

مقاله پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی اندرکنش تیغه - سنگ در مرز لایه‌های سنگی در حفر تونل با ماشین تونل‌زنی تمام مقطع

امیر عزت‌خواه^۱، جعفر خادمی حمیدی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه تربیت مدرس، amir.ezzatkah@modares.ac.ir

۲. دانشیار گروه استخراج معدن، دانشگاه تربیت مدرس، jafarkhademi@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۸/۶ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۹

چکیده

مرز مشترک لایه‌های سنگی در عملیات استخراج و حفاری مکانیزه در معادن و تونل‌سازی چالش‌های مختلفی را به وجود می‌آورد و ممکن است بدون هشدار قبلی باعث بروز مشکلاتی مانند خرابی تیغه‌ها، لرزش ماشین و کاهش سرعت پیشروی شود. در چنین شرایطی، درک دقیق فرآیند برش و اندرکنش تیغه - سنگ برای طراحی ماشین، موفقیت بسیار مهمی است. در این مطالعه، اندرکنش بین سنگ و تیغه برای اندازه‌گیری نیروهای برش در ناحیه مرزی دو لایه سنگی با استفاده از ماشین برش خطی کوچک مقیاس مجهز به تیغه دیسکی با قطر ۵۴ میلی‌متر بررسی شد. نمونه‌های مورد مطالعه در حالت مختلط با ترکیبی از ماسه‌سنگ با مقاومت ۳۷ مگاپاسگال و دو نوع گچ مصنوعی با مقاومت‌های ۲۱ و ۲۴ مگاپاسگال تهیه شد. آزمایش برش خطی در عمق‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر انجام شد. نتایج آزمون‌ها نشان داد در نمونه‌های مختلط با رسیدن تیغه به مرز دو نمونه با مقاومت متفاوت، نیروهای عمودی و غلتشی دچار تغییرات شدید می‌شود. به عنوان مثال و بر اساس شرایط آزمایشگاهی این تحقیق، نیروهای عمودی تا ۲/۷ برابر و نیروهای غلتشی تا ۱۰/۲ برابر نیروهای اولیه افزایش یافت. همچنین، نتایج آزمون‌های برش نشان داد که با افزایش عمق برش، اختلاف نیروها و نیز نسبت نیروهای مرزی به نیروهای برش سنگ در حالت برش غیرمختلط، در ناحیه مرزی کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج این تحقیق، با توجه به این که در مرز نمونه مختلط، تیغه برشی الگوی متفاوتی از نیروهای برش را تجربه می‌کند، اهمیت انتخاب تیغه مناسب بر اساس الگوی تغییرات نیروهای مرزی در شرایط میدانی برای ماشین تونل‌زنی تمام‌مقطع بیشتر می‌شود. همچنین مشاهده شد که این اختلاف نیروها منجر به شکل‌گیری نیروی ضربه در مرز تغییر لایه سنگی می‌شود که این مساله در شرایط میدانی، ضرورت تعیین چقرمگی و سختی مناسب ابزار را برای به حداقل رساندن خرابی آن‌ها در شرایط جبهه‌کار مختلط بیشتر نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

آزمون برش خطی سنگ، تیغه دیسکی، جبهه‌کار مختلط، نیروهای مرزی.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

فشاری تک‌محوره مورد مطالعه قرار دادند و ویژگی‌های برش سنگ را بر روی سنگ‌های نرم تا سخت تجزیه و تحلیل کردند [۱۰]، [۱۱]. ژانگ و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۸ اثرات شرایط زمین‌های مختلط را بر روی نیروهای برش و الگوی خرابی تیغه بررسی و اشاره کردند که تغییر شرایط زمین منجر به ایجاد نیروهای متغیر بر روی تیغه‌ها و گشتاورهای خارج از مرکز بر روی کله حفار TBM می‌شود که این موضوع در نهایت باعث سایش زیاد و آسیب تیغه می‌شود [۱۲].

تیغه‌های دیسکی TBM همیشه در تماس مستقیم با سنگ‌اند، بنابراین می‌توان با مطالعه ویژگی‌های نیروهای برش و انتشار ترک در سنگ، مشکلات تیغه در مرز مشترک دو سنگ را تجزیه و تحلیل کرد. پیش از این، مطالعات زیادی از جمله آزمون‌های آزمایشگاهی برای تجزیه و تحلیل فرآیند برش سنگ به وسیله تیغه دیسکی انجام شده است. بر اساس تعداد زیادی از آزمون‌های برش و داده‌های آماری، مدل توسعه یافته در مدرسه معادن کلرادو^۴ [۱۳]، [۱۴] و دانشگاه علم و صنعت نروژ^۵ [۱۵] برای پیش‌بینی نیروهای برش تیغه و آهنگ نفوذ ماشین پیشنهاد شده است. تاثیر فشار محصورکننده و فاصله درزه‌داری بر شکست سنگ و عملکرد TBM با استفاده از آزمون‌های برش خطی تمام مقیاس و آزمون‌های نفوذ برای ارزیابی عملکرد برش تیغه دیسکی انجام شده است [۱۶]– [۲۲]. گرتش و همکاران^۶ در سال ۲۰۰۷، نیروهای عمودی، افقی، جانبی و سایر پارامترهای برش را برای مجموعه‌ای از آزمون‌های برش با هندسه مختلف برش به وسیله یک دیسک ۱۷ اینچی بر روی یک نوع سنگ محاسبه کردند [۲۳]. علاوه بر این، آزمون برش دایره‌ای تمام مقیاس برای تجزیه و تحلیل روند برش سنگ و عملکرد تیغه‌های محیطی^۷ انجام شده است [۲۴].

در بررسی اندرکنش تیغه-سنگ در فرآیند برش نمی‌توان نقش خواص متالورژیکی تیغه را نادیده گرفت. سختی^۸ و چقرمگی^۹ تیغه دو پارامتر اساسی در کارایی و رفتار سایشی آن به شمار می‌رود. سختی و چقرمگی با یکدیگر رابطه معکوس دارند؛ به طور کلی مواد سخت‌تر، چقرمگی کمتری دارند. چقرمگی تیغه که با هدف مقاومت آن در برابر ضربه‌های متفاوت،

ماشین‌های حفر مکانیکی مانند ماشین تونل‌زنی (TBM) به طور روزافزون در ساخت‌وسازهای زیرزمینی با کاربری‌های مختلف استفاده می‌شوند. این روش حفاری در شرایط ایده‌آل زمین، روشی بسیار کارآمد به شمار می‌رود. شرایط ایده‌آل زمین برای تونلسازی با TBM شامل مشخصات خوب ماده سنگ (مقاومت کم تا متوسط، سختی و ساینده‌گی کم و یکنواختی بالا)، توده سنگ (تعداد کم ناپیوستگی، نبود گسل و زون‌های خردشده و هوازدگی کم) و زمین‌شناسی (آب زیرزمینی کم، تنش برجا متوسط و نبود گاز) است [۱] اما در عمل و در حین حفر تونل، شرایط ایده‌آل کمتر مشاهده می‌شود.

در شرایط نامساعد زمین، مواردی از جمله مناطق گسل خورده، جبهه‌کارهای دایم در حال تغییر و جبهه‌کار مختلط، مشکلاتی مانند کاهش آهنگ پیشروی، مصرف غیرطبیعی تیغه، ناپایداری جبهه‌کار تونل، ورود آب و تاخیر زمانی مشاهده می‌شود [۲]– [۸].

یکی از مسایل مهم در حفر مکانیکی، اندرکنش سنگ و تیغه برش ماشین است که بر پارامترهای طراحی ماشین هم اثرگذار است. مطالعه شکست سنگ به وسیله تیغه‌های دیسکی در شرایط غیرمعمول به‌عنوان مثال مرز مشترک دو لایه سنگی اهمیت مهندسی بسیار زیادی به ویژه برای بهبود عملکرد TBM دارد. حفر جبهه‌کار با اعمال نیروی پیشران TBM تماس تیغه‌ها با جبهه‌کار و نفوذ در توده سنگ انجام می‌شود که در نتیجه آن، نیروهای برش در لبه تیغه، شکل می‌گیرند. با رسیدن به نقطه بحرانی، یک منطقه پلاستیک و ترک‌های شعاعی شکل می‌گیرند، سپس، وقتی ترک‌ها به سطح آزاد گسترش می‌یابند یا ترک‌های جانبی شکل گرفته از برش‌های مجاور به یکدیگر می‌رسند، قطعات سنگی تشکیل می‌شود. این فرآیند به عنوان مکانیزم شکست سنگ شناخته می‌شود.

مکانیزم شکست سنگ با تیغه برشی به ویژه در زمین‌های مختلط موضوعی پیچیده و در عین حال جالب است اما تاکنون زمینه انجام مطالعات محدودی را فراهم کرده است. یانگ و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۶ بیان کردند که درجه ناهمسانگردی سنگ و شیب مرزی زمین‌های مختلط، تاثیر زیادی بر رفتار شکست جبهه‌کار مختلط دارند [۹]. مونوز و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۶ رفتار تنش- کرنش سنگ‌ها را تحت آزمون‌های مقاومت

³ Zhang et al.⁴ Colorado School of Mines (CSM)⁵ Norwegian University of Science and Technology (NTNU)⁶ Grets et al.⁷ Gauge cutters⁸ Hardness⁹ Toughness¹ Yang et al.² Munoz et al.

دست‌ساز برای شبیه‌سازی زمین مختلط استفاده شد. نمونه‌ها به گونه‌ای ساخته شد که تیغه دیسکی شرایط زمین مختلط را به خوبی تجربه کند. برای این منظور، قطعات برش‌خورده از یک نوع ماسه‌سنگ به همراه دو نوع گچ مصنوعی تهیه و استفاده شد. خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگی در جدول ۱ و ترکیب نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۲ آمده است. در جدول ۲، عنوان ترکیب نمونه بیانگر محل شروع و پایان برش با تیغه است. به عنوان مثال، در نمونه ماسه‌سنگ-گچ مصنوعی (DDP1)، حرکت تیغه از ماسه‌سنگ آغاز و بعد از عبور از ناحیه مرز دو نمونه، وارد گچ مصنوعی می‌شود.

۲-۲- ماشین برش خطی سنگ

برای بررسی تعامل تیغه‌های دیسکی با سنگ در مقیاس آزمایشگاهی، از ماشین برش خطی سنگ (LRCM) برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. آزمون برش کوچک مقیاس با استفاده از تیغه‌های دیسکی برای اندازه‌گیری نیروهای برش سنگ در فاصله و عمق‌های مختلف برش انجام می‌شود. نیروهای مورد نظر برای یک هندسه مشخص برش در طول آزمایش اندازه‌گیری و بر حسب زمان یا جابه‌جایی ترسیم می‌شود. نیروهای برش اندازه‌گیری شده برای پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفاری در ساختارهای مختلف سنگی استفاده می‌شود.

ماشین برش خطی سنگ در دانشگاه تربیت مدرس با قابلیت تنظیم برش سنگ در نفوذ و فاصله‌های معین با توان ۵/۹ کیلووات و حداکثر گام پیشروی ۹۰۰ میلی‌متر طراحی شده است. نمای کلی ماشین برش خطی در شکل ۱ آمده است.

ماشین برش خطی قابلیت ثبت و اندازه‌گیری نیروها را به وسیله دینامومتر با دقت ۱ کیلوگرم در سه راستای عمودی، افقی و جانبی دارد. نمونه سنگ به شکل بلوک یا مغزه در گیره روی میزکار محکم می‌شود. در مورد نمونه‌هایی که تهیه بلوک یا مغزه از آن دشوار است می‌توان ابتدا به وسیله ملات، قالب‌گیری را انجام و سپس در جعبه نمونه قرار داد. تیغه برش به وسیله نگهدارنده به دینامومتر وصل شده است. نیروهای وارد بر نوک تیغه به وسیله دینامومتر اندازه‌گیری و با یک دیتالاگر با نرخ داده‌برداری ۵۰۰ هرتز ثبت می‌شود [۲۷].

در این تحقیق، قبل از انجام آزمون برش، سیستم ثبت داده واسنجی شد. آزمون‌های برش با سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه برای ایجاد شیار خطی با عمق معین انجام شد.

در حین ساخت تیغه و با کنترل سیکل عملیات حرارتی ایجاد می‌شود، نقش اساسی و تعیین‌کننده‌ای در مقدار عمر تیغه در شرایط جبهه‌کار مختلط دارد. در چنین شرایطی، اگر ویژگی‌های مکانیکی ابزار برش با شرایط زمین‌شناسی مطابقت نداشته باشد، سایش و خرابی‌های ناشی از فشارهای تماسی و لرزه‌ای تیغه افزایش می‌یابد. آزمون‌های برش خطی بزرگ‌مقیاس توسط لین و همکاران^۱ [۲۵] نشان می‌دهد که ابزارهایی با سختی و چقرمگی ضربه^۲ متفاوت، روی دو نمونه سنگ گرانیت و یک نمونه سنگ گنیس، نتایج سایش متفاوتی دارند. این مطالعه نشان می‌دهد که بهترین میزان سختی تیغه دیسکی ۵۷ تا ۵۷/۵ راکول سی و بهترین میزان چقرمگی ۳/۵ تا ۳/۷ J/cm^۲ است. در مطالعه ژانگ و همکاران^۳ [۲۶] رفتار تیغه‌هایی با سختی و چقرمگی مختلف به هنگام برش سنگ گنیس (سخت)، ماسه‌سنگ (نرم) و سنگ روست^۴ مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان یکی از نتایج تحلیل‌ها مشخص شد که در سنگ گنیس با افزایش سختی تیغه دیسکی در ابتدا مقاومت به سایش افزایش پیدا می‌کند اما با رسیدن به سختی ۵۸ راکول، مقاومت به سایش به دلیل کاهش چقرمگی کاهش می‌یابد.

بررسی متون نشان می‌دهد حجم تحقیق‌های مرتبط با حفر مکانیکی در زمین‌های مختلط چه در مقیاس میدانی و چه آزمایشگاهی اندک است. همچنین، در مورد روند تغییرات و تجزیه و تحلیل نیروهای برش در ناحیه مرز لایه‌های سنگی یا تحقیقی انجام نگرفته یا در صورت انجام، نتایج آن منتشر نشده است. در تحقیق حاضر، پارامترهای عملکرد تیغه دیسکی شامل نیروهای برش و ضربه در زمین‌های مختلط و در محل تماس تیغه با مرز لایه‌ها در آزمون برش خطی کوچک مقیاس مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر، این نیروها به عنوان نیروهای مرزی تعریف می‌شود.

این تحقیق اگرچه در مقیاس آزمایشگاهی و به وسیله تیغه مینی‌دیسک انجام می‌شود اما یافته‌های حاصل از آن در شرایط میدانی و برای طراحی ماشین در زمین‌های مختلط مفید و کاربردی خواهد بود.

۲- آزمون برش سنگ با تیغه دیسکی

۲-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

در این تحقیق از ترکیب نمونه سنگ‌های طبیعی و

¹ Lin et al

² Impact toughness

³ Zhang

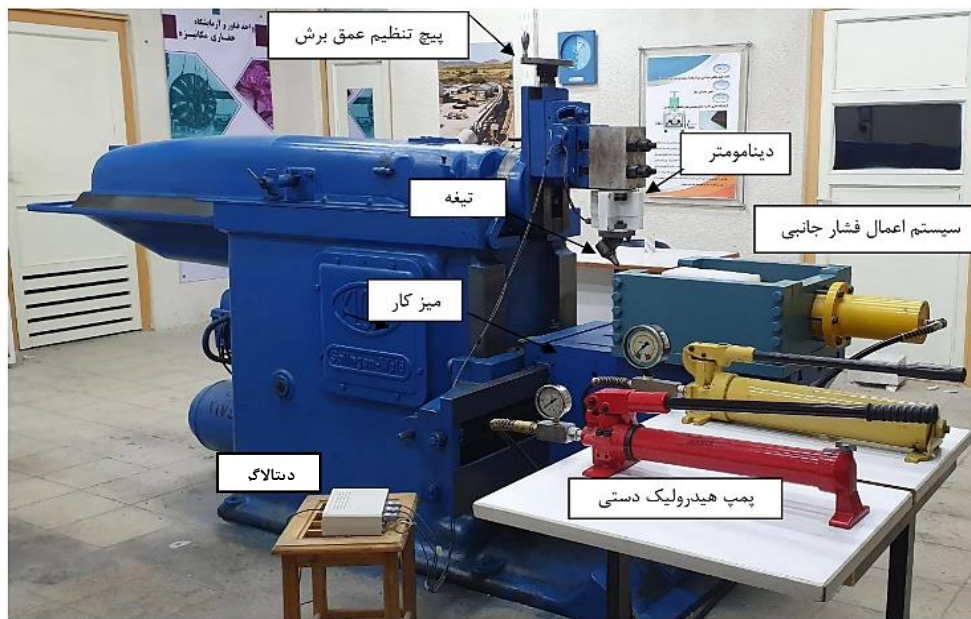
⁴ Rust stone

جدول ۱- خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها [۲۸]، [۳۰] و [۳۱]

ردیف	نمونه	مقاومت فشاری: σ_c (مگاپاسکال)	مقاومت کششی: σ_T (مگاپاسکال)	مدول یانگ: E (گیگاپاسکال)	σ_c/σ_T
۱	ماسه سنگ	۳۷/۵	۳/۹۵	۵/۳۲	۹/۵۹
۲	گچ مصنوعی (DDP1)	۲۴/۶۲	۳/۸۸	۶/۲	۶/۳۴
۳	گچ مصنوعی (DDP2)	۲۱/۱۵	۴/۲	۴/۲۵	۵/۰۳

جدول ۲- ترکیب نمونه‌های مورد مطالعه

شماره نمونه	ترکیب	شماره نمونه	ترکیب
۱	ماسه‌سنگ- گچ مصنوعی (DDP1)	۳	گچ مصنوعی (DDP1) - ماسه‌سنگ
۲	ماسه‌سنگ- گچ مصنوعی (DDP2)	۴	گچ مصنوعی (DDP2) - ماسه‌سنگ



شکل ۱- ماشین برش خطی سنگ در آزمایشگاه حفاری مکانیزه دانشگاه تربیت مدرس [۲۷].

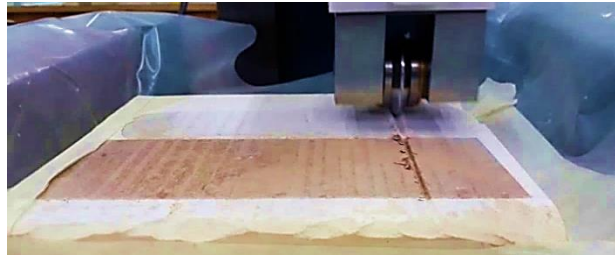
۳-۲- تیغه

۱۷ اینچی است [۲۷]، [۲۸]. تیغه به وسیله یک نگهدارنده با اتصالات جداشدنی روی ماشین نصب می‌شود. در شکل ۲ تیغه دیسکی و نگهدارنده آن نشان داده شده است.

در این مطالعه از تیغه دیسکی برای آزمون برش خطی استفاده شده است. تیغه دیسکی ۷ شکل با شعاع لبه ۱/۵ میلی‌متر و قطر ۵۴ میلی‌متر در مقیاس ۱:۸ نسبت به دیسک



شکل ۲- تیغه دیسکی (عرض لبه ۱/۵ میلی‌متر) [۲۸]



شکل ۳- فرآیند برش سنگ با تیغه دیسکی؛ نمونه: گچ مصنوعی (DDP2) - ماسه سنگ، عمق برش: ۲ میلی متر

۲-۴- آزمون برش سنگ

در این تحقیق، نمونه سنگ طبیعی در اندازه $200 \times 50 \times 180$ میلی متر مکعب در قالب نمونه بلوکی با ابعاد $250 \times 250 \times 200$ میلی متر مکعب قرار گرفته و از گچ مصنوعی به عنوان نمونه سنگ مجاور استفاده شد. در هنگام قالب گیری نمونه سعی شد تا کمترین میزان فاصله داری در مرز مشترک بین دو سنگ وجود داشته باشد. آزمون در عمق های برش ۱، ۲ و ۳ میلی متر انجام شد (شکل ۳). به منظور افزایش صحت نتایج برای هر عمق برش حداقل سه بار تکرار آزمایش برش در نظر گرفته شد. به دلیل نبود همپوشانی شیارها، فاصله بین شیارها به گونه ای انتخاب شد که همه آزمون های برش در حالت برش منفرد انجام شود. سطح نمونه قبل از انجام آزمون برش، به وسیله تیغه اسکانه ای با شیارهایی به فاصله صفر در عمق نفوذ ثابت تسطیح شد تا آزمون برش در طول پیشروی تیغه دیسکی با عمق نفوذ یکسان انجام شود. نیروهای وارد بر نوک تیغه در مرزهای سنگی به وسیله دینامومتر^۱ اندازه گیری شد.

۳- نتایج و بحث

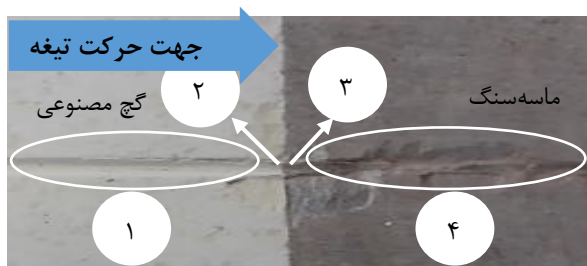
۳-۱- تغییرات نیرو در مرز لایه های سنگی

آزمون برش خطی سنگ به وسیله تیغه دیسکی با هدف بررسی نیروهای مرزی نمونه های مختلط در حالت های برش منفرد از سنگ با مقاومت کمتر به سنگ با مقاومت بیشتر و برعکس انجام شد. مطابق با شکل ۴ تغییرات نیروها در نمونه ماسه سنگ- گچ مصنوعی در ناحیه ۱، نیرو در انتهای نمونه اول در نقطه ۲، نیرو در ابتدای نمونه دوم در نقطه ۳ و نیروها در نمونه دوم در ناحیه ۴ به همراه جهت حرکت تیغه نشان داده شده است.

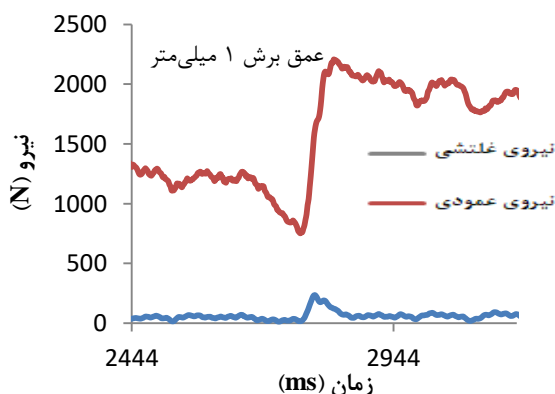
در شکل های ۵- الف و ب، نمودار تغییرات مقادیر نیروهای عمودی و غلتشی به ترتیب برای برش از نمونه گچ مصنوعی (DDP2) به ماسه سنگ و بالعکس در عمق ۱ میلی متر آمده است. از شکل ۵ می توان دریافت کرد که در دو حالت برش با تیغه از سنگ با مقاومت کمتر به سنگ با مقاومت بیشتر و

بالعکس، نیروهای عمودی بعد از عبور تیغه از مرز، در سطح نیروی عمودی لازم برای برش نمونه دوم نوسان می کند. در عین حال، نیروی غلتشی در دو حالت حرکت تیغه از سنگ با مقاومت کمتر به سنگ با مقاومت بیشتر و عکس آن، رفتار متفاوتی نشان داده است، به گونه ای که مقدار این نیرو بعد از یک نوسان در ناحیه مرز، به مقدار نیروی غلتشی مورد نیاز برای برش نمونه اول نزدیک شده است.

برای درک و پدیده شناسی بهتر موضوع، تغییرات مقادیر بی مقیاس شده نیروهای غلتشی و عمودی برای نمونه گچ مصنوعی- ماسه سنگ (متناسب با شکل ۵- الف) در شکل ۶ نشان داده شده است. با نگاهی به شکل ۶ می توان دریافت که به عنوان مثال برای حالتی که تیغه از سنگ با مقاومت کمتر به سنگ با مقاومت بیشتر وارد می شود، نیروی غلتشی تیغه بعد از یک نوسان شدید در ناحیه مرز، به سطح نیروهای اولیه قبل از مرز نزدیک می شود.



شکل ۴- برش نمونه سنگ مختلط (نمونه گچ مصنوعی (DDP2) - ماسه سنگ) با تیغه دیسکی در عمق ۱ میلی متر

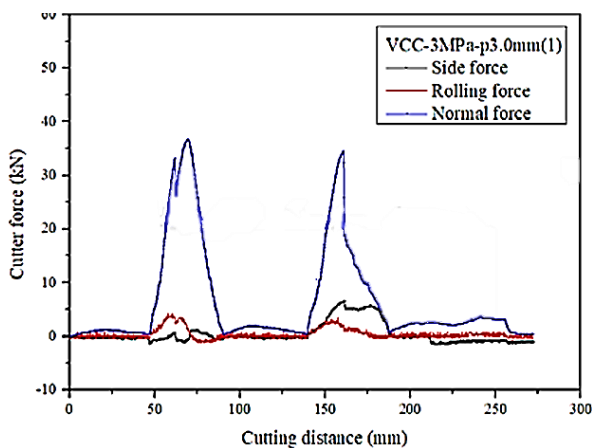


(الف)

¹ Dynamometer

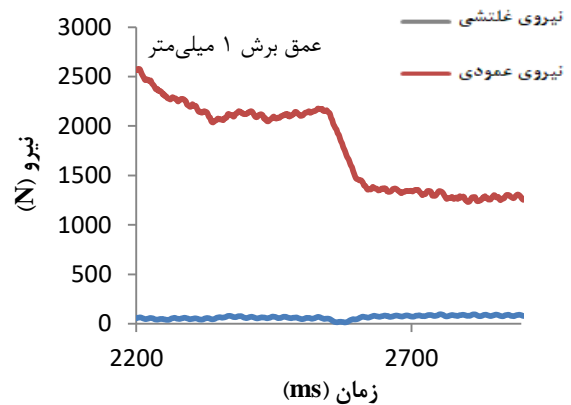
از مقایسه نمودار تغییرات نیروها از نتایج مطالعه حاضر در شکل ۵ با نمودار تغییرات نیروها از مطالعه جنونگ و همکاران [۲۹] در شکل ۷ می‌توان دریافت که به طور مشابه تیغه دیسکی در ناحیه مرز، نوسانات هر دو نوع نیروی غلتشی و عمودی را تجربه می‌کند.

همچنین در مقایسه‌ای دیگر از نتایج تحقیق حاضر در شکل ۶ با خروجی تحقیق جنونگ و همکاران در شکل ۷، یک عدم تطابق در الگوی نوسان نیروها در ناحیه مرز مشاهده می‌شود. در مطالعه جنونگ و همکاران، نیروی عمودی و در مطالعه حاضر، نیروی غلتشی نوسانات شدیدتر را تجربه می‌کنند. این اختلاف در رفتار نیروها به شرایط مقاومتی متفاوت نمونه‌های مورد استفاده در دو مطالعه برمی‌گردد. در مطالعه جنونگ و همکاران، نسبت مقاومت دو سنگ در نمونه‌های مختلط بسته به مقاومت دوغاب از ۱۸ تا ۱۳۰ است در حالی که در تحقیق حاضر، این نسبت (مقاومت ماسه‌سنگ به مقاومت گچ‌های مصنوعی) کمتر از ۲ است. این سبب شده است که نیروی غالب شکست سنگ در مطالعه جنونگ و همکاران برای فروروی^۲ تیغه در سنگ در ناحیه مرز باشد.



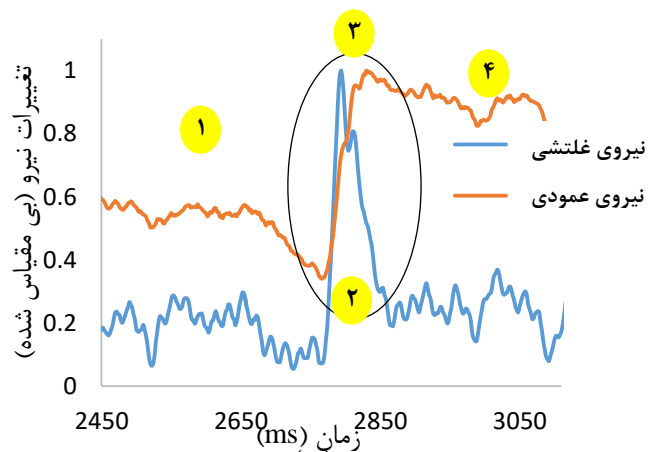
شکل ۷- مثال اندازه‌گیری سه نیروی برش جهت‌دار در SLCM [۲۹]

برای نمایش مقدار نیروی وارد شده به تیغه دیسکی در مرز نمونه مختلط از نمودار نسبت حداکثر نیروی مرزی به حداقل نیروی مرزی در عمق‌های مورد مطالعه استفاده شد. در شکل‌های ۸ و ۹ نمودارهای میانگین تغییرات نیروهای عمودی و غلتشی در مرز مشترک چهار نمونه مورد مطالعه (مطابق جدول ۲) به وسیله تیغه دیسکی مشاهده می‌شود. در این نمودارها هرچه مقدار نسبت نیروها به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد که نیروی کمتری در مرز نمونه مختلط به تیغه دیسکی وارد شده است. در مقابل، هرچه این نسبت از مقدار ۱ بیشتر باشد، نشان می‌دهد که نیروی بیشتری به تیغه وارد شده است.



(ب)

شکل ۵- برش نمونه سنگ مختلط در عمق ۱ میلی‌متر و تغییرات نیرو در ناحیه مرز. الف- از گچ مصنوعی (DDP2) به ماسه‌سنگ؛ ب- از ماسه‌سنگ به گچ مصنوعی (DDP2)



شکل ۶- تغییرات مقادیر بی‌مقیاس شده نیروهای عمودی و غلتشی در برش نمونه گچ مصنوعی (DDP2) - ماسه‌سنگ بر اساس موقعیت‌های تعریف شده در شکل ۴

جنونگ^۱ و همکاران [۲۹] در تحقیق تقریباً مشابه‌ای و با هدف شبیه‌سازی جبهه‌کار مختلط در زمین‌های آبرفتی با وجود سنگ‌های درشت، یک قلوه‌سنگ مقاوم (با مقاومت فشاری تک‌محوری ۲۰۰ مگاپاسکال) را در مسیر حرکت یک تیغه دیسکی که در حال برش دوغاب نرم (با چهار مقدار مقاومتی متفاوت ۱/۵، ۳، ۷ و ۱۱ مگاپاسکال) است، قرار داده‌اند. خروجی تحلیل نیروهای برش یک نمونه مختلط از تحقیق جنونگ و همکاران در شکل ۷ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در زمین‌های آبرفتی، واکنش تیغه دیسکی در مرز دو نمونه سنگ به صورت تغییرات بارز لحظه‌ای نیروهای عمودی و غلتشی است.

² Indentation

¹ Jeong

در شکل ۹، نسبت تغییرات لحظه‌ای نیروهای غلتشی مرزی در عمق ۱ میلی‌متر از ۲/۲۱ تا ۱۰/۲۳، در عمق ۲ میلی‌متر از ۲/۳۰ تا ۴/۸۴ و در عمق ۳ میلی‌متر از ۱/۵۱ تا ۴/۱۳ ثبت شده است. در عمق ۱ میلی‌متر بیشترین نسبت تغییرات نیروهای مرزی مشاهده می‌شود. همچنین در عمق ۱ میلی‌متر بیشترین پراکندگی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وجود نیروهای مرزی مختلف در این عمق است. با افزایش عمق برش، نسبت تغییرات نیروی مرزی و پراکندگی نیروها کاهش یافته است. این موضوع به تاثیر عمیق‌شدگی بر رفتار نیروهای برش مربوط می‌شود. به عبارتی دیگر، با عمیق شدن برش، تاثیر مرز لایه کمتر می‌شود و نمونه سنگ مختلط رفتاری مشابه تک‌لایه سنگی از خود نشان می‌دهد.

۳-۲- تاثیر اختلاف مقاومت نمونه‌سنگ بر نیروهای مرزی

مشخص شد که دیسک‌های برنده در مرز لایه‌های سنگی شرایط متفاوتی را از نقطه‌نظر نیروهای اعمالی در مقایسه با شرایط غیرمرزی (در یک تک‌لایه سنگی) تجربه می‌کنند. بررسی روند و برآورد نیروهای مرزی تیغه دیسکی بر اساس تغییرات نیروهای برش سنگ در حالت همگن بسیار مفید است. از نظر میدانی و در شرایطی که در مسیر تونل، وجود لایه‌های سنگی متفاوت در جبهه‌کار پیش‌بینی شده باشد، این موضوع به ارزیابی و برآورد پارامترهای عملیاتی ماشین مانند نیروی پیشران کمک می‌کند.

با توجه به نقاط ۱، ۲، ۳ و ۴ بررسی شده در شکل ۴، می‌توان از نسبت تغییرات نیروهای مرزی به نیروهای برش نمونه‌های همگن در هر نمونه سنگ برای نشان دادن میزان تاثیر این نسبت بر روی نیروهای وارد شده به تیغه دیسکی استفاده کرد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارتباط نیروهای مرزی با نیروهای غیرمرزی دیسک و اختلاف مقاومت دو نمونه سنگ در عمق‌های مورد مطالعه با توجه به رابطه ۱ نشان داده شده است.

$$A = \frac{F_3}{F_2} \quad \text{محور عرضی نمودار:} \quad (1)$$

$$B = \frac{F_4}{F_1} \quad \text{محور طولی نمودار:}$$

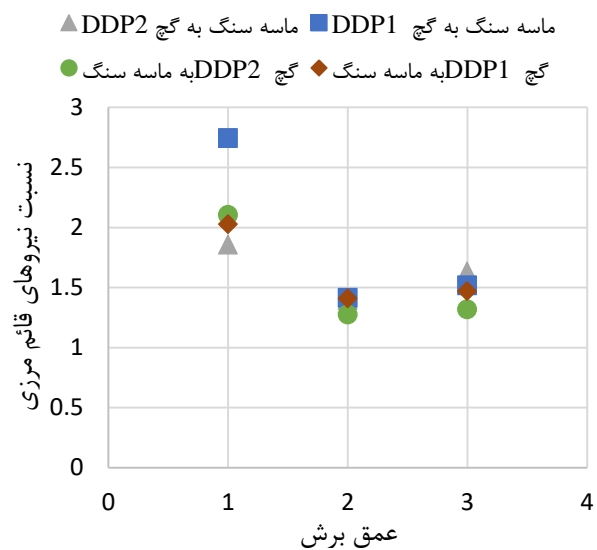
که در آن:

A: نسبت نیروهای برش در ناحیه مرز

B: نسبت میانگین نیروهای برش در دو لایه سنگی

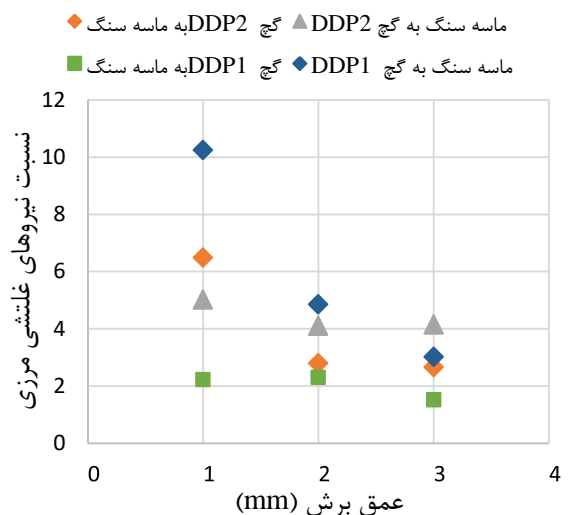
F_1 و F_4 : به ترتیب نیروی میانگین برش سنگ در هر تک‌لایه سنگی

F_2 و F_3 : به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار نیرو در ناحیه مرز نمونه مختلط



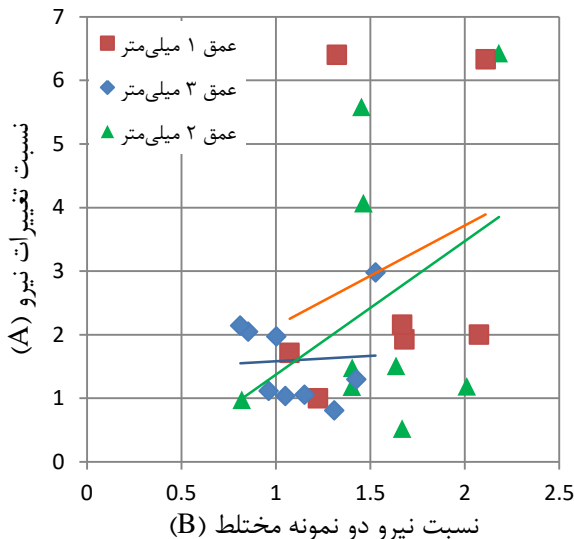
شکل ۸- نسبت تغییرات نیروی عمودی در مرز نمونه مختلط با افزایش عمق برش و حرکت از سنگ با مقاومت زیاد به کم و بالعکس

در شکل ۸، نسبت تغییرات لحظه‌ای نیروهای عمودی مرزی در عمق ۱ میلی‌متر از ۱/۸۵ تا ۲/۷۴ برابر، در عمق ۲ میلی‌متر از ۱/۲۷ تا ۱/۴۰ برابر و در عمق ۳ میلی‌متر از ۱/۳۱ تا ۱/۶۳ ثبت شده است. مشاهده می‌شود که در عمق ۱ میلی‌متر، بیشترین نسبت تغییرات نیروهای مرزی ثبت شده است. همچنین در عمق ۱ میلی‌متر بیشترین پراکندگی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وجود نیروهای مرزی مختلف در این عمق است. با افزایش عمق برش، نسبت تغییرات نیروهای مرزی و پراکندگی نیروها کاهش یافته است.



شکل ۹- نسبت تغییرات نیروهای غلتشی در مرز نمونه مختلط با افزایش عمق برش و حرکت از سنگ با مقاومت بیشتر به کمتر و بالعکس

نیروهای غلتشی دو نمونه سنگ از ۰/۸ تا ۱/۴ تغییر می‌کند، نیروهای مرزی از ۱/۳ تا ۲/۹ تغییر کرده است. در عمق برش ۳ میلی‌متر هنگامی که نسبت اختلاف نیروهای غلتشی دو نمونه سنگ از ۰/۸ تا ۲/۱ تغییر می‌کند، نیروهای مرزی از ۰/۵ تا ۶/۴ تغییر کرده است.



شکل ۱۱- نسبت نیروهای مرزی غلتشی با توجه به مقاومت نمونه‌ها در عمق برش ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر

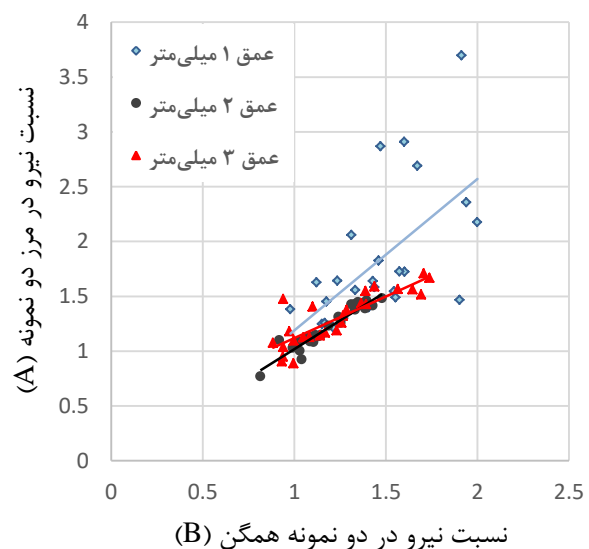
۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی رفتار تیغه‌های دیسکی ماشین حفار و نیروهای برش در منطقه گذار از یک لایه سنگی به لایه دیگر (در اصطلاح جبهه‌کار مختلط) و شبیه‌سازی آن در مقیاس آزمایشگاهی به وسیله ماشین برش خطی کوچک مقیاس انجام شد. از نمونه‌های سنگی با جنس و مقاومت مختلف برای شبیه‌سازی شرایط جبهه‌کار مختلط استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که نسبت تغییرات (افزایش یا کاهش) نیروهای مرزی سنگ با افزایش عمق برش کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که نسبت نیروهای مرزی همواره بیشتر از یک است به گونه‌ای که بیشترین مقدار نسبت نیروی مرزی عمودی با نسبت ۲/۷ و بیشترین مقدار نیروی مرزی غلتشی با نسبت ۱۰/۲ در عمق ۱ میلی‌متر در مرز مشترک دو سنگ مشاهده شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تیغه‌ها در مرزهای سنگی با مقاومت‌های مختلف در معرض بار ضربه قرار می‌گیرند.

نتایج حاصل از این تحقیق، اگرچه به طور مستقیم در شرایط واقعی قابل استفاده نیست اما ملاحظات مورد نیاز برای طراحی کله‌حفار و تعیین پارامترهای عملیاتی ماشین تونل‌زنی

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اختلاف مقاومت برش خطی و نیروهای برش دو نمونه، نیروهای مرزی چه رفتاری از خود نشان می‌دهند.

با توجه به شکل ۱۰ می‌توان دریافت که با افزایش نسبت نیروها در دو نمونه همگن، نسبت نیروهای مرزی عمودی در هر سه عمق افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق برش، نسبت تغییرات نیروهای مرزی عمودی، پراکندگی داده‌ها و شیب نمودار کاهش می‌یابد. در این شکل در عمق برش ۱ میلی‌متر هنگامی که نسبت اختلاف نیروهای قائم دو نمونه سنگ همگن از ۱ تا ۲ تغییر می‌کند، نیروهای مرزی بین این دو نمونه از ۱/۱ تا ۳/۶ تغییر کرده است. در عمق برش ۲ میلی‌متر هنگامی که نسبت اختلاف نیروهای قائم دو نمونه سنگ از ۰/۸ تا ۱/۴ تغییر می‌کند، نیروهای مرزی از ۰/۸ تا ۱/۴ تغییر کرده است. در عمق برش ۳ میلی‌متر هنگامی که نسبت اختلاف نیروهای قائم دو نمونه سنگ از ۰/۸ تا ۱/۶ تغییر می‌کند، نیروهای مرزی از ۰/۹ تا ۱/۷ تغییر کرده است.



شکل ۱۰- نسبت نیروهای مرزی عمودی با توجه به مقاومت نمونه‌ها در عمق برش ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر

با توجه به شکل ۱۱، پراکندگی نسبت نیروهای مرزی غلتشی بیشتر از نیروهای عمودی است. از طرفی دیگر، با افزایش عمق برش، پراکندگی نسبت تغییرات نیروهای مرزی غلتشی روندی یکنواخت را نشان نمی‌دهد. در این شکل در عمق برش ۱ میلی‌متر هنگامی که نسبت اختلاف نیروهای غلتشی دو نمونه سنگ همگن از ۱ تا ۲/۱ تغییر می‌کند، نیروهای مرزی بین این دو نمونه از ۱/۱ تا ۶/۴ تغییر کرده است. در عمق برش ۲ میلی‌متر هنگامی که نسبت اختلاف

- South drive," *7th Int. Congr. Rock Mech.*, pp. 209–222.
6. H. Ma; L. Yin; Q. Gong; J. Wang, 2015; "TBM tunneling in mixed-face ground: Problems and solutions," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 4, pp. 641–647.
 7. PG. Ranjith; J. Zhao; T. P. Seah, 2002; "A case study of effects of ground conditions on tunnel boring machines," *Search.Informit.Com.Au*, p. 383.
 8. J. Zhao; Q. M. Gong; Z. Eisensten, 2007; "Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 22, no. 4, pp. 388–400, 2007.
 9. H. Yang; H. Wang; X. Zhou, 2016; "Analysis on the damage behavior of mixed ground during TBM cutting process," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 57, pp. 55–65.
 10. H. Munoz; A. Taheri; E. Chanda, 2016; "Rock cutting characteristics on soft-to-hard rocks under different cutter inclinations," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 87, pp. 85–89.
 11. H. Munoz; A. Taheri; E. K. Chanda, 2016; "Fracture Energy-Based Brittleness Index Development and Brittleness Quantification by Pre-peak Strength Parameters in Rock Uniaxial Compression," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 49, no. 12, pp. 4587–4606.
 12. X. P. Zhang; P. Q. Ji; Q. sheng Liu; Q. Liu; Q. Zhang; Z. H. Peng, 2018; "Physical and numerical studies of rock fragmentation subject to wedge cutter indentation in the mixed ground," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 71, pp. 354–365.
 13. J. Rostami, 1997; "Development of a Force Estimation Model for Rock Fragmentation With Disc Cutters Through Theoretical Modeling and Physical Measurement," *Colorado School of Mines Golden*.
 14. J. Rostami; L. Ozdemir, 1993; "New model for performance production of hard rock TBMs," *Proc. - Rapid Excav. Tunneling Conf.*, pp. 793–809.
 15. A. Bruland, 1998; "Hard Rock Tunnel Boring. PhD dissertation," *Thesis*, vol. PhD disser, pp. 14–38.
 16. J. W. Cho; S. Jeon; H. Y. Jeong; S. H. Chang, 2013; "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, pp. 37–54.
 17. J. Liu; P. Cao; D. Han, 2016; "The influence of confining stress on optimum spacing of TBM cutters for cutting granite," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 88, pp. 165–174.

در شرایط جبهه‌کار مختلط را فراهم می‌سازد. نسبت تغییرات نیروهای مرزی به سطح نیروهای برش در عمق کم تا چند برابر مشاهده شده است. بنابراین، دستگاه حفاری باید برای اعمال نیروهای پیشران بالاتر آمادگی لازم را داشته باشد. همچنین نیروهای مرزی وارد شده بر تیغه در مرز نمونه مختلط موجب ایجاد نیروی ضربه به تیغه دیسکی و یک نوع بارگذاری چرخه‌ای می‌شود که این ضربه با توجه به بروز پدیده خستگی ممکن است به مرور باعث ایجاد و نیز گسترش ترک در تیغه بر اثر خستگی پر چرخه^۱ شود. در این خستگی، تیغه دیسکی در واقع بارگذاری کمتر و با تعداد چرخه بیشتر را تجربه می‌کند.

همچنین اختلاف نیروی عمودی بین سنگ نرم و سنگ سخت، ممکن است موجب انحراف لحظه‌ای، خروج از مرکز و لرزش کله‌حفار شود. با توجه به این که در مرز نمونه مختلط نیروهای متغیری بر ابزار برش وارد می‌شود، انتخاب ابزار برش مناسب بر اساس نیروهای مرزی اهمیت بیشتری می‌یابد. همچنین این اختلاف نیروها منجر به ایجاد نیروی ضربه در مرز نمونه‌های مختلط شده است که برای عدم تخریب ابزار در مقابل ضربه، لزوم تعیین چقرمگی و سختی مناسب ابزار در این شرایط بیشتر احساس می‌شود.

تشکر و قدردانی

از آقایان دکتر مهدی محمدی حسین‌آبادی و مهندس وحید جعفری به دلیل همکاری در ساخت نمونه‌ها، انجام آزمون‌های برش و ارائه نظرات ارزشمند برای به سرانجام رسیدن این تحقیق تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

1. D. U. Deere, 1982; "Adverse geology and tbm tunneling problems", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol. 19, no. 1, p. A12.
2. G. Barla; S. Pelizza, 2000; "TBM tunnelling in difficult ground conditions", *ISRM International Symposium. OnePetro*.
3. S. Centis; G. Giacomini, 2004; "EPB tunnelling in highly variable ground – the experience of Oporto Light Metro", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 19, no. 4–5, p. 358.
4. M. Herrenknecht; U. Rehm, 2004; "Tunnelling in changing geology," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 19, no. 4–5, p. 396.
5. G. Klados; Y. Hin Kok, 2006 ; "Uniqueness of SMART project in the logistic and construction challenges encountered during TBM North and

¹ High cycle fatigue

25. L. Lin; Y. Xia; Q. Mao; X. Zhang, 2018; "Experimental Study on Wear Behaviors of TBM Disc Cutter Ring in Hard Rock Conditions," Tribol. Trans., vol. 61, no. 5, pp. 920-929.
26. X. Zhang; L. Lin; Y. Xia; Q. Tan; z. Zhu; Q. Mao, 2018; "Experimental study on wear of TBM disc cutter rings with different kinds of hardness," Tunn. Undergr. Sp. Technol., vol. 82, no. August, pp. 346-357.
۲۷. محمدی حسین‌آبادی، مهدی؛ ۱۳۹۸؛ «قابلیت برش سنگ به وسیله تیغه‌های خراشی تحت بارگذاری جانبی»، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
۲۸. یزدشناس، محمد؛ ۱۳۹۷؛ «طراحی و ساخت تیغه دیسکی برای استفاده در ماشین کوچک‌مقیاس برش خطی سنگ»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
۲۹. H. Jeong; S. B. Choi; Y. M. Yoon; S. Jeon, 2019; "Linear cutting tests for assessment of cutting performance of a disc cutter in gravel ground conditions," 4th TBM DiGs Conf., pp. 102-109.
۳۰. بجاری ولم. هادی؛ ۱۴۰۰؛ «ارایه مدل ارزیابی برش‌پذیری سنگ در شرایط اشباع»، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
۳۱. علی مدد، سجاد؛ ۱۳۹۵؛ «ارزیابی قابلیت برش سنگ در مقیاس آزمایشگاهی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
18. Q. Liu; Y. Pan; J. Liu; X. Kong; K. Shi, 2016; "Comparison and discussion on fragmentation behavior of soft rock in multi-indentation tests by a single TBM disc cutter," Tunn. Undergr. Sp. Technol., vol. 57, pp. 151-161.
19. H. Ma; Q. Gong; J. Wang; L. Yin; X. Zhao, 2016; "Study on the influence of confining stress on TBM performance in granite rock by linear cutting test," Tunn. Undergr. Sp. Technol., vol. 57, pp. 145-150.
20. L. J. Yin; Q. M. Gong; H. S. Ma; J. Zhao; X. B. Zhao, 2014; "Use of indentation tests to study the influence of confining stress on rock fragmentation by a TBM cutter," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 72, pp. 261-276.
21. L. Yin; C. Miao; G. He; F. Dai; Q. Gong, 2016; "Study on the influence of joint spacing on rock fragmentation under TBM cutter by linear cutting test," Tunn. Undergr. Sp. Technol., vol. 57, pp. 137-144.
22. J. Zhao; Q. M. Gong; Z. Eisensten, 2007; "Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore," Tunn. Undergr. Sp. Technol., vol. 22, no. 4, pp. 388-400.
23. R. Gertsch; L. Gertsch; J. Rostami, 2007; "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.
24. G. Qi; W. Zhengying; M. Hao, 2016; "An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM)," Tunn. Undergr. Sp. Technol., vol. 52, pp. 182-191.