

تعیین نیروها و انرژی ویژه برش سنگ با شبیه سازی عددی عملکرد تیغه دیسکی در ماشین تونل زنی تمام مقطع

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

۱- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه زنجان

۲- استادیار؛ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه زنجان

چکیده

تعیین نیروی پیشران، گشتاور و توان مورد نیاز ماشین تونل زنی تمام مقطع (TBM) نیازمند برآورد نیروهای وارد بر یک برش دهنده دیسکی است. در این مطالعه، آزمون برش خطی (LCM) سنگ با استفاده از کد تجاری المان محدود ABAQUS برای تعیین نیروها و انرژی ویژه برش شبیه سازی شد. برای راستی آزمایی مدل، از نتایج آزمایشگاهی حاصل از برش سنگ آهک ایندیانا استفاده شده است. پس از حل مدل پیشنهادی، نیروهای وارد بر دیسک در سه راستا تعیین شد. در ادامه، با استفاده از کدی که به این منظور در محیط نرم افزار MATLAB توسعه داده شد، میانگین نیروها محاسبه شد. مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و آزمون برش خطی، درصد خطای ۱۱/۱٪ برای نیروی نرمال، ۵/۶٪ برای نیروی غلتشی و ۱۰٪ برای نیروی جانبی را نشان می دهد. همچنین ضریب برش حاصل از شبیه سازی عددی با مقادیر ۰/۰۹، ۰/۱ و ۰/۱۳ در سه عمق برش ۲/۵، ۵ و ۷/۵ میلی متر بدست آمد که در مقایسه با نتایج آزمون آزمایشگاهی مطابقت خوبی را نشان می دهد. در انتهای مطالعه، انرژی ویژه حاصل از شبیه سازی برش سنگ محاسبه شد.

واژگان کلیدی: برش سنگ، برش دهنده دیسکی، ماشین حفر تونل، نرم افزار ABAQUS، آزمون برش خطی

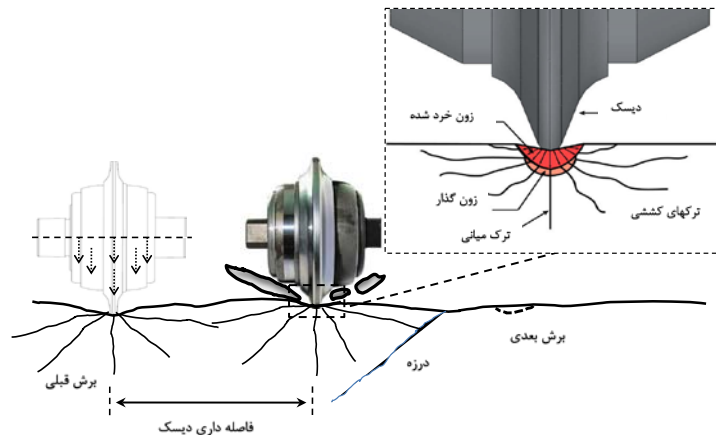
۱- مقدمه

با پیشرفت علم و فن آوری در ساخت ماشین های تونل زنی تمام مقطع (TBMs)، استفاده از حفاری مکانیزه برای احداث تونل حتی در شرایط دشوار زمین کاربرد وسیعی پیدا کرده است. در این ماشین ها، برای بریدن و جدا کردن سنگ از موقعیت آن در سینه کار از ابزار دیسکی استفاده می شود که به صورت تکی یا چندتایی بر روی کله حفار ماشین نصب می شود. اصلی ترین کار دیسک مشارکت در تشکیل تراشه ها (خرده های حفاری) است. علی رغم پیشرفت ها در فن آوری ساخت و استفاده از ماشین های تونل زنی، هنوز هم فقدان شناخت کامل از فرآیند برش و تشکیل

تراشه های سنگی به خاطر ماهیت بسیار پیچیده آن احساس می شود. لذا در ارتباط با سازوکار برش سنگ نظریه های متفاوتی وجود دارد. اما عمده متخصصان بر این باورند که با چرخش دیسک، سه وضعیت عمده رخ می دهد [۱]. سنگ زیر لبه دیسک به حالت پودری خرد می شود. قسمتی از این نرمه مجدداً فشرده شده و در محل شیارها باقی می ماند. به ناحیه زیر لبه دیسک که در معرض تنش های تماسی بسیار شدید قرار گرفته عمده تاً حباب فشار اتفاق می شود. در اثر فشار حباب فشار، ترک ها شکل می گیرد و به صورت شعاعی از محل لبه دیسک به داخل سنگ نفوذ می کند. با رسیدن ترک های ناشی

تشکیل خرده‌های حفاری با استفاده از دیسک در شکل ۱ نشان داده شده است. وجود صفحات ضعیف در توده سنگ از جمله تورق، لایه بندی و درزه‌داری با تسهیل در شکل‌گیری ترک‌ها و یا تراشه برداری در شکست سنگ تأثیر خواهد داشت.

از شیارهای مجاور، تراشه های سنگی شکل می‌گیرد. تراشه-های سنگی لزوماً با هر چرخش دیسک تشکیل نمی‌شود، بلکه بسته به نوع سنگ، نیروی پیشران هر دیسک و فاصله دیسک-ها، گاهی اوقات یک تراشه سنگی با چندین دور کله حفار و عمیق شدن شیارها شکل می‌گیرد. مکانیزم برش سنگ و نحوه



شکل ۱ - سازوکار برش سنگ و تشکیل خرده های حفاری در زیر دیسک [۱]، نمای نزدیک اقتباس از چو و همکاران [۲]

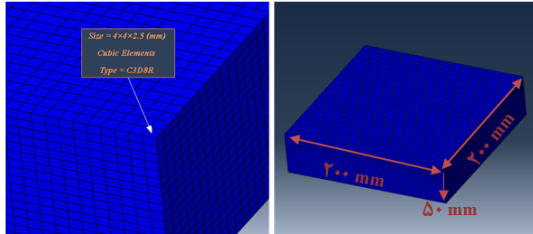
چراکه ازهم پاشیدگی قطعات سنگی در این روش، زیر سؤال می‌رود. این مسئله در پیشرفت‌هایی که اخیراً در روش المان محدود حاصل شده است، حل شده است بقسمی که قابلیت شبیه‌سازی شکست در سنگ از طریق حذف المان‌هایی که به آستانه شکست کششی خود می‌رسد، انجام می‌پذیرد [۴].

رستمی (۱۹۹۷) آزمون های متعددی از برش خطی سنگ با دستگاه آزمون برش خطی (LCM) انجام داد و مدلی را برای برآورد نیروی وارد بر تیغ دیسکی نوع مقطع ثابت (CCS) در فرآیند برش سنگ ارائه داد [۵]. گانگ^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ اثر فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها را بر مکانیسم برش سنگ با استفاده از روش عددی دوبعدی المان مجزا توسط نرم‌افزار UDEC، بررسی کردند [۶]. بجاری و خادمی حمیدی^۵ این پژوهش را دنبال کردند و در سال ۲۰۰۹ تأثیر همزمان جهت‌داری و فاصله‌داری را بر مکانیسم برش سنگ با استفاده از نرم‌افزار UDEC بررسی کردند [۷]. انتاکر و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) سیستم نمایشگر میزان بار وارد بر برش‌دهنده دیسکی را ارائه کردند تا نیروهای وارد بر آن را حین حفاری دستگاه TBM بدست آورند [۸]. چو^۶ و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳، فرآیند شکست سنگ را با استفاده از کد صریح المان محدود، AUTODYN-3D، بررسی کردند که در آن مطالعه، حجم برش خورده سنگ با استفاده از معیار Erosion

درحالی‌که برش سنگ یکی از فرآیندهای اصلی ماشین حفاری محسوب می‌شود، برآورد نیروهای وارد بر آن امری حیاتی در طراحی کله حفار و تعداد دیسک‌های مورد استفاده در آن بشمار می‌آید. از مهم‌ترین مسائل موجود در کاربرد موفقیت‌آمیز روش مکانیزه، بهینه‌سازی طراحی و برآورد دقیق عملکرد ماشین است. بهینه‌سازی طراحی به معنای برآورد ملزومات مورد مطالعه برای شرایط پیچیده زمین و طراحی کله حفاری به‌منظور کسب عملکرد بهینه خواهد بود که در نهایت نرخ تولید قابل‌دستیابی را ممکن می‌سازد، حین آن‌که هزینه و اقتصاد پروژه را نیز ارزیابی خواهد کرد. باوجوداین، توانایی‌های موجود برای برآورد دقیق‌تر عملکرد این ماشین‌ها کماکان نیازمند بهبودهایی خواهد بود.

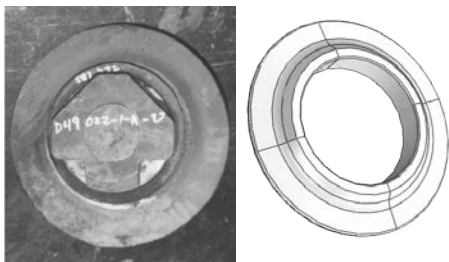
بسیاری از محققان بر روی مسئله برش سنگ با برش‌دهنده دیسکی طی دهه اخیر پژوهش کردند. تمرکز پژوهش از فروروی^۱ یک برش‌دهنده دیسکی در سنگ برای برآورد شکنندگی سنگ تا برآورد نیروهای برش در فرآیند برش سنگ با خصوصیات مشخص مکانیکی بوده است. به‌تازگی پیشرفت-هایی در زمینه شبیه‌سازی فرآیند برش سنگ با مدل‌های عددی مانند روش المان محدود^۲ و روش المان مجزا^۳ انجام‌گرفته است [۳]. کاربرد روش‌های عددی بر اساس محیط پیوسته برای حل این مسئله موفقیت قابل توجهی را کسب نکرده است

مدل برش سنگ لحاظ شده است. مشخصات مقاومتی سنگ آهک ایندیانا مطابق [۱۲] آورده شده است. مدل سنگی به صورت هموزن و ایزوترپ لحاظ شده است و خصوصیات مقاومتی آن منطبق با مقادیر [۱۲] به نرم افزار وارد شده است.



شکل ۲- الف) نمایش سه بعدی مدل قطعه سنگ در نرم افزار ABAQUS/CAE؛ ب) نمایش خصوصیات المان های مدل

برش دهنده دیسکی در نظر گرفته شده در این مدل سازی، یک برش دهنده مقطع ثابت با قطر ۴۳۱ میلی متر (۱۷ اینچ)، ضخامت لبه رینگ حدوداً ۱۱/۵ میلی متر (۰/۴۵ اینچ) و زاویه لبه ۵ درجه از لبه به سمت تویی است. این برش دهنده ساخته شرکت رابینز (Robbins) واشنگتن است که با نوع برش دهنده B-۴۹۲۲۵ شناخته می شود. شکل ۱ نمایشی از این برش دهنده به همراه مدل ساخته شده در نرم افزار ABAQUS/CAE است. با توجه به خمیدگی اطراف مدل برش دهنده دیسکی، از المان های آجری نوع C3D8R با میانگین اندازه ضلع ۹ میلی متر استفاده شده است. خصوصیات مکانیکی برای برش دهنده دیسکی مطابق با مطالعه رستمی [۵] لحاظ شده است. چون مطالعه حاضر بر مکانیسم خردشدگی سنگ می پردازد، سایش برش دهنده های دیسکی در این مدل لحاظ نمی شود، و بنابراین مدل تسلیم و شکست برای فولاد در خصوصیات مکانیکی آن در نظر گرفته نشده است [۵].



شکل ۳- نمایش مقطعی از برش دهنده دیسکی ۱۷ اینچ نوع B-۴۹۲۲۵ انتخابی از شرکت رابینز [۳].

مدل برش دهنده دیسکی ساخته شده در راستای محور z ، با عمق نفوذ ۵ میلی متر تنظیم شده است و مدل سنگ نیز با تنظیم راستای یکی از اضلاع آن با اندازه ۲۰۰ میلی متر در راستای محور z ، شرایط اولیه حاکم در آزمون آزمایشگاهی برش خطی مقیاس کامل را

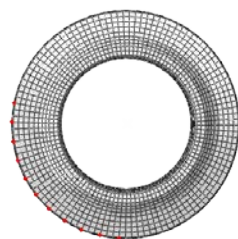
که در کد شبیه سازی موجود است، انجام گرفته است به قسمی که المان هایی از سنگ که به آستانه شکست کششی می رسند از مدل حذف می شوند [۲ و ۴]. محمدی در سال ۲۰۱۵ به بررسی عددی آزمون برش خطی سنگ با استفاده از نرم افزار ABAQUS پرداخت. بدلیل محدودیت های موجود در انجام آزمایش برش خطی، از داده های مطالعات پیشین رساله رستمی برای صحت سنجی استفاده کرد [۹]. ژیا^۷ و همکاران (۲۰۱۷) مدل سازی عددی فرآیند برش سنگ را با روش المان محدود بر پایه هیدرو دینامیک ذرات هموار (SPH) انجام دادند و توانستند رشد ریز ترک های مجاورت لبه برنده برش دهنده و پرتاب ذره های ناحیه حین برش را به خوبی مدل سازی کنند [۱۰]. ژائو^۸ و همکاران (۲۰۱۷) بررسی عددی خردایش سنگ نسبت به سطح آزاد قطعه سنگ در فرآیند برش خطی با یک تیغه دیسکی انجام دادند. آن ها از مدل JH-2 ترکیبی با مدل تشکیل ترک کششی نرم شونده Rankine برای تعیین خصوصیات مدل ساختاری سنگ در شبیه سازی فرآیند شکست دینامیکی سنگ استفاده کردند. با انجام آزمون های آزمایشگاهی، نتیجه گرفتند که نتایج حاصل از مدل سازی عددی به خوبی با نتایج آزمون های آزمایشگاهی انجام گرفته مطابقت دارد [۱۱]. اخیراً محمدی و همکاران با استفاده از روش عددی المان محدود به بررسی تأثیر سه پارامتر هندسی دیسک شامل ضخامت و زاویه لبه و قطر تیغه بر توزیع فشار در ناحیه تماس دیسک و سنگ در فرآیند برش سنگ پرداختند. نتایج تحلیل ها نشان داد که مقدار و توزیع فشار ناحیه تماس به ضخامت و زاویه لبه دیسک وابسته و در عین حال مستقل از تغییرات قطر دیسک است [۱۲]. با توجه به عدم دسترسی به دستگاه آزمون برش خطی برش دهنده دیسکی در کشور، استفاده از شبیه سازی عددی می تواند در این حیطه موضوع مذکور راه گشا باشد. همچنین برآورد نیروهای وارد بر برش دهنده دیسکی در سه راستا و تخمین انرژی ویژه برش از دیگر نتایج این شبیه سازی خواهد بود.

۲- شبیه سازی عددی فرآیند برش خطی

مدل قطعه سنگ انتخابی با اندازه ۵۰×۲۰۰×۲۰۰ میلی متر با المان های آجری C3D8R با اندازه ۲/۵×۴×۴ میلی متر، از جنس سنگ آهک ایندیانا جهت بررسی نیروهای وارد بر دیسک در آزمایش برش خطی [۱۲]، به عنوان صحت سنجی

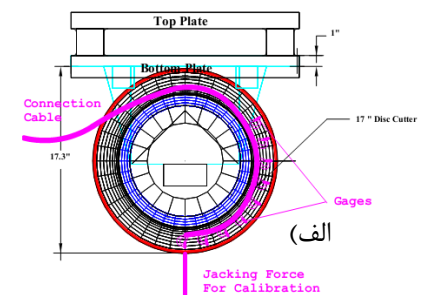
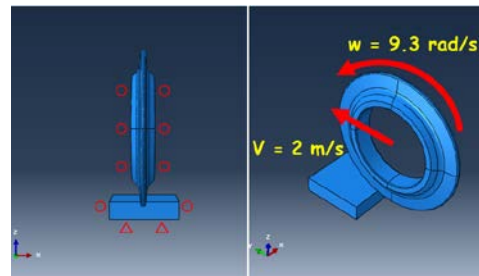
شکل ۴- نمایش شرایط مرزی اعمال شده در مدل برش خطی

با توجه به آنکه در شرایط آزمایشگاهی لبه رینگ به صورت مستقیم با سطح سنگ در تماس است کرنش‌سنج‌های نصب‌شده بر سطح دیسک از لبه دیسک حدوداً ۱۴ میلی‌متر (۰/۵۵ اینچ) فاصله دارند. همان‌طور که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود، کرنش‌سنج‌های اندازه‌گیری در هر دو طرف لبه دیسک در ۹ محل با فاصله داری ۱۵ درجه نصب‌شده‌اند که حدود ۱۲۰ درجه از کل محیط سطح دیسک را پوشش دهد. ۸ عدد از ۹ کرنش‌سنج به سیستم اندازه‌گیری داده متصل‌اند و داده‌های حاصل ضبط می‌شوند در مدل‌سازی انجام گرفته، نودهای انتخابی جهت برآورد لحظه‌ای نیروی برش در سطح تماس سنگ و دیسک دقیقاً در نوک لبه دیسک انتخاب شده است. لازم به ذکر است که انتخاب نودهای مجاور در فاصله ذکرشده از لبه دیسک، مقدار صفر را بعد از حل مدل قرائت می‌کند. اما با نزدیک کردن نودهای انتخابی در مرکز لبه مدل دیسک، مقدار قرائت شده مقدار غیر صفری را دربر می‌گیرد [۵]. درواقع نقاط انتگرال‌گیری (Gauss points) نقش کرنش‌سنج‌های آزمایشگاهی را در آزمایشگاه ایفا می‌کند (شکل ۵-ب).



(ب)

شبیه‌سازی می‌کند [۲]. به دلیل نیروهای موجود حین برش سنگ به وسیله برش‌دهنده دیسکی، مدل برش‌دهنده دیسکی به غیر از راستای حرکت خود (یعنی راستای V)، محدود شده است. اعمال این شرایط مرزی دقیقاً حالت بلبرینگ‌های موجود در کنار دیسک را که مانع حرکت دیسک به چپ یا راست در اثر نیروهای اعمالی حین برش می‌شود، شبیه‌سازی می‌کند. در آزمایش برش خطی معمولاً نمونه‌ای توسط بتن به صفحه فولادی جعبه دستگاه قالب‌بندی می‌شود [۱۴]. بنابراین شرایط مرزی اعمال شده به مدل سنگ به صورت پنج وجه محدود شده و وجه بالایی به صورت آزاد انتخاب شده است. علت دیگر این شرایط مرزی کمک به کاهش محاسبات در نظر گرفته شده است (شکل ۲) [۱۵ و ۲]. با احتساب سرعت واقعی TBM در محل و عملکرد محاسبات مدل‌سازی، سرعت برش دهنده دیسکی با سرعت خطی ۲ متر بر ثانیه و سرعت زاویه‌ای ۹/۳ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شد [۴ و ۲].



(الف)

شکل ۵ - کرنش‌سنج‌های نصب‌شده بر سطح دیسک. الف) فاصله‌داری تقریبی ۱۵ درجه برای ۹ کرنش‌سنج نصب‌شده در سطح دیسک با فاصله‌داری از لبه (۰/۵۵ اینچ). ب) نودهای اندازه‌گیری تنش‌ها در سطح مدل [۳].

تراشه و سطح برش همانند دیگر فرآیندهای برش سنگ، حاصل شده است. آزمایش انجام‌شده بر این نمونه سنگی را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد [۵].

۱-۲- نتایج آزمون آزمایشگاهی

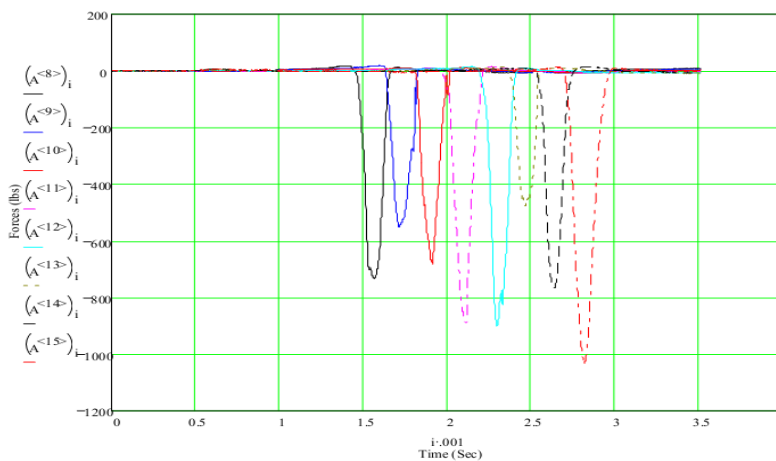
آزمون آزمایشگاهی بر بلوک مکعبی شکلی از سنگ آهک ایندیانا با اندازه ۰/۹×۰/۴×۰/۴ متر انجام گرفته است. این نمونه با بتن دارای مقاومت بالا بر صفحه محرک دستگاه برش خطی LCM ثابت شده است به قسمی که با حرکت این صفحه زیر برش‌دهنده دیسکی ثابت‌شده، فرآیند برش انجام می‌پذیرد. آزمایشی با عمق نفوذ ۵ میلی‌متر انجام شده است و تشکیل

است. در کناره چپ این نمودار رنگ هریک از گیج‌ها به صورت جداگانه متمایز شده است که با توجه به شماره موجود می‌توان گیج موردنظر را تشخیص داد. همان‌طور که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود مقادیر پیک اندازه‌گیری شده با کرنش‌سنج‌ها در آزمون آزمایشگاهی برای شماره ۸ تا ۱۵ به ترتیب ۷۲۰، ۵۰۰، ۶۸۰، ۹۰۰، ۹۰۰، ۴۳۰، ۷۸۰ و ۱۰۸۰ پوند است که بیشینه این مقادیر ۱۰۸۰ پوند که معادل $480.4/0.8$ نیوتن، موردنظر است [۵]. با توجه به کرنش‌سنج واقع بر نگه‌دارنده برش‌دهنده دیسکی در آزمایشگاه، نیروها در سه جهت اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین قرائت سه راستای نیرویی، نیروهای کلی عمودی، غلتشی، و جانبی وارد بر برش‌دهنده دیسکی را نشان می‌دهد. شکل ۸ نمایش‌دهنده قرائت کرنش‌سنج نصب‌شده بر استوانه نگه‌دارنده برش‌دهنده دیسکی در آزمایشگاه است که دو راستای نیرویی آن را نمایش داده است. نمودار خط‌چین نیروی غلتشی کلی وارد بر دیسک را نشان می‌دهد حال‌آنکه نمودار خط پیوسته نمایش‌دهنده نیروی عمودی کلی است [۵].

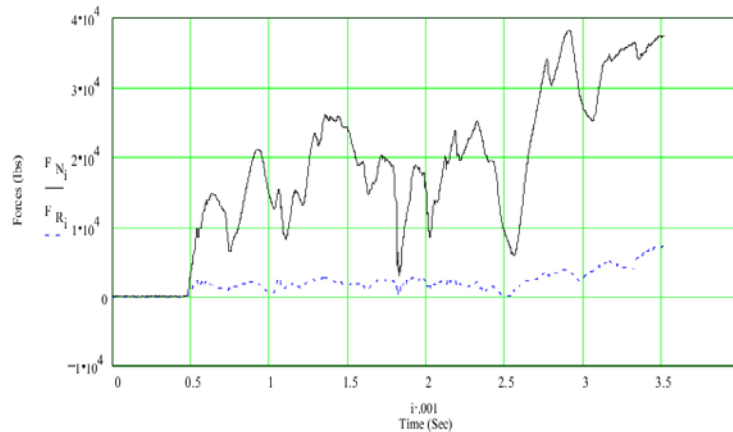


شکل ۶ - آزمون آزمایشگاهی برش سنگ [۵].

شکل ۷ نیروی اندازه‌گیری شده به وسیله گیج‌های نصب‌شده بر لبه دیسک را برحسب زمان حین انجام آزمایش برش خطی نشان می‌دهد. هر رنگ مشخص‌شده در این نمودار، نشان‌دهنده اندازه‌گیری نیرو به وسیله یکی از کرنش‌سنج‌هاست. همان‌طور که انتظار می‌رود، هریک از کرنش‌سنج‌ها به صورت آنی نیرو را در لحظه برقراری لبه دیسک کاملاً مجاور به خود اندازه‌گیری کرده است که به شکل پیک آنی در نمودار شکل‌گرفته است و با جدا شدن لبه از سطح سنگ و چرخیدن دیسک، کرنش‌سنج مقدار صفر را قرائت کرده است و حالت خطی صفر را شکل داده



شکل ۷ نمایش نمودار نیروی اندازه‌گیری شده توسط گیج‌ها برحسب زمان [۵].



شکل ۸ تغییرات نیروی عمودی و غلتشی وارد بر برش دهنده دیسکی در آزمایش برش خطی [۵].

نودهای مشخص شده پیش‌تر، می‌توان نتایج حاصل شده از مدل را با آزمون آزمایشگاهی انجام گرفته توسط رستمی، مقایسه کرد. با در نظر گرفتن نودهای انتخابی در لبه رینگ برش‌دهنده دیسکی خروجی نیروی غلتشی وارد بر آن‌ها از طریق حل مدل برآورد می‌شود (شکل ۱۱). هنگامی که المانی از مدل برش-دهنده در تماس با المانی از سنگ قرار می‌گیرد اندرکنش دو سطح وارد محاسبات می‌شود و نودهای اندازه‌گیری مقدار ماکزیمم نیروها را ضبط می‌کنند. در این هنگام المانی که به آستانه شکست کششی خود برسد حین شبیه‌سازی به سرعت از مدل حذف می‌شود (شکل ۹). پس از آن، برای مدتی کوتاه، تا زمانی که لبه دیسک در تماس دوباره با المان‌های جلوی خود قرار گیرد، مقدار بیشینه نیرو افت می‌کند و مقدار کمتری به وسیله نودهای اندازه‌گیری ضبط می‌شود که این مقدار به علت در تماس بودن لبه دیسک با المان‌های کناره‌ای خود است. به همین علت است که نمودار نیروی عمودی و غلتشی در مقدار نوسان می‌کند (شکل ۱۲). در شکل ۱۱ نیروهای غلتشی قرائت شده توسط نودهای اندازه‌گیری واقع بر لبه دیسک برحسب زمان نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر پیک این نمودارها در بازه ۲ کیلو نیوتن (۴۴۹ پوند) الی ۳/۸ کیلونیوتن (۸۵۰ پوند) تغییر می‌کند که در مقایسه با نمودار به دست آمده از آزمون آزمایشگاهی برش خطی مقدار قابل قبولی کسب شده است. با توجه به کرنش سنج واقع بر نگه‌دارنده برش‌دهنده دیسکی در آزمایشگاه، نیروها در سه جهت اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین قرائت سه راستای نیرویی، نیروهای کلی عمودی، غلتشی، و جانبی وارد بر برش‌دهنده دیسکی را نشان می‌دهد. با حل مدل ارائه شده برای آزمایش

۳- حل مدل و ارائه نتایج

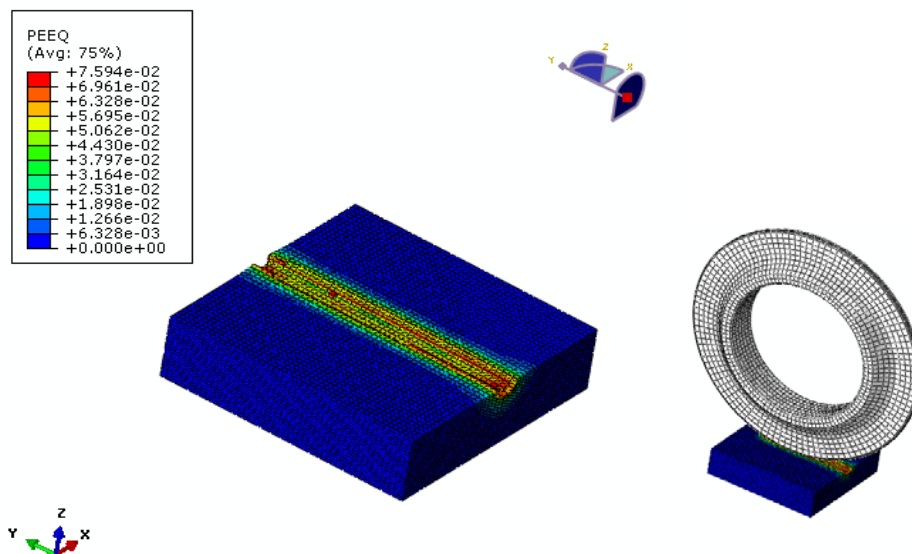
برای مدل‌سازی فرآیند برش خطی، مدل‌های زیادی در ابتدا ساخته و حل شد تا تمامی خطاهای محاسباتی موجود در مدل حذف شود. مرحله بعدی کالیبره کردن مدل با آزمایش برش خطی موجود از رستمی [۵] بود که با دشواری‌های زیادی به علت در دسترس نبودن کلیه پارامترهای آزمایشگاهی سنگ و برش‌دهنده، شرایط آزمایش و نتایج دقیق آزمون، مواجه شد. بعد از کالیبراسیون مدل و استفاده از پارامترهای موجود از سنگ‌آهک ایندیانا از محققین پیشین [۱۶ و ۱۷]، نتایج حاصل از حل مدل با نتایج آزمایشگاهی برش خطی مقایسه شد. مدل-سازی‌های متعددی با خصوصیات مواد متفاوت برای سنگ حول مقادیر اعلام شده از محققین پیشین انجام شد تا اینکه مقادیر صحیح انتخاب شود. لازم به ذکر است که حصول خصوصیات مواد بسیار دشوار بود به خصوص اینکه بدون انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر نمونه سنگ، کسب دقیق داده‌های ورودی به مدل، محقق شود. مدل برش سنگ حین چرخیدن مدل دیسک بر مدل سنگ در مازول نتایج ABAQUS/CAE نمایش داده شده است (شکل ۹).

۳-۱- برآورد نیروی برش

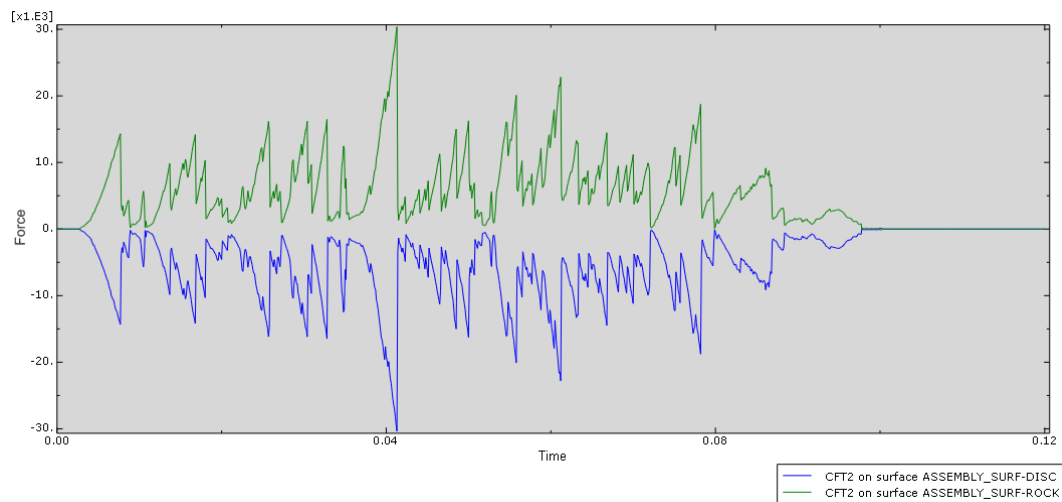
با توجه به الگوریتم لاگرانژی به کار برده شده جهت حل مدل با حل گر^۹ ABAQUS/Explicit، بر اساس قانون سوم نیوتن که عنوان می‌کند "هر عملی، عکس‌العملی معادل دارد" ثابت می‌شود که این الگوریتم به درستی مدل را حل می‌کند (شکل ۱۰). با حل مدل ارائه شده برای شبیه‌سازی آزمایش برش خطی، نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیرویی به صورت لحظه‌ای در

برای آنکه بتوان مقدار نیرویی وارد بر مدل برش دهنده دیسکی را برآورد کرد و با نتایج حاصل از آزمون آزمایشگاهی برش خطی سنگ مقایسه کرد، مقدار میانگین پیک‌های نیرویی در هر نمودار در نظر گرفته می‌شود [۲۰]. برای جدا کردن پیک‌های نمودار نیرویی به دست آمده از حل مدل عددی، کدی در محیط نرم افزار MATLAB توسعه داده شده است. خروجی نرم‌افزار MATLAB مقادیر بیشینه نیرو را نتیجه می‌دهد و مقدار میانگین این مقادیر به صورت پارامتر میانگین نیرو در نظر گرفته می‌شود. میانگین مقادیر به دست آمده از هر راستا به صورت میانگین نیروی جانبی (MSF)، میانگین نیروی غلتشی (MRF) و میانگین نیروی عمودی (MNF) حاصل از میانگین نتایج مدل عددی حل شده و مقایسه آنها با نتایج حاصل از آزمون آزمایشگاهی درآورده شده است. جدول ۱ مقایسه هر دو مقدار نتیجه شده از مدل سازی عددی و آزمون آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

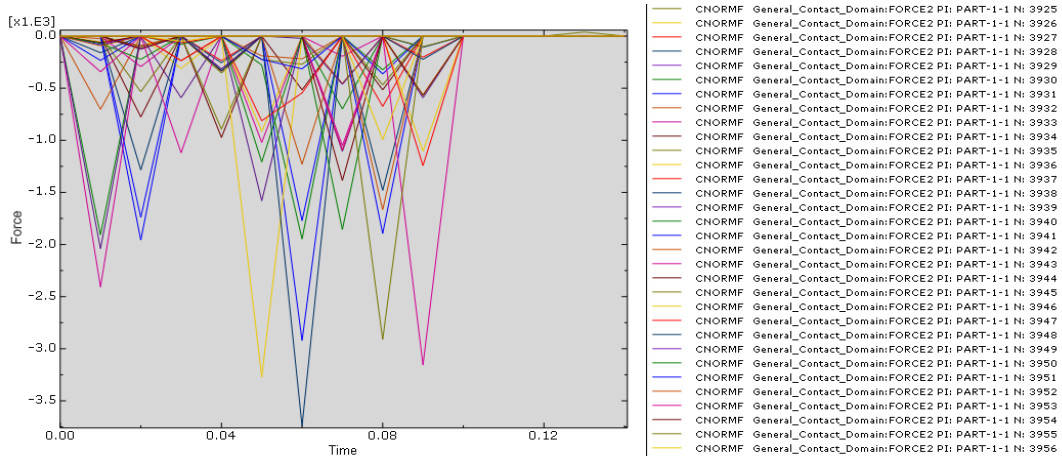
برش خطی سنگ آهک ایندیانا، نمودار کلی نیرویی وارد بر مدل برش دهنده دیسکی در سه جهت محورهای x ، y ، و z برآورد شد. خروجی نیرویی وارد بر مدل برش دهنده دیسکی در سه راستای x ، y و z را نمایش می‌دهد. نمودار نیرویی حاصل مشابه با آزمون آزمایشگاهی برش خطی دندانان اراهی شکل شده است. مقدار نیرو در جهت x نشان دهنده مقدار نیروی جانبی (CFT1)، در جهت y نشان دهنده مقدار نیروی غلتشی (CFT2) و در جهت z نشان دهنده مقدار نیروی عمودی (CFT3) در نظر گرفته شده است. رفتار نمودار دندانان اراهی شکل نیرو-زمان بسیار وابسته به پارامترهای سنگ می‌باشد. هر چه سنگ مقاوم‌تر باشد تغییرپذیری دامنه این نمودار دندانان اراهی شکل بیشتر می‌شود [۱۸]. همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود نیروی عمودی وارد بر مدل برش دهنده دیسکی بسیار بیشتر از نیروی غلتشی است. واضح است که این مقدار نزدیک به ۱۰ برابر مقدار نیروی غلتشی برآورد می‌شود [۱۹]. نیروی جانبی وارد بر مدل برش دهنده دیسکی (CFT1) در دو جهت مثبت و منفی محور نیرو نوسان کرده است. این موضوع به تشکیل تراشه حین انجام عملیات برش سنگ اشاره دارد.



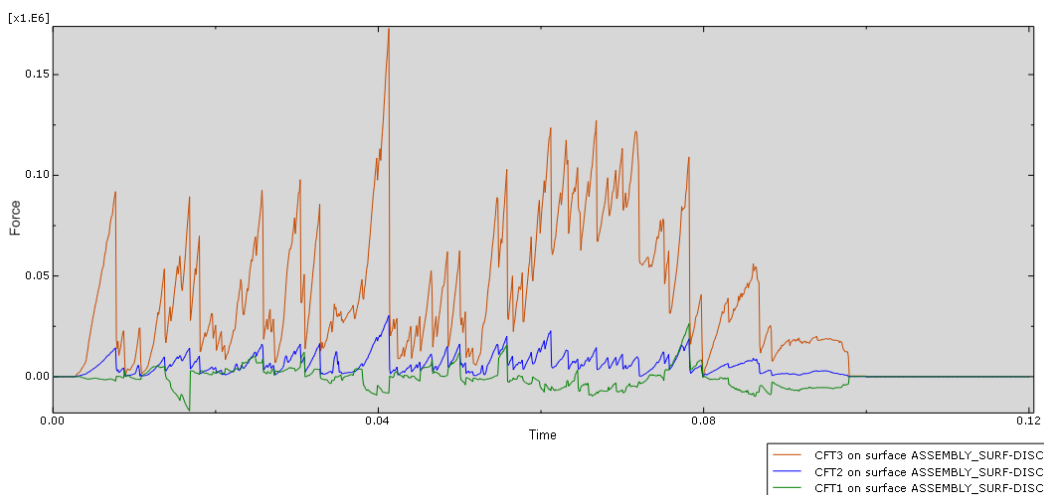
شکل ۹- نمایش مدل حل شده در ماژول نتایج نرم افزار ABAQUS



شکل ۱۰ نمایش تغییرات نیروی غلتشی وارد بر دیسک و سنگ از حل مدل برش سنگ در بازه ۰ تا ۰/۱۲ گام زمانی



شکل ۱۱ - نیروهای غلتشی قرائت شده توسط نودهای اندازه گیری نیرو در حل مدل عددی برش سنگ.



شکل ۱۲- تغییرات نیروی عمودی و غلتشی وارد بر برش دهنده دیسکی در مدل سازی عددی برش خطی.

جدول ۱ مقایسه مقادیر برآورد شده نیروهای وارد بر دیسک از مدل عددی و آزمون آزمایشگاهی

نوع نیرو	مقدار	مقدار حاصل از مدل سازی عددی	مقدار برآورد شده آزمون آزمایشگاهی [۱۲]	درصد خطا
----------	-------	-----------------------------	--	----------

میانگین نیروی عمودی (MNF)	۵۶/۰۸	۶۳/۱	۱۱/۱٪
میانگین نیروی غلتشی (MRF)	۵/۷۶	۵/۴۵	۵/۶٪
میانگین نیروی جانبی (MSF)	۳/۷۸	۴/۲	٪۱۰

۲-۳- برآورد
جرم

برش خورده از سنگ

در مدل سازی عددی با روش المان محدود، جدا شدن سنگ از مدل به کمک سایش شبیه سازی می شود. سایش مکانیسمی عددی است که به صورت خودکار المان هایی را که دچار پیچش بسیار زیادی می شوند از محاسبات حذف می کند. این پیچش ممکن است در اثر رسیدن ماده به معیار شکست تعریف شده صورت پذیرد. همچنین المان هایی که با مکانیک آسیب تعریف شده اند هنگامی که مقدار عددی آسیب به ۱ برسد المان از مدل حذف می شود [۱۵]. بنابراین برای محاسبه حجم برش خورده سنگ در شبیه سازی، به راحتی تعداد المان های حذف شده از مدل در نظر گرفته می شود. با محاسبه تعداد المان ها توسط ABAQUS و لحاظ ابعاد آن ها حجم برش خورده از سنگ محاسبه می شود و با حاصل ضرب این مقدار در چگالی سنگ، وزن برش خورده از سنگ محاسبه خواهد شد. واضح است که شکل و اندازه المان نقش بسیار مهمی را در تعیین حجم برش خورده سنگ بازی می کند. چنانچه المان ها با اندازه کوچک تری انتخاب شوند دقت محاسبات حجم برش خورده سنگ افزایش می یابد و نتایج به واقعیت نزدیک تر خواهد شد. از طرفی نقاط انتگرال گیری مدل نیز افزایش می یابد و باعث کاهش چشمگیری در سرعت محاسبات خواهد شد. المان انتخاب شده با حجم 40 mm^3 به خوبی می تواند نقش دانه های سنگی را بازی کند و به عملکرد محاسبات بهبود ببخشد.

۳-۳- انرژی ویژه

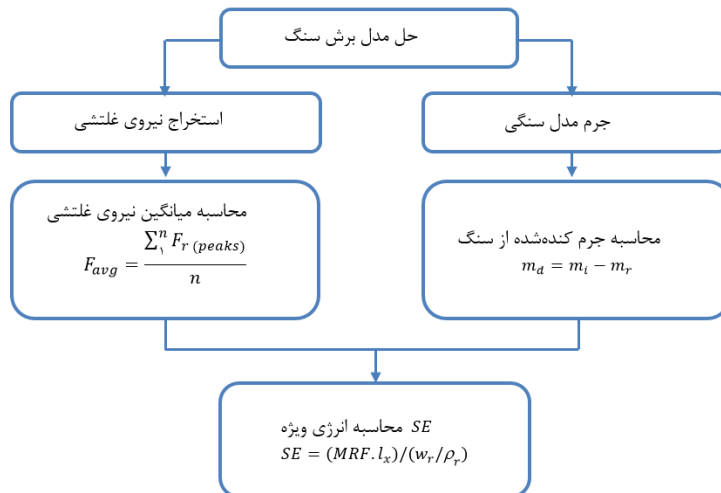
یکی از مهم ترین پارامترهای مورد مطالعه در آزمایش برش سنگ و عملکرد دیسک، انرژی ویژه است. انرژی ویژه، انرژی مورد نیاز برای حفر حجم یا وزن مشخصی از سنگ در طول

برش با دیسک است [۲]. انرژی لازم حین برش به کمک دو مؤلفه نیروی برش ایجاد می شود. هنگامی که طول برش بسیار بزرگ تر از عمق برش باشد، اثر نیروی عمودی بر برش قابل اغماض است. انرژی ویژه برش را می توان از رابطه زیر تعیین کرد.

$$SE = \frac{MRF \times l_x}{m/\rho} \quad (۱)$$

به طوری که در آن SE انرژی ویژه با واحد مگاژول بر مترمکعب، MRF میانگین نیروی غلتشی با واحد کیلونیوتن، l_x طول برش با واحد میلی متر، m جرم برش خورده از سنگ با واحد گرم و ρ چگالی سنگ با واحد گرم بر سانتی مترمکعب است [۲]. همان طور که در رابطه (۱) و دیاگرام شکل ۱۳ مشاهده می شود، برآورد انرژی ویژه برش مستلزم اندازه گیری پارامتر نیروی غلتشی برش وارد بر برش دهنده دیسکی خواهد بود.

تعداد المان های حذف شده از مدل با استفاده از نرم افزار ABAQUS محاسبه و با توجه به موجود بودن اندازه ابعاد المان ها، حجم کلی برش در مدل عددی محاسبه می شود. بنابراین مقدار انرژی ویژه برای برش خطی منفرد سنگ آهک ایندیانا طبق رابطه (۱) محاسبه می شود. لازم به ذکر است که مقادیر نتایج آزمایشگاهی انرژی ویژه از آزمون آزمایشگاهی برش منفرد در مطالعه رستمی [۵] موجود نبود. بنابراین مقادیر انرژی ویژه به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی بیلگین و همکارانش [۲۱] بر روی دیگر انواع سنگ آهک مقایسه و به این ترتیب مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی گسترش داده شد.



شکل ۱۳ - فلوچارت نحوه محاسبه انرژی ویژه در مدل سازی برش خطی

۳-۴- ضریب برش

در مطالعه رستمی [۱۹] ناحیه‌ای در مجاورت زیر دیسک به نام ناحیه متراکم معرفی شد که دقیقاً نقش نرمه‌های ایجاد شده و تأثیر آن در زیر دیسک را اشاره می‌کند. با توجه به معادله حالت بکار برده شده در مدل تغییر دانسیته بر اثر تغییر فشار باعث تغییر حجم برخی از المان‌های زیر دیسک در مدل دیده می‌شود اما به دلیل باقی ماندن آن‌ها در محاسبات تغییرات نیروی نرمال افزایش بسیار چشمگیری را با طی کردن ناحیه برش در عمق‌های بالاتر، نمایش می‌دهد (شکل ۱۴-الف). در عمق نفوذ ۷/۵ میلی‌متر تغییرات نیروی عمودی از نرمال به شدت فاصله گرفته است (شکل ۱۴-ب). علت این موضوع در آزمون آزمایشگاهی را می‌توان به حجم کنده شده بالا و تشکیل المان‌های دچار تغییر حجم شده و حذف نشدن آن‌ها از محاسبات دانست. این شرایط دقیقاً نقش ایجاد نرمه‌ها در شرایط آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

نسبت نیروی غلتشی (RF) به نیروی عمودی (NF) را ضریب برش (CC) می‌نامند و طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

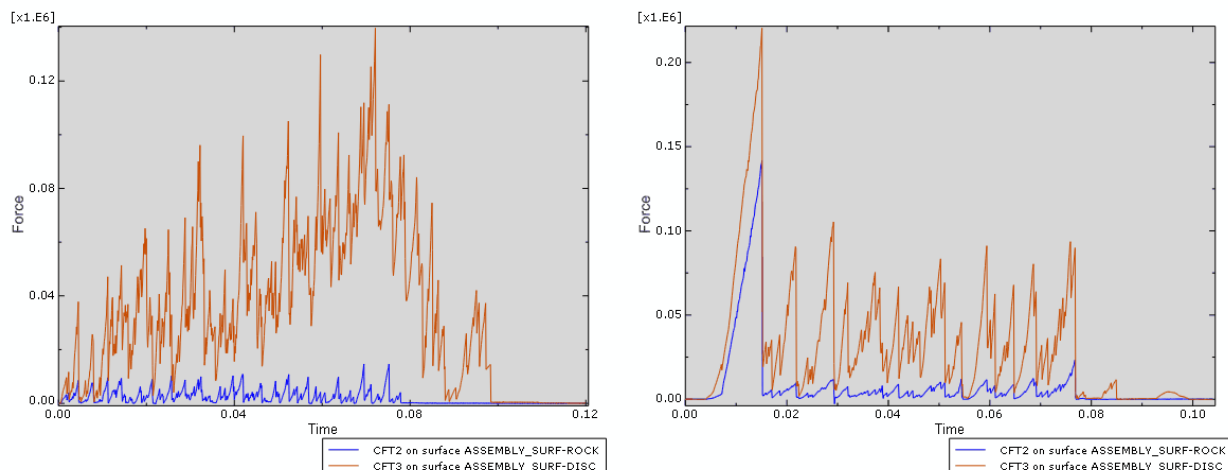
$$CC = \frac{RF}{NF} \quad (2)$$

عمق نفوذ تأثیر دوچندانی را بر نیروی عمودی می‌گذارد حال آنکه اثر کمتری در ازدیاد نیروی غلتشی در فرآیند برش خطی را خواهد داشت. با تغییر عمق نفوذ در مدل ارائه شده به مقادیر ۲/۵ میلی‌متر، ۵ میلی‌متر و ۷/۵ میلی‌متر، و حل مدل مقادیر به دست آمده در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات نیروی برش و انرژی ویژه کاملاً مطابق با نتایج آزمایشگاهی راکس‌بورو و فیلیپس است [۲۲]. با توجه به مطالعات پیشین، تغییرات ضریب برش نسبت به تغییرات عمق نفوذ در آزمون برش خطی لحاظ شده است. بنابراین با لحاظ کردن دو عمق نفوذ متفاوت ۲/۵ و ۷/۵ میلی‌متر علاوه بر عمق نفوذ ۵ میلی‌متر، اثر آن بر ضریب برش انجام می‌پذیرد که در قیاس با مقادیر بدست آمده از آزمون آزمایشگاهی (۰/۰۷، ۰/۰۹ و ۰/۱۲) دقت قابل ملاحظه‌ای در بر داشته است (شکل ۱۵).

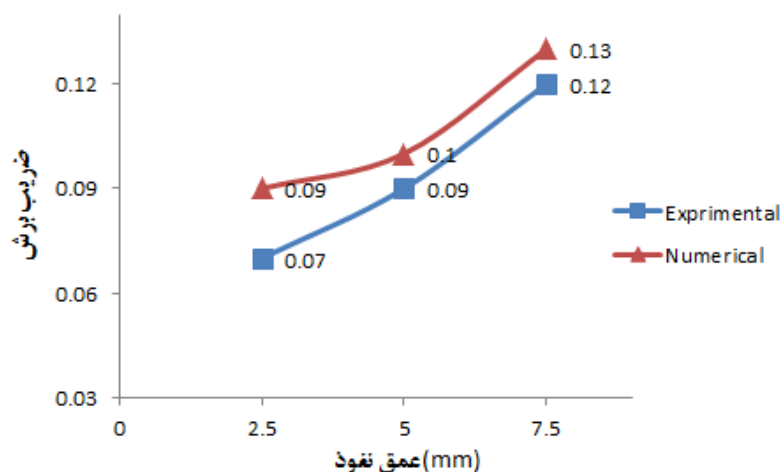
جدول ۲ مقادیر به دست آمده از حل مدل عددی برش خطی سنگ با عمق نفوذ متفاوت

ظ

عمق نفوذ (mm)	میانگین نیروی غلتشی (kN)	میانگین نیروی عمودی (kN)	وزن برش (kg)	انرژی ویژه (MJ/m ³)
۲/۵	۲/۸۹	۳۰/۸	۰/۰۹۱۴۵	۲۷/۳۴
۵	۵/۷۶	۵۶/۰۸	۰/۱۰۴۲۲	۲۴/۸۷
۷/۵	۸/۲۳	۶۳/۲	۰/۱۶۷۳۲	۱۸/۳۳



شکل ۱۴ تغییرات نیروی وارد بر مدل برش دهنده دیسکی با قطر ۱۷ اینچ و ضخامت ۱۱/۵ mm و زاویه لبه ۵ درجه: الف) عمق نفوذ ۲/۵ mm. ب) عمق نفوذ ۷/۵ mm



شکل ۱۵ نمودار مقایسه ای تغییرات ضریب برش نسبت به عمق نفوذ برای آزمون آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی

۴/۲ (به ترتیب برای متوسط نیروهای غلتشی، قایم و جانبی) خطای قابل قبول (حداکثر ۱۱/۱ درصد برای نیروی عمودی) داشته است. همچنین ضریب برش برای عمق نفوذ ۲/۵، ۵ و ۷/۵ میلی متر به ترتیب مقادیر ۰/۰۹، ۰/۱۰ و ۰/۱۳ بدست آمده است که در مقایسه با آزمون واقعی برش خطی در آزمایشگاه (۰/۰۷، ۰/۰۹ و ۰/۱۲) دقت قابل قبولی داشته است. همچنین مقدار انرژی ویژه برای شرایط نفوذ ۵ میلی متر از شبیه سازی عددی ۲۴/۸۷ مگاژول بر مترمکعب ارزیابی شد.

۵- مراجع

[1] Khademi Hamidi, J. "A Model for Hard Rock TBM Performance Prediction", PhD Thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2010.

۴- بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه مدل عددی فرآیند برش خطی سنگ بر پایه روش المان محدود با استفاده از کد تجاری ABAQUS پیشنهاد شد و در ادامه مراحل مختلف مدل سازی همراه با جزئیات آن به صورت گام به گام بررسی شد. برای صحت سنجی مدل پیشنهادی از آزمایش برش خطی سنگ در آزمایشگاه بر نمونه سنگ آهک ایندیانا استفاده شده است. مونتاژ مدل مشابه با شرایط آزمایشگاهی برش خطی منفرد شبیه سازی شد. با حل مدل پیشنهاد شده، نیروهای وارد بر برش دهنده محاسبه شد. به عنوان مثال مقادیر متوسط نیروهای عمودی، غلتشی، و جانبی برای مقدار نفوذ ۵ میلی متر به ترتیب ۵۶/۰۸، ۵/۷۶ و ۳/۷۸ حاصل شد و در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ۶۳/۱، ۵/۴۵ و

pressure distribution in contact area of disc and rock”, Tunneling and underground space engineering journal, Volume 6, Issue 1, 2017; 27-41.[In Persian].

[13] Mohammadi, R. Khademihamidi, J. Samiminamin, F., “Numerical Analys of Forces on disc in linear cutting test with finite element method”, Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 2018;[In Persian & Accepted].

[14] Nilsen, B.; Ozdemir, L. In Hard rock tunnel boring prediction and field performance, PROCEEDINGS OF THE RAPID EXCAVATION AND TUNNELING CONFERENCE, SOCIETY FOR MINING, METALLOGY & EXPLORATION, INC: 1993; pp 833-833

[15] Dassault Systemes Simulia Corp. Documentation, Version 6.11. Providence, RI, USA 2011.

[16] Mattar, P. In Permeability of intact and fractured Indiana Limestone, Masters Abstracts International, 2009.

[17] Schmidt, R. A., Fracture-toughness testing of limestone. Experimental Mechanics 1976, 16 (5), 161-167.

[18] Shaoquan, K., Some basic problems in rock breakage by blasting and by indentation. Doctoral Thesis Lulea University of Technology, Lulea, Sweden 1995.

[19] Rostami, J., 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 2013, 57, 172-186.

[20] Balci, C.; Tumac, D., Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter. Tunnelling and Underground Space Technology 2012, 30, 183-193.

[21] Bilgin, N.; Tuncdemir, H.; Balci, C.; Copur, H.; Eskikaya, S. In A model to predict the performance of tunneling machines under stressed conditions, Proceedings of the AITES-ITA 2000 World Tunnel Congress, Durban, Published by The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, Republic of South Africa, May, 2000; pp 13-18.

[22] Roxborough, F. F.; Phillips, H. R. In Rock excavation by disc cutter, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Elsevier: 1975; pp 361-366.

[2] Cho, J.-W.; Jeon, S.; Yu, S.-H.; Chang, S.-H., Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. Tunnelling and Underground Space Technology 2010, 25 (3), 230-244.

[3] Lawn, B.; Swain, M., Microfracture beneath point indentations in brittle solids. Journal of Materials Science 1975, 10 (1), 113-122.

[4] Cho, J.-W.; Jeon, S.; Jeong, H.-Y.; Chang, S.-H., Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement. Tunnelling and Underground Space Technology 2013, 35, 37-54.

[5] Rostami, J., Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure. Colorado School of Mines: 1997.

[6] Gong, Q.-M.; Zhao, J.; Jiao, Y.-Y., Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. Tunnelling and underground space technology 2005, 20 (2), 183-191.

[7] Bejari, H.; Hamidi, J. K. In Simultaneous effects of joint spacing and orientation on the penetration rate of TBM using numerical modeling, ISRM International Symposium on Rock Mechanics-SINOROCK 2009, International Society for Rock Mechanics: 2009.

[8] Entacher, M., Winter, G., Galler, R., 2013. Cutter force measurement on tunnelboring machines-Implementation at Koralm tunnel. Tunnlling & Underground SpaceTechnology, 38, 487-496.

[9] Mohammadi, R. “Numerical Modeling of rock cutting in TBM Tunneling”, MSc Thesis, Zanjan University, Iran, 2015.[In Persian].

[10] Xiao N, Zhou X-P, Gong Q-M. The modelling of rock breakage process by TBM rolling cutters using 3D FEM-SPH coupled method. Tunnelling and Underground Space Technology. 2017;61:90-103.

[11] Xia Y, Guo B, Cong G, Zhang X, Zeng G. Numerical simulation of rock fragmentation induced by a single TBM disc cutter close to a side free surface. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2017;91:40-8.

[12] Mohammadi, R. Khademihamidi, J. Samiminamin, F., “Numerical study of effecting parameters on

¹ Identification

² Finite Element Method

³ Discrete Element Method

⁴ Gong

⁵ Bejari & Khademi hamidi

⁶ Cho

⁷ Xia

⁸ Xiao

⁹ Solver
