.
- Gong, Q.M., Zhao, J. and Jiao, Y.Y., (2005). *Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters*, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 20, PP. 183-191.
- Hart, D.J., (2000). *Laboratory Measurements Of Poroelastic Constants And Flow Parameters And Some Associated Phenomena*, PhD(Geophysics), University Of Wisconsin, Madison, PP. 1-30.

- ILIA, (1998). *Indiana Limestone Handbook*. Bedford, USA: Indiana Limestone Institute of America Inc.
- Jaime, M.C., Gamwo, I.K., Lyons, D.K., and Lin, J. S., (2010). *Finite Element Modeling of Rock Cutting*, 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium.
- Jian, S., Peng, Z., Yuhou, W., Jinmei, Y., Defang, Z. and Min, L., (2015). *Stress and Wear Analysis of the Disc Cutter of Rock Tunnel Boring Machine*, The Open Mechanical Engineering Journal, vol. 9.
- Jing, L., (2003). *A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 40, PP. 283-353.
- Li, H.Y. and Shi, G.Y., (2012). *The Numerical Simulations of Forces Acting on TBM Disc Cutters with the Consideration of Confining Pressure and Damage in Rocks*, Applied Mechanics and Materials, vol. 105-107, PP. 1170-1174.
- Ma, H., Yin, L., and Ji, H., (2011). *Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 48, PP. 1021-1033.
- Man, L.T. and Li, S.J., (2011). *Numerical Simulation of Rock Fragmentation Process Induced by Two Disc Cutters*, Advanced Materials Research, vol. 366, PP. 224-228.
- Mattar, P., (2009). *Permeability of intact and fractured Indiana Limestone*, Master's thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montréal, Canada, PP. 34-35.
- Medel-Morales, R.C. and Botello-Rionda, S., (2013). *Design and Optimization of Tunnel Boring Machines by Simulating the Cutting Rock Process using the Discrete Element Method*, Computación y Sistema, vol. 17, PP. 329-339.
- Ozdemir, L., and Nilsen, B., (1999). *Recommended laboratory rock testing for TBM projects*, AUA News, vol. 14, PP. 21-35.
- Rojek, J., Labra, C. and Oñate, E., (2010). *Discrete Element Simulation Of Rock Cutting Processes*, Modern Building Materials, Structures and Techniques - The 10th International Conference.
- Rojek, J., Oñate, E. Labra, C., Kazal, H. and Akerman, J., (2009). *Optimizing rock cutting through computer simulation*, International Center for Numerical Methods in Engineering.
- Rostami, J., (1997). *Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure*, PhD thesis, Department of Mining Engineering, Colorado School of Mines, USA.
- Rostami, J., (2013). *Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 57, pp. 172-186.

- Rostami, J., Gertsch, R. and Gertsch, L., (2002). *Rock Fragmentation by disc cutter, a critical review and an update*, Proceedings of the North American Rock Mechanics Symposium (NARMS) – Tunnelling Association of Canada (TAC) Meeting. Toronto, Canada.
- Rostami, J., and Ozdemir, L., (1993). *A New Model For Performance Prediction of Hard Rock TBMs*, Proc of Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), pp. 793-809.
- Roxborough, F.F. and Phillips, H.R., (1975). *Rock excavation by disc cutter*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 12, PP. 361-366.
- Schmidt, R.A., (1976). *Fracture-toughness testing of limestone*, Experimental Mechanics, vol. 16, PP. 161-167.
- Zhang, Y., Wang, X., and Liu, H., (2014). *Numerical Simulation of Rock-breaking Process by Disc Cutter in Tunnel Boring Machine*, Applied Mechanics and Materials, vol. 487, PP. 513-516.
- Zhou, P., Wang, C., Gao, W. and Wu, Y., (2013). *Research on the Rock Breaking by Double Disc Cutter Test-bed*, Advanced Materials Research, vol. 690-693, PP. 2484-2489.
- Yang, W., Xue, Y., and Zhang, X., (2014). *Experimental Study on Rock Fragmentation by the 19-inch TBM Cutter and Statistical Analysis of Debris*, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, pp. 1-10.