

صلاة الاضلاع



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهاى زیرزمینی

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی اثر پارامترهای هندسی درزه بر خردایش سنگ توسط دیسک‌های

برش‌دهنده در سنگ سخت درزه‌دار

نگارنده: نوید افراسیابی

استاد راهنما:

دکتر احمد رمضان‌زاده

استاد مشاور:

دکتر مهدی نوروزی

بهمن‌ماه ۱۳۹۶

پدر و مادر مهربانم

که هر لحظه وجودم را از چشمه سار پر از عشق چشمانش، سیراب میکنند

برادرانم، و یگانه خولهر عزیزم

که در کنار هم آموختیم و به امید هم به آینده چشم می‌دوزیم

سپاسگزاری

در اینجا بر خود لازم می‌دانم که از زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده‌ی استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر احمد رمضان‌زاده و همچنین از زحمات استاد مشاور محترم جناب آقای دکتر مهدی نوروزی که در تحقق این پژوهش همکاری فراوان داشته‌اند کمال سپاس و قدردانی را داشته باشم.

ضمناً وظیفه‌ی خود دانسته که از بذل عنایت همه‌ی عزیزانی که در طول تحصیل مرا یاری نمودند به ویژه از دوست و برادر عزیزم مهندس مهدی باجولوند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

تعهدنامه

اینجانب **نوید افراسیابی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **مدلسازی عددی اثر پارامترهای هندسی درزه بر خردایش سنگ توسط دیسک‌های برش‌دهنده در سنگ سخت درزه‌دار** تحت راهنمایی دکتر احمد رمضان‌زاده متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

با توجه به نیاز عمده به فضاهای زیرزمینی و همچنین مزیت‌هایی از قبیل کاهش لرزش، کاهش نیروی انسانی، افزایش نرخ پیشروی و دیگر موارد - که روش حفاری مکانیزه نسبت به روش سنتی چالزنی و آتشیاری دارد - موجب گسترده‌گی استفاده از ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل (TBM) در ایجاد فضاهای زیرزمینی شده است. البته برخلاف روش سنتی استفاده از ماشین‌های حفاری نیاز به مطالعات مقدماتی فراوانی دارد. با توجه به اهمیت زمان و هزینه‌ی اجرای پروژه، پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل یک بخش مهم از این مطالعات است. عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع تونل متاثر از عوامل مختلفی نظیر عوامل ژئومکانیکی و عملیاتی می‌باشد. عوامل ژئومکانیکی شامل پارامترهای ماده سنگ و خصوصیات ناپیوستگی‌هاست از سوی دیگر عوامل عملیاتی نیز شامل نیروهای پیشران و گشتاور، هندسه‌ی دیسک‌ها و فاصله‌داری و نحوه‌ی قرارگیری آنها بر روی کله‌ی حفاری است. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه‌ی بررسی اثر این عوامل بر نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل اعم از مطالعات تحلیلی، تجربی و مدلسازی عددی صورت گرفته است. با توجه به اینکه ابزار برش‌دهنده‌ی سنگ واسطه‌ی انتقال انرژی (نیروی پیشران و گشتاور) از ماشین به سنگ می‌باشد - در نهایت منجر به خردایش سنگ می‌شوند - عملکرد ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل به طور اساسی به عملکرد دیسک برش‌دهنده وابسته است. یکی از معروف ترین روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی عملکرد دیسک برش‌دهنده و پارامترهای موثر بر آن، آزمون برش خطی است که عنوان یک روش دقیق و قابل اعتماد جهت ارزیابی عملکرد برش شناخته می‌شود. بالا بودن هزینه‌ی آماده‌سازی نمونه در این روش و هزینه‌های انجام آزمون و همچنین غیر قابل استفاده بودن این آزمون جهت بررسی اثر درزه‌داری بر برش در سنگ درزه‌دار از محدودیت‌های این روش می‌باشد. بنابراین مدل‌های عددی مناسب برای جبران این محدودیت‌ها توسعه یافته است. امروزه روش عددی المان مجزا روشی رایج جهت تحلیل محیط‌های ناپیوسته و فرآیندهایی همچون خردایش سنگ توسط ابزار برش‌دهنده می‌باشد. در این تحقیق با کاربرد روش عددی المان مجزا و با استفاده از کد جریان ذرات (PFC3D) به دلیل توانایی در

شبیه‌سازی رشد ترک و همچنین مدل کردن تخریب تحت تأثیر تغییرات تنش به بررسی اثر پارامترهای هندسی درزه بر عملکرد برش سنگ توسط برش‌دهنده‌ی دیسکی پرداخته شده است. ابتدا با شبیه‌سازی یک نمونه‌ی گرانیته بکر و ایجاد برش‌های متعدد توسط یک دیسک برش‌دهنده با قطر ۴۳ سانتی‌متر در فاصله داری و عمق نفوذهای مختلف روی آن، میزان نیروهای اعمال شده بر دیسک و اثر دو پارامتر فاصله‌داری و عمق نفوذ بر این نیروها بررسی شده و در نهایت نتایج بدست آمده با نتایج تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این بخش از تحقیق تطابق قابل قبولی میان مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در آخر با اعمال درزه‌هایی با ویژگی‌های هندسی مختلف، تأثیر درزه‌داری بر عملکرد دیسک برش‌دهنده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل درزه نشان می‌دهد با افزایش فاصله‌داری بین درزه‌ها تأثیر وجود درزه بر عملکرد برش کاهش می‌یابد. همچنین با بررسی پارامتر جهت‌داری درزه مشخص می‌شود زمانی که درزه‌ها زاویه‌ای برابر با ۶۰ درجه نسبت به جبهه کار دارند بهترین عملکرد برش حاصل می‌شود. البته قابل ذکر است که این نتیجه برای درزه‌هایی با فاصله‌داری بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر صادق است.

کلمات کلیدی: ماشین حفاری تونل – آزمون برش خطی – روش المان مجزا – نرم‌افزار PFC^{3D}

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

نوید افراسیابی، احمد رمضان زاده، مهدی نوروزی، مطالعه‌ی تأثیر هندسه‌ی برش ابزار برش-
دهنده‌ی دیسکی در سنگ سخت با استفاده از تحلیل عددی به روش المان مجزا، چاپ شده
در سومین کنفرانس منطقه ای و دوازدهمین کنفرانس ملی تونل ایران- آذر ۱۳۹۶.

فهرست مطالب

- ۱- فصل اول: کلیات ۱
- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- بیان مسئله ۳
- ۳-۱- ضرورت انجام تحقیق ۴
- ۴-۱- روش تحقیق ۵
- ۵-۱- ساختار پایان نامه ۶
- ۲- فصل دوم: مبانی نظری خردایش سنگ سخت با ابزار برش مکانیکی ۹
- ۱-۲- مقدمه ۱۰
- ۲-۲- ابزار برش دهنده‌ی سنگ سخت در ماشین حفاری تمام مقطع ۱۱
- ۳-۲- فرآیند خردایش سنگ تحت برش دهنده‌ی دیسکی ۱۳
- ۴-۲- عملکرد برش دهنده‌ی دیسکی در فرآیند خردایش سنگ ۱۶
- ۵-۲- آزمون برش خطی ۱۷
- ۶-۲- عوامل موثر بر عملکرد ماشین حفاری ۱۸
- ۷-۲- پارامترهای ارزیابی عملکرد ماشین ۱۹
- ۱-۷-۲- نرخ نفوذ (PR) ۱۹
- ۲-۷-۲- نرخ پیشروی (AR) ۲۰
- ۳-۷-۲- ضریب بهره‌وری (U) ۲۰
- ۴-۷-۲- انرژی ویژه (SE) ۲۱

- ۲۱ ۲-۷-۵- شاخص نفوذ برجا (FPI).....
- ۲۱ ۲-۸- جمع بندی.....
- ۲۳ ۳- فصل سوم: پیشینه مطالعاتی.....
- ۲۴ ۳-۱- مقدمه.....
- ۲۴ ۳-۲- پارامترهای ماده سنگ.....
- ۲۸ ۳-۳- پارامترهای توده سنگ.....
- ۳۰ ۳-۴- پارامترهای ماشین.....
- ۳۳ ۳-۵- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری.....
- ۳۷ ۳-۶- جمع بندی.....
- ۳۹ ۴- فصل چهارم: مدلسازی عددی خردایش سنگ بکر.....
- ۴۰ ۴-۱- مقدمه.....
- ۴۱ ۴-۲- کد جریان ذرات (PFC).....
- ۴۱ ۴-۲-۱- مدل پیوند ذرات (BPM).....
- ۴۳ ۴-۳- مدلسازی برش در سنگ بکر.....
- ۴۴ ۴-۳-۱- تعیین ابعاد حجم المان معرف برای شبیه‌سازی آزمون‌ها.....
- ۴۶ ۴-۳-۲- کالیبراسیون خواص آزمایشگاهی.....
- ۴۹ ۴-۳-۳- شبیه‌سازی دیسک برش‌دهنده.....
- ۵۱ ۴-۳-۴- شبیه‌سازی بلوک سنگی.....
- ۵۲ ۴-۳-۵- مدلسازی برش‌ها.....

- ۵۶۴-۳-۶- نتایج برش در سنگ بکر
- ۵۹۴-۴- جمع بندی
- ۶۱۵- فصل پنجم: مدل سازی عددی خردایش سنگ درزه دار
- ۶۲۵-۱- مقدمه
- ۶۲۵-۲- کالیبراسیون خواص مقاومتی درزه
- ۶۴۵-۳- مدل سازی بلوک سنگی
- ۶۵۵-۴- تحلیل حساسیت پارامترهای درزه
- ۶۶۵-۴-۱- بررسی تأثیر جهت داری درزه
- ۷۷۵-۴-۲- بررسی تأثیر فاصله داری درزه
- ۸۷۵-۴-۳- بررسی تأثیر درزه داری بر انرژی ویژه
- ۸۹۵-۵- جمع بندی
- ۹۱۶- فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
- ۹۲۶-۱- نتیجه گیری
- ۹۲۶-۱-۱- نتایج مدل سازی در سنگ بکر
- ۹۳۶-۱-۲- نتایج مدل سازی در سنگ درزه دار
- ۹۵۶-۲- پیشنهادات
- ۹۷۷- منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: انواع ماشینهای حفاری رایج مورد استفاده در حفاری سنگ سخت- الف: ماشین حفاری باز ب: ماشین حفاری تک سپره ج: ماشین حفاری دوسپره (Herrenknecht A. G. Website) ۱۱
- شکل ۲-۲: سطح مقطع رینگ برش دهنده‌ی ۷ شکل و CCS منطبق بر هم (Rostami, 1997) ۱۲
- شکل ۳-۲: تعدادی از برشدهنده‌های غلتشی رایج مورد استفاده در ماشینهای حفاری ۱۲
- شکل ۴-۲: جزئیات دیسک مقطع ثابت (Bartz Website) ۱۳
- شکل ۵-۲: اثر برشدهنده‌های دیسکی روی جبهه‌کار تونل (Jain et al., 2014) ۱۴
- شکل ۶-۲: میدان تنش و زونهای تشکیل شده در زیر برشدهنده (Rostami & Ozdemir, 1993) ۱۵
- شکل ۷-۲: تصویری شماتیک از فرآیند خردایش و تشکیل تراشه بین دو دیسک مجاور (Rostami, 1997) ۱۶
- شکل ۸-۲: نیروهای وارد بر برشدهنده‌ی دیسکی (Rostami, 1997) ۱۷
- شکل ۹-۲: دستگاه برش خطی (سمت راست) و اثر برشهای ناشی از دیسک روی سنگ (سمت چپ) (Entacher, 2013) ۱۸
- شکل ۱۰-۲: عوامل موثر بر عملکرد ماشین حفاری (Maidl et al. 2008) ۱۹
- شکل ۱-۳: ارتباط مقاومت فشاری تک محوری سنگ با دو پارامتر عملکردی نرخ نفوذ (سمت راست) و انرژی ویژه (سمت چپ) (Hassanpour et al., 2010) ۲۶
- شکل ۲-۳: ارتباط مقاومت فشاری تک محوری با نیروی قائم (الف) و نیروی غلتشی (ب) وارد بر برشدهنده‌ی دیسکی (Labra et al., 2012) ۲۶
- شکل ۳-۳: ارتباط میان شاخص تردی و نرخ نفوذ واقعی در تونل کوئینز (Yagiz, 2002) ۲۸
- شکل ۴-۳: نتایج اثر جهت‌داری در سمت راست بر نفوذ (Gong et al., 2006) و اثر فاصله‌داری بر نفوذ در شکل سمت چپ (Gong et al., 2005) ۳۰

- شکل ۳-۵: اثر فاصله‌داری و نفوذ روی نیروی قائم (سمت چپ) و غلتشی (سمت راست) (Gertsch et al., 2007) ۳۱
- شکل ۳-۶: ارتباط توان ماشین حفاری با قطر ماشین (dC قطر دیسک برش‌دهنده است). (Bruland, 2000) ۳۲
- شکل ۳-۷: ارتباط دور ماشین حفاری با قطر ماشین (dC قطر دیسک برش‌دهنده است). (Bruland, 2000) ۳۳
- شکل ۳-۸: ارتباط نسبت فاصله‌داری به نفوذ (S/P) با انرژی ویژه (Choi et al., 2013) ۳۳
- شکل ۴-۱: تصویر شماتیک از تماس خطی بین ذرات (راست) و پیوند سیمانی بین ذرات (چپ) ۴۲
- شکل ۴-۲: نمایی از برقراری پیوند موازی بین ذرات (Itasca Consulting Group, Inc.) ۴۳
- شکل ۴-۳: مفهوم REV (Koyama & Jing, 2007) ۴۵
- شکل ۴-۴: تعیین ابعاد REV در آزمون فشاری تک محوری ۴۶
- شکل ۴-۵: تعیین ابعاد REV در آزمون برزیلی (کشش غیرمستقیم) ۴۶
- شکل ۴-۶: آزمون مقاومت فشاری تک محوره (الف) تماس بین ذرات و نحوه گسیختگی نمونه (ب) ذرات تشکیل‌دهنده نمونه (ج) نمودار تنش - کرنش ۴۷
- شکل ۴-۷: آزمون مقاومت کششی برزیلی (الف) تماس بین ذرات و نحوه گسیختگی نمونه (ب) ذرات تشکیل‌دهنده نمونه (ج) نمودار تنش - کرنش ۴۸
- شکل ۴-۸: آزمون مقاومت تراکمی سه محوری (الف) تماس بین ذرات (ب) ذرات تشکیل‌دهنده نمونه ۴۸
- شکل ۴-۹: تصویر دیسک CCS (ب) دیسک مدل شده در نرم‌افزار PFC ۵۰
- شکل ۴-۱۰: نمونه‌ی سنگی مدل شده (الف) تصویر توزیع ذرات سازنده‌ی بلوک با نمایش بازشی شعاعی ذرات (ب) تصویر تماس‌های بین ذرات ۵۲
- شکل ۴-۱۱: شبیه‌سازی آزمون برش مستقیم (الف) برش اول (ب) برش دوم (ج) نیروهای

- عکسالعمل از سنگ به دیسک..... ۵۳
- شکل ۴-۱۲: نمودار نیرو - جابجایی برش اول با عمق نفوذ ۵ میلیمتر..... ۵۴
- شکل ۴-۱۳: نمودار نیرو - جابجایی برش دوم با عمق نفوذ ۵ میلیمتر و فاصله‌داری ۵۱ میلیمتر از برش اول..... ۵۴
- شکل ۴-۱۴: نمودار نیرو - جابجایی برش دوم با عمق نفوذ ۵ میلیمتر و فاصله‌داری ۷۶ میلیمتر از برش اول..... ۵۵
- شکل ۴-۱۵: مقاطع مختلف برش با عمق نفوذ p و فاصله‌داری s در مقطع x-x..... ۵۶
- شکل ۴-۱۶: نمودار نیروی قائم برش دوم در عمق نفوذ‌های مختلف با فاصله‌داری ۵۱ میلیمتری از برش اول..... ۵۷
- شکل ۴-۱۷: نمودار نیروی قائم برش دوم در عمق نفوذ‌های مختلف با فاصله‌داری ۷۶ میلیمتری از برش اول..... ۵۷
- شکل ۴-۱۸: نمودار نیروی غلتشی برش دوم در عمق نفوذ‌های مختلف با فاصله‌داری ۵۱ میلیمتری از برش اول..... ۵۸
- شکل ۴-۱۹: نمودار نیروی غلتشی برش دوم در عمق نفوذ‌های مختلف با فاصله‌داری ۷۶ میلیمتری از برش اول..... ۵۸
- شکل ۵-۱: تصویر شماتیک از مدل تماسی درزه صاف (Bahaaddini et al, 2012)..... ۶۳
- شکل ۵-۲: جزئیات شبیه‌سازی آزمون برش مستقیم..... ۶۳
- شکل ۵-۳: نمودار تنش برشی-جابجایی حاصل از مدل‌سازی..... ۶۴
- شکل ۵-۴: نمودار نیروی قائم-جابجایی برش در سنگ بکر..... ۶۵
- شکل ۵-۵: نمای بلوک شبیه‌سازی شده با توزیع ذرات براساس شعاع..... ۶۵
- شکل ۵-۶: نمای درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با فاصله‌داری ۳ سانتیمتر و زاویه الف) صفر درجه ب) ۳۰ درجه ج) ۶۰ درجه د) ۹۰ درجه..... ۶۷

- شکل ۵-۷: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزههایی با فاصله‌داری ۳ سانتیمتر و زاویه الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه..... ۶۸
- شکل ۵-۸: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در شیبهای مختلف درزه با فاصله داری ۳ سانتیمتر..... ۶۹
- شکل ۵-۹: نمای درزههای اعمال شده در بلوک سنگی با فاصله‌داری ۵ سانتیمتر و زاویه الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه..... ۶۹
- شکل ۵-۱۰: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزههایی با فاصله‌داری ۵ سانتیمتر و زاویه الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه..... ۷۰
- شکل ۵-۱۱: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در شیبهای مختلف درزه با فاصله داری ۵ سانتیمتر..... ۷۱
- شکل ۵-۱۲: نمای درزههای اعمال شده در بلوک سنگی با فاصله‌داری ۱۰ سانتیمتر و زاویه الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه..... ۷۱
- شکل ۵-۱۳: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزههایی با فاصله‌داری ۱۰ سانتیمتر و زاویه الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه..... ۷۲
- شکل ۵-۱۴: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در شیبهای مختلف درزه با فاصله داری ۱۰ سانتیمتر..... ۷۳
- شکل ۵-۱۵: نمای درزههای اعمال شده در بلوک سنگی با فاصله‌داری ۱۵ سانتیمتر و زاویه الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه..... ۷۳
- شکل ۵-۱۶: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزههایی با فاصله‌داری ۱۵ سانتیمتر و زاویه الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه..... ۷۴
- شکل ۵-۱۷: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در شیبهای مختلف درزه با فاصله داری ۱۵ سانتیمتر..... ۷۵

- شکل ۵-۱۸: نمای درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با فاصله‌داری ۲۰ سانتیمتر و زاویه الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه ۷۵
- شکل ۵-۱۹: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با فاصله‌داری ۲۰ سانتیمتر و زاویه الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه ۷۶
- شکل ۵-۲۰: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در شیب‌های مختلف درزه با فاصله داری ۲۰ سانتیمتر ۷۷
- شکل ۵-۲۱: نمای درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با شیب صفر درجه و فاصله‌داری الف) ۱ سانتیمتر ب) ۲ سانتیمتر ج) ۳ سانتیمتر د) ۴ سانتیمتر ۷۸
- شکل ۵-۲۲: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با شیب صفر درجه و فاصله‌داری الف) ۱ سانتیمتر ب) ۲ سانتیمتر ج) ۳ سانتیمتر د) ۴ سانتیمتر ۷۸
- شکل ۵-۲۳: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در فواصل مختلف درزه با شیب صفر درجه ۷۹
- شکل ۵-۲۴: نمای درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با شیب ۳۰ درجه و فاصله‌داری الف) ۳ سانتیمتر ب) ۵ سانتیمتر ج) ۱۰ سانتیمتر د) ۱۵ سانتیمتر ه) ۲۰ سانتیمتر ۸۰
- شکل ۵-۲۵: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با شیب ۳۰ درجه و فاصله‌داری الف) ۳ سانتیمتر ب) ۵ سانتیمتر ج) ۱۰ سانتیمتر د) ۱۵ سانتیمتر ه) ۲۰ سانتیمتر ۸۱
- شکل ۵-۲۶: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در فواصل مختلف درزه با شیب ۳۰ درجه ۸۲
- شکل ۵-۲۷: نمای درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با شیب ۶۰ درجه و فاصله‌داری الف) ۳ سانتیمتر ب) ۵ سانتیمتر ج) ۱۰ سانتیمتر د) ۱۵ سانتیمتر ه) ۲۰ سانتیمتر ۸۲
- شکل ۵-۲۸: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با شیب ۶۰ درجه و فاصله‌داری الف) ۳ سانتیمتر ب) ۵ سانتیمتر ج) ۱۰ سانتیمتر د) ۱۵ سانتیمتر ه) ۲۰ سانتیمتر ۸۳

شکل ۵-۲۹: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در فواصل مختلف درزه با شیب ۶۰ درجه

۸۴.....

شکل ۵-۳۰: نمای درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با شیب ۹۰ درجه و فاصله‌داری الف) ۳

سانتیمتر ب) ۵ سانتیمتر ج) ۱۰ سانتیمتر د) ۱۵ سانتیمتر ه) ۲۰ سانتیمتر..... ۸۵

شکل ۵-۳۱: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با شیب ۹۰ درجه و فاصله‌داری

الف) ۳ سانتیمتر ب) ۵ سانتیمتر ج) ۱۰ سانتیمتر د) ۱۵ سانتیمتر ه) ۲۰ سانتیمتر..... ۸۶

شکل ۵-۳۲: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در فواصل مختلف درزه با شیب ۹۰ درجه

۸۷.....

شکل ۵-۳۳: نمودارهای نیروی قائم در فاصله‌داری‌های مختلف برای سه شیب درزه ۳۰، ۶۰ و ۹۰

۸۷.....

شکل ۵-۳۴: نمودار تأثیر فاصله‌داری درزه در شیب‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روی انرژی ویژه..... ۸۸

فهرست جداول

- جدول ۳-۱: تعدادی از مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM ۳۴
- جدول ۴-۱: پارامترهای میکرو ذرات، پیوند خطی و پیوند موازی ۴۹
- جدول ۴-۲: خواص ژئومکانیکی سنگ ۴۹
- جدول ۴-۳: مراحل برش و مشخصات هر یک از مراحل ۵۵
- جدول ۵-۱: خواص ماکرو و میکرو درزه ۶۴
- جدول ۵-۲: مشخصات درزه‌ها و نتایج حاصل از برش در هر مرحله ۶۶
- جدول ۵-۳: مقادیر نیروی حاصل از برش در حالت درزه داری با شیب ۳۰ درجه ۸۱
- جدول ۵-۴: مقادیر نیروی حاصل از برش در حالت درزه داری با شیب ۶۰ درجه ۸۴
- جدول ۵-۵: مقادیر نیروی حاصل از برش در حالت درزه داری با شیب ۹۰ درجه ۸۵

فصل اول

کیات

از ادوار گذشته تاکنون، ساخت تونل و فضاهای زیرزمینی یکی از مهمترین بخش‌ها در ساخت راه‌ها و فضاهای مورد نیاز زیرسطحی بوده است. حفاری به روش چالزنی و آتشیاری برای قرن‌ها یکی از روش‌های عمده و مهم‌ترین روش حفاری بوده است اما از اواسط قرن بیستم میلادی، روش‌های مکانیزه در صنعت تونل‌سازی کاربرد پیدا کرد. امروزه حفاری مکانیزه به طور گسترده در پروژه‌های مختلف عمرانی و معدنی رونق گرفته است. یکی از جدیدترین و مهم‌ترین دستاوردها در زمینه‌ی حفاری با ابزار برش مکانیکی در فضاهای زیرزمینی، ماشین حفاری تمام مقطع تونل می باشد. در سال ۱۹۵۴ جیمز رابینز یک سیستم حفاری با برش‌دهنده‌ی دیسکی را در پروژه‌ی سد آهه^۱ در ایالت داکوتای جنوبی آمریکا به‌کارگرفت. پس از آن فناوری ماشین‌های حفاری با درک مناسب از مکانیزم شکست سنگ توسط ابزار برش مکانیکی و همچنین دیسک‌های برش‌دهنده با عمر بالاتر برای رسیدن به نرخ پیشروی بیشتر به طور چشم‌گیری توسعه یافتند. ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل ارائه دهنده‌ی یک حفاری پیوسته در هر محدوده‌ای از سنگ سخت تا زمین‌های نرم را فراهم کرده‌اند.

در چند دهه‌ی اخیر تحقیقات گوناگونی در پروژه‌های اجرا شده توسط ماشین حفاری تمام مقطع تونل صورت گرفته و به خوبی ارتباط بین پارامترهای زمین و نرخ نفوذ ماشین بررسی شده است. ویژگی‌های ژئومکانیکی می‌تواند اثر مستقیم بر انتخاب روش حفاری و اجرای پروژه در یک مکان مشخص داشته باشد. یکی از ملاحظات مهم در کاربرد موفق ماشین حفاری تمام مقطع تونل، طراحی بهینه و پیش بینی عملکرد ماشین می‌باشد. تاکنون ماشین حفاری تمام مقطع تونل در پروژه‌های مختلفی در سراسر جهان به نرخ‌های پیشروی فوق‌العاده‌ای دست یافته‌اند، که با هیچ روش حفاری دیگری قابل مقایسه نیست. این ماشین حفاری اکنون یکی از پرکاربردترین تجهیزات حفاری مکانیکی بوده و انتخاب نخست برای اکثر سازه‌های تونلی در محدوده‌ای گسترده‌ای از سنگ نرم تا سخت می‌باشد. اما پیش‌بینی عملکرد این دستگاه - که یکی از مسائل اساسی جهت تخمین هزینه و زمان ساخت پروژه است - هنوز

^۱ Oahe

نیاز به تحقیق و توسعه دارد. پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع تونل، کاهش هزینه‌های احداث و کاهش زمان انجام یک پروژه را فراهم می‌کند. عملکرد این ماشین به طور مستقیم به نرخ نفوذ و سایش دیسک برش‌دهنده مرتبط است که این عوامل خود به گونه‌ای به پارامترهای عملیاتی و طراحی ماشین، ویژگی‌های سنگ و ناپیوستگی‌ها وابسته هستند. مدل‌های گوناگونی جهت تخمین عملکرد ماشین حفاری تونل ارائه شده و هر یک از آن‌ها به نحوی تأثیر تعدادی از پارامترهای مختلف بر عملکرد ماشین حفاری را بررسی نموده‌اند که در نهایت این امر منجر به پیش‌بینی بهتر عملکرد شده است. این مدل‌ها، ابتدا به صورت ساده و به تعداد کمی از پارامترها وابسته بودند اما با گذشت زمان، تعداد پارامترهای ورودی این مدل‌ها افزایش یافته و روز به روز بهبود یافته است. از پرکاربردترین مدل‌های پیش‌بینی عملکرد می‌توان به مدل‌های^۱ CSM و NTNU اشاره کرد. فناوری ماشین حفاری تمام مقطع تونل و همچنین ابعاد تونل، روز به روز در حال توسعه بوده و این امر کارایی مدل‌های موجود را کاهش داده و روزآمد کردن و توجه به پارامترهایی مانند ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها که کمتر نسبت به دیگر پارامترها مورد توجه بوده، در حفاری سنگ سخت تأکید می‌کند.

۱-۲- بیان مسئله

حفاری مکانیزه توسط ماشین حفاری تمام مقطع تونل در سنگ سخت با خردایش سنگ توسط دیسک برش‌دهنده انجام می‌شود. خردایش سنگ - که در واقع با نفوذ ابزار برش و ایجاد و گسترش ترک در سنگ و در نهایت ایجاد خرده‌هایی از سنگ در ابعاد کوچک و بزرگ شناخته می‌شود - از مهمترین و تأثیرگذارترین عوامل برش بر سرعت پیشروی در حفاری مکانیزه می‌باشد. قبل از شروع عملیات حفاری با ماشین حفاری تمام مقطع تونل باید پیش‌بینی مناسبی از عملکرد این دستگاه داشت که در سنگ سخت این برآورد با معیارهای مختلفی نظیر میزان انرژی ویژه، مقدار حجم کنده شده از سنگ در واحد طول، نرخ نفوذ ابزار برش و ... انجام می‌شود. این معیارها به طور کلی به پارامترهای ژئومکانیکی، هندسه و پارامترهای عملیاتی خردایش وابسته‌اند. پارامترهای ژئومکانیکی شامل مشخصات

^۱ Colorado School Mine

ناپیوستگی‌ها و ویژگی‌های ماده سنگ و پارامترهای عملیاتی در واقع همان مشخصات هندسی دیسک (نوع، قطر، ضخامت لبه، فاصله داری دیسک‌ها و ...) و مشخصات عملیاتی دستگاه حفاری همان نیروی رانش^۱، توان^۲، گشتاور^۳، دور کله‌ی حفاری یا RPM^۴ می‌باشد که هر یک به گونه‌ای بر روند خردایش سنگ توسط دیسک برش‌دهنده اثرگذارند.

روشن است که وجود ناپیوستگی‌ها در سنگ، موجب تغییر اساسی در مقاومت توده سنگ می‌شود لذا در بررسی خردایش توده‌سنگ درزه‌دار علاوه بر شناخت ویژگی‌های ماده سنگ توجه به تأثیر ویژگی‌های مهندسی درزه ضروری است. ناپیوستگی‌ها در توده سنگ بطور کلی دارای دو نوع مشخصه‌ی هندسی (فاصله داری، جهت داری، زبری، بازشدگی و پایایی) و مکانیکی (مقاومت برشی و مقاومت تک‌محوری سطح درزه) هستند. هر یک از این مشخصه‌ها به نحوی می‌تواند بر خردایش سنگ توسط دیسک برش‌دهنده تأثیرگذار باشند که می‌توان به طور جداگانه اثر هر یک را مورد بررسی قرار گیرد. اما هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر جهت‌داری درزه (زاویه‌ی درزه با راستای تونل) و فاصله داری درزه‌ها، بر فرآیند خردایش توده‌سنگ درزه‌دار با ابزارهای برش دیسکی می‌باشد.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به پیچیدگی مسائل فنی-اجرایی در استفاده از ماشین حفاری تمام مقطع تونل از یک سو و هزینه‌ی سرمایه‌ای بالای آن و نیز اهمیت زمان پروژه که با سرعت پیشروی ارتباط مستقیم دارد از سوی دیگر، مطالعات اولیه در استفاده از این دستگاه الزامی است. یکی از بررسی‌های ضروری در این زمینه پیش‌بینی دقیق نرخ پیشروی ماشین حفاری تمام مقطع تونل است. تحقیقاتی که تاکنون در بحث خردایش سنگ توسط دیسک برش‌دهنده و در پی آن پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع تونل و عوامل موثر بر آن صورت گرفته است هرکدام به گونه‌ای بر برخی پارامترها اعم از عملیاتی و

^۱ Thrust

^۲ Power

^۳ Torque

^۴ Round Per Minute

ژئومکانیکی تکیه داشته‌اند. برای نمونه به دو مدل پیش‌بینی عملکرد CSM و NTNU اشاره می‌شود که در صنعت کاربرد فراوانی نسبت به سایر مدل‌ها دارند. مدل CSM بر پایه‌ی خردایش سنگ بکر توسط دیسک برش‌دهنده است لذا پارامترهای توده سنگ به طور مستقیم در مدل بکار گرفته نشده‌اند. از سوی دیگر در مدل NTNU علاوه بر پارامترهای ذاتی سنگ بکر و نیز پارامترهای عملیاتی ماشین، تأثیر ناپیوستگی‌ها به نحو موثری در لحاظ شده است اما با توجه به تجربی بودن مدل، جزئیات فرآیند خردایش قابلیت مدل‌سازی دقیق ندارد. همچنین در مطالعات آزمایشگاهی علاوه بر هزینه‌ی بالا و مشکلات تهیه‌ی نمونه، شرایط توده سنگ تحت آزمایش با شرایط سنگی که کله‌ی حفار با آن درگیر است، اختلاف زیادی دارد همچنین استفاده از نمونه‌ی درزه دار در شرایط آزمایشگاهی ممکن نیست و از سوی دیگر دسترسی به داده‌های واقعی شرایط درزه‌ها در توده‌سنگ درزه دار حین عملیات تونل‌سازی به طور معمول دشوار می‌باشد، لذا علی‌رغم اهمیت جدی پارامترهای ناپیوستگی در خردایش توده‌سنگ درزه‌دار، این امر به دلیل کمبود اطلاعات کمتر مورد توجه تحقیق قرار می‌گیرد. بنابراین کاربرد تکنیک‌های عددی جهت بررسی و مطالعه‌ی تأثیر پارامترهای هندسی درزه‌ها می‌تواند نقش موثری در افزایش درک موجود از فرآیند خردایش توده سنگ با ابزار برش دیسکی ارائه نماید.

۴-۱- روش تحقیق

در این تحقیق به بررسی تأثیر پارامترهای درزه‌داری بر خردایش سنگ توسط دیسک برش‌دهنده و در نهایت، بررسی نفوذ دیسک برش‌دهنده در توده سنگ به روش تحلیل عددی پرداخته می‌شود. جهت بررسی این موضوع، ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای کافی جهت درک بهتر مکانیسم خردایش سنگ توسط ابزار برش مکانیکی صورت می‌گیرد سپس با توجه به مطالعات صورت گرفته نرم افزار مناسب جهت مدل‌سازی عددی انتخاب می‌شود. در اولین گام مدل‌سازی، مدلی مرجع برای سنگ بکر ساخته خواهد شد. سپس با اعمال نفوذ دیسک در این مدل نتایج حاصل با نتایج آزمون برش خطی مقایسه می‌شود و در گام بعد به بررسی سناریوهای مختلف درزه‌داری بر فرآیند خردایش در مدل عددی پرداخته خواهد شد. پس از تحقق یافتن این اهداف، بر روی هر یک از عوامل موثر بر خردایش که در مدل لحاظ شده‌اند

تحلیل حساسیت انجام می‌شود. در انتها یک تفسیر کلی و جمع بندی از فعالیت‌های صورت گرفته طی یک گزارش نهایی ارائه خواهد شد.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

تحقیق حاضر در شش فصل تنظیم شده است. در فصل ۱ به کلیات موضوع شامل ضرورت و اهداف تحقیق، پیشینه تحقیق و روش انجام تحقیق اشاره شده است.

در فصل دوم مبانی نظری حفاری مکانیزه در سنگ سخت با توجه ویژه به ابزار حفاری دیسکی و همچنین مکانیزم عملکرد آنها را ارائه خواهد شد. در این فصل همچنین پارامترهای موثر بر عملکرد برش و پارامترهای ارزیابی عملکرد ماشین حفاری به اختصار توضیح داده می‌شوند.

در فصل سوم پارامترهای موثر بر عملکرد برش سنگ توسط برش‌دهنده‌های دیسکی به طور مفصل ارزیابی می‌شود همچنین تحقیقاتی که در گذشته در مورد هریک از این پارامترها انجام شده است، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در فصل چهارم با توجه به انتخاب روش مدلسازی عددی است به عنوان روش اصلی این تحقیق، می‌بایست پیش از تحلیل پارامترها ابتدا یک مدل مرجع جهت اطمینان از نتایج مدلسازی‌های عددی ساخته شود. در این راستا آزمون برش خطی در حالت سنگ بدون درزه جهت ساخت مدل مرجع شبیه‌سازی خواهد شد.

فصل پنجم شامل مدلسازی عددی خردایش سنگ در بلوک سنگی درزه‌دار می‌باشد. در این فصل با توجه به اهداف کلی تحقیق، تأثیر پارامترهای هندسی درزه بر عملکرد برش مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل ۶ خلاصه‌ای از نتایج مدلسازی‌های انجام شده در تحقیق حاضر ارائه می‌شود. همچنین نتایج حاصل از تحقیق در این فصل ارائه شده و در نهایت پیشنهاداتی برای محققانی که در آینده علاقمند به پژوهش در این زمینه هستند، ارائه خواهد شد.

فصل دوم

مبانی نظری خرید ایش سنک

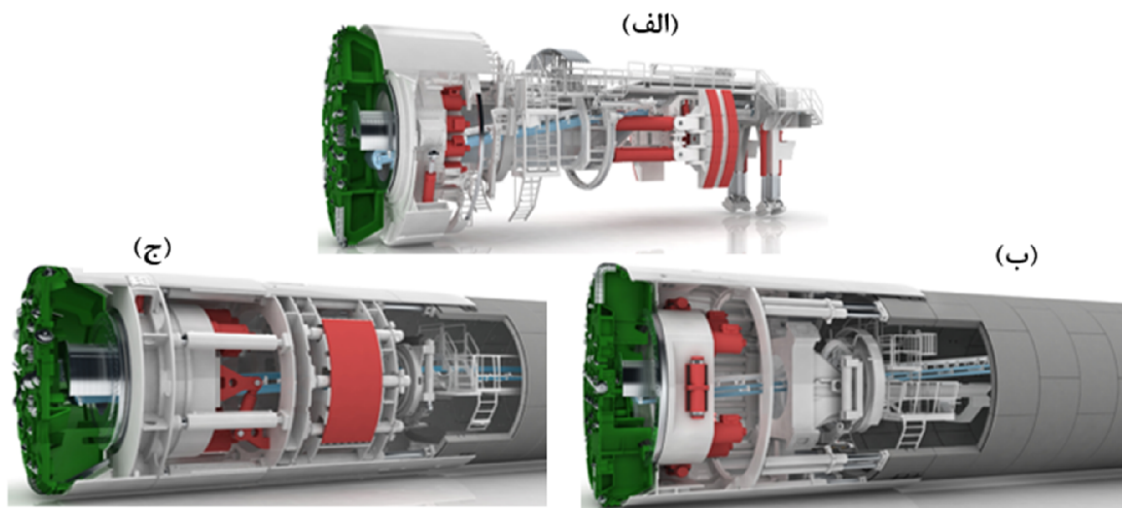
سخت با ابزار برش مکانیکی

۲-۱- مقدمه

فرآیند برش سنگ همراه با ایجاد شیار روی سطح سنگ توسط ابزار برش دهنده با حرکت به سمت جلو و ایجاد خط برش در پشت ابزار و در نهایت شکست و خردایش سنگ می‌باشد. (Nelson et al., 1983) عملیات برش بوسیله ابزار برشی، نیازمند یک نیروی قائم بر سطح برش برای نگه‌داشتن ابزار روی سطح سنگ و یک نیروی موازی سطح جهت غلتش دیسک روی سنگ می‌باشد. از این نقطه نظر، ماشین حفاری تمام مقطع تونل به عنوان یک دستگاه در نظر گرفته می‌شود که نیروی رانش جهت حرکت کله‌ی حفاری به سمت جلو و گشتاور جهت چرخش کله‌ی حفاری را به طور هم‌زمان اعمال می‌کند.

شکل ۱-۲ انواع ماشین حفاری تمام مقطع تونل‌های رایج مورد استفاده در حفاری سنگ سخت را نشان می‌دهد. این ماشین‌ها وابسته به شرایط زمین و پایداری آن هنگام حفاری، باز و سپر بسته می‌باشند. نوع باز به طور معمول برای شرایط توده سنگ‌های پیوسته استفاده می‌شود. در این ماشین‌ها سنگ‌ها توسط برش دهنده‌های غلتشی^۱ سست می‌شود. سنگ سخت به طور معمول به‌عنوان سنگی با مقاومت فشاری تک‌محوری بالا (بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال) در نظر گرفته می‌شود. اغلب سنگ‌های آذرین و دگرگونی به عنوان سنگ سخت محسوب می‌شوند زیرا به طور معمول دارای مقاومت فشاری تک-محوری‌ای بین ۱۰۰ تا ۲۸۰ مگاپاسکال می‌باشند. در بعضی موارد ممکن است سنگ به اندازه‌ی کافی پایدار نباشد و به دلیل نیاز فوری به نگهداری اجازه‌ی استفاده از ماشین حفاری تمام مقطع تونل سپر باز را ندهد. زمانی که سنگ دارای شکستگی‌های زیادی بوده و ناپایدار باشد، یک پوشش بایستی در فاصله‌ی کوتاهی از جبهه‌کار نصب شود. در نتیجه برای هر شرایطی از زمین، یک ماشین سپر بسته کاربردی است. (Maidl et al., 2008)

^۱ Rolling Cutters



شکل ۲-۱: انواع ماشین‌های حفاری رایج مورد استفاده در حفاری سنگ سخت- الف: ماشین حفاری باز ب: ماشین حفاری تک سپره ج: ماشین حفاری دوسپره (Herrenknecht A. G. Website)

۲-۲- ابزار برش دهنده‌ی سنگ سخت در ماشین حفاری تمام مقطع

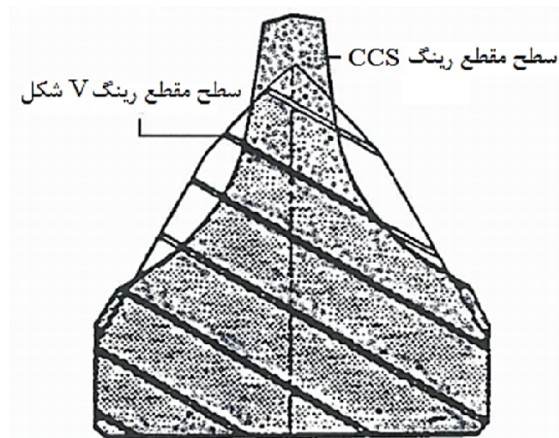
برش‌دهنده‌های اولیه‌ی مورد استفاده در ماشین‌های حفاری سنگ سخت دیسک‌هایی با مقطع V شکل^۱ بودند. سایش زیادی که در نوک این نوع برش‌دهنده‌ها رخ می‌داد منجر به تعویض مکرر آنها شده و عملیات پیشروی را کند می‌کرد. باید در نظر داشت سایش سبب تغییر زیاد سطح مقطع شده که می‌تواند عملکرد دیسک را به سرعت تغییر دهد. با شروع دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی، برش‌دهنده‌های دیسکی V شکل با هدف کاهش سایش دیسک و افزایش بازدهی برش، جایگاه خود را به برش‌دهنده‌های دیسکی با مقطع ثابت (CCS)^۲ دادند. شکل ۲-۲ تصویری از هر دو مقطع را به طور منطبق بر هم نشان می‌دهد. در ادامه با گذشت زمان دیسک‌های برش‌دهنده با بکارگیری مواد مقاوم در برابر سایش در ساخت آنها نقش مهمی را در افزایش کارایی و بهبود عملکرد حفاری داشتند. تاکنون برش‌دهنده‌های مختلفی که در شکل ۲-۳ تعدادی از آنها نشان داده شده است در ماشین‌های حفاری سنگ سخت بکار گرفته شده‌اند. برش‌دهنده‌های دیسکی تکی^۳ به عنوان موثرترین و پرکاربردترین ابزار برش‌دهنده محسوب

^۱ V-shap

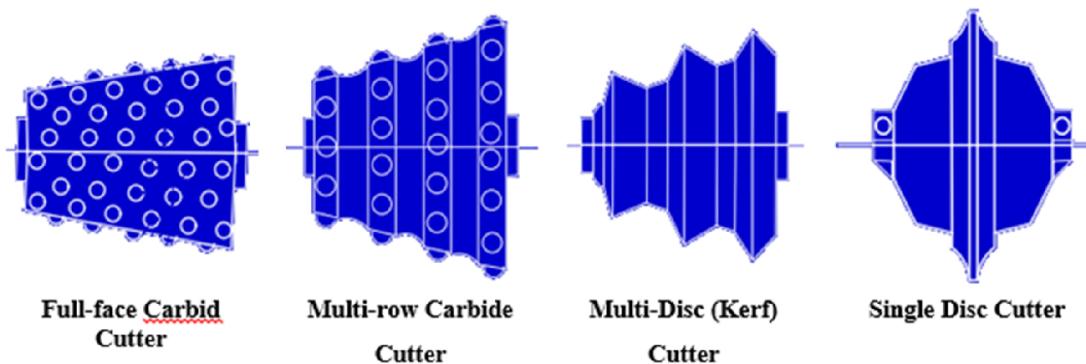
^۲ Constant Cross Section

^۳ Single Disc Cutter

می‌شود. این نوع برش‌دهنده با ایجاد تراشه‌های^۱ بزرگ از سنگ، حفاری بسیار موثری را ارائه می‌دهند. در عملیات حفاری، هر دیسک برای ایجاد یک شیار روی سطح سنگ طراحی می‌شود. همانطور که در ادامه شرح داده خواهد شد، فاصله‌ی دیسک‌ها از یکدیگر، میزان نیروی اعمالی بر دیسک‌ها و میزان نفوذشان در سنگ پارامترهای بسیار موثر در ایجاد تراشه و عملکرد ماشین هستند.



شکل ۲-۲: سطح مقطع رینگ برش‌دهنده‌ی V شکل و CCS منطبق بر هم (Rostami, 1997)



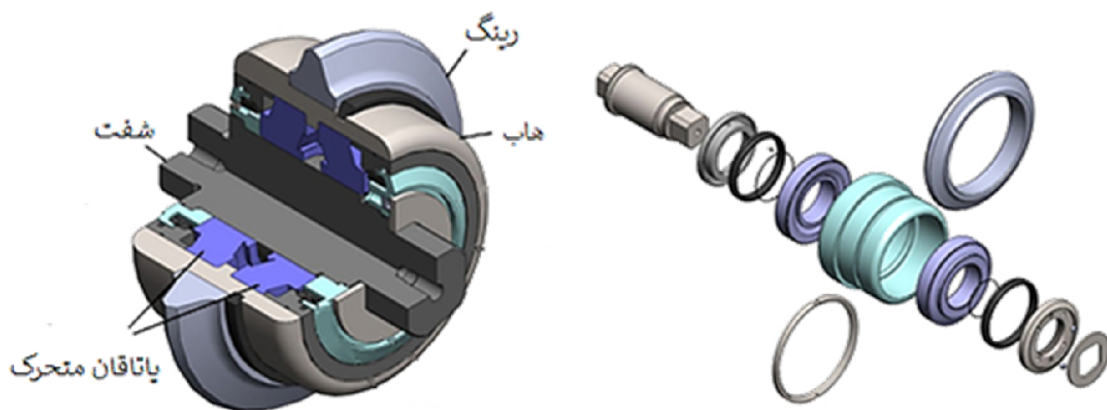
شکل ۲-۳: تعدادی از برش‌دهنده‌های غلتشی رایج مورد استفاده در ماشین‌های حفاری

در شکل ۲-۳ بازدهی برش از چپ به راست افزایش می‌یابد. متداول‌ترین ابزار برش‌دهنده‌ی مورد استفاده در ماشین‌های حفاری بزرگ مقطع، برش‌دهنده‌های دیسکی تکی هستند که کارآمدترین ابزار برش موجود است. برش‌دهنده‌ی دیسکی متشکل از یک رینگ است که بر روی هاب^۲ دوار متصل است.

^۱ Chips

^۲ Hub

خود هاب توسط یک یاتاقان متحرک بر روی شفت ثابتی نصب می‌شود. در شکل ۲-۴ یک برش‌دهنده‌ی دیسکی مقطع ثابت و همچنین اجزای تشکیل‌دهنده‌ی دیسک مشاهده می‌شود. این نوع برش‌دهنده‌ها در قطرهای مختلفی از ۱۷ تا ۱۹ اینچ ساخته می‌شوند. امروزه رایج‌ترین آن‌ها دیسک‌های ۱۷ اینچی هستند. توسعه‌ی دیسک‌های ۱۷ اینچی از اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی گام مهمی در افزایش عملکرد ماشین‌های حفاری سنگ سخت بوده است.



شکل ۲-۴: جزئیات دیسک مقطع ثابت (Bartz Website)

۲-۳- فرآیند خردایش سنگ تحت برش‌دهنده‌ی دیسکی

حفاری با ماشین حفاری تمام مقطع نوعی حفاری چرخشی است که طی آن کله‌ی حفاری ضمن چرخش، نیروی نسبتاً زیادی را توسط دیسک‌ها به سینه‌کار تونل اعمال می‌کند. در هر دور چرخش کله‌ی حفاری، دیسک‌ها مقدار مشخصی در سنگ نفوذ می‌کنند که اثر آن‌ها بر روی سینه‌کار تونل، به شکل دوایر متحدالمرکز باقی می‌ماند که تصویر آن در شکل ۲-۵ نمایان است.

تاکنون نظریه‌های مختلفی برای شرح فرآیند خردایش سنگ ارائه شده است. براساس نظریه‌ی توسعه یافته در مدرسه معدن کلرادو^۱، خردایش سنگ توسط دیسک‌کاتر شامل خردشدن^۲، تشکیل

^۱ Colorado School of Mines

^۲ Crushing

تراشه^۱ و تشکیل ترک^۲ می‌شود. به هنگام اعمال نیرو از طرف برش‌دهنده‌ی دیسکی بر سنگ در زیر دیسک، سه زون خردشده، ترک‌ها و الاستیک تشکیل می‌شود. همچنین از دیدگاه نوع تنش، سه زون فشاری، حد واسط^۳ و کششی در زیر دیسک ایجاد می‌شود که تمامی این جزئیات در شکل ۲-۶ مشاهده می‌شود. (Rostami & Ozdemir, 1993)

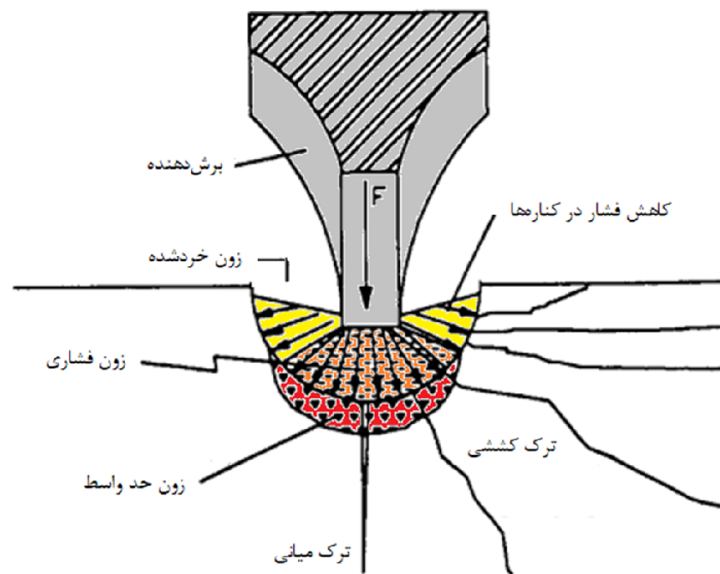


شکل ۲-۵: اثر برش‌دهنده‌های دیسکی روی جبهه کار تونل (Jain et al., 2014)

^۱ Chipping

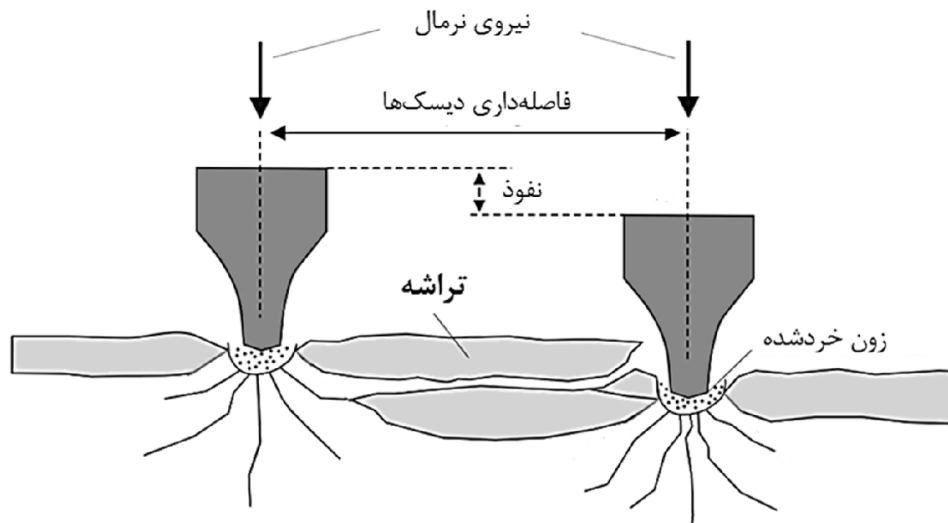
^۲ Cracking

^۳ Transition zone



شکل ۲-۶: میدان تنش و زون‌های تشکیل شده در زیر برش دهنده (Rostami & Ozdemir, 1993)

فرآیند خردایش سنگ به گونه‌ای است که ابتدا دیسک در حال چرخش، تحت نیروی رانش ماشین در سنگ نفوذ می‌کند. این امر موجب می‌شود یک زون خردشده در زیر خود ایجاد شود که با افزایش فشار، ابعاد این ناحیه گسترش می‌یابد. در این هنگام تنش‌های کششی ایجاد شده در زون خردشده، سبب تشکیل و گسترش ترک‌ها می‌شود. این فرآیند تا جایی که تنش‌های کششی موجود از مقاومت کششی سنگ کمتر شود، ادامه دارد. پس از این فرآیند اگر تنش‌های توسعه یافته در زون خرد شده به اندازه‌ی کافی بزرگ باشند، ترک‌های تشکیل شده میان دو دیسک مجاور به سوی یگدیگر گسترش یافته و به هم می‌پیوندند. در نتیجه همانطور که در شکل ۲-۷ نشان داده شده است، تراشه‌های بزرگی بین دو دیسک مجاور تشکیل می‌شود. با ایجاد تراشه‌ها و جدا شدن آن‌ها از سینه‌کار تونل، فرآیند خردایش تکمیل شده و کله‌ی حفاری در سنگ پیشروی می‌کند (Rostami & Ozdemir, 1993). البته بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی سنگ و نیروی رانش اعمالی، برش دهنده‌ها بایستی در جبهه‌کار تونل، از یک ناحیه‌ی معین دو یا سه بار عبور کنند تا یک تراشه از سنگ تشکیل شود. (Lislerud, 1997)



شکل ۲-۷: تصویری شماتیک از فرآیند خردایش و تشکیل تراشه بین دو دیسک مجاور (Rostami, 1997)

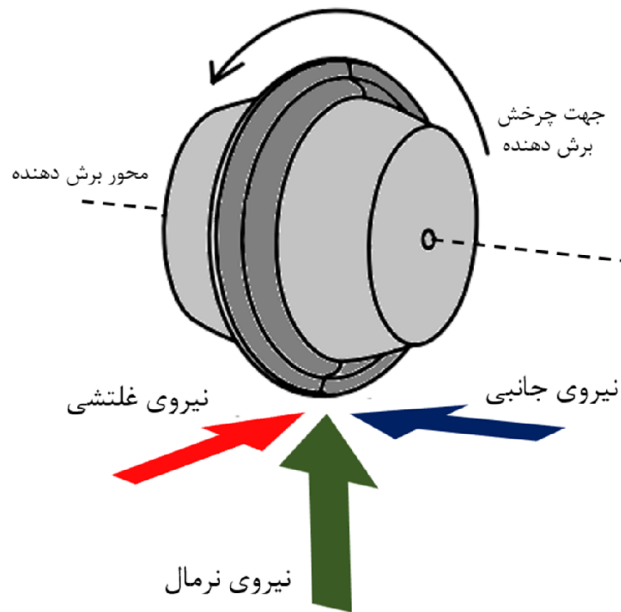
۲-۴- عملکرد برش‌دهنده‌ی دیسکی در فرآیند خردایش سنگ

همانطور که در شکل ۲-۸ نمایان است، نیروهای اعمالی بر برش‌دهنده‌ی دیسکی شامل نیروی قائم^۱، غلتشی^۲ و جانبی^۳ می‌باشند. نیروهای قائم، نیروی پیشران مورد نیاز دستگاه و نیروهای غلتشی، گشتاور و توان مورد نیاز دستگاه را تعیین می‌کنند. نیروهای جانبی به طور معمول تصادفی اند زیرا تراشه می‌تواند در سمتی ایجاد شود که در سمت مقابل آن فشار حفظ شده باشد. در واقع ناحیه را می‌توان به دو بخش تشکیل تراشه و حفظ فشار در دو طرف دیسک تقسیم کرد (Rostami, 1997). از این نیروها جهت ارزیابی عملکرد دیسک در فرآیند برش استفاده می‌شود. عملکرد برش‌دهنده‌ی دیسکی در خردایش سنگ اساسی‌ترین عامل موثر بر عملکرد ماشین حفاری است. یکی از روش‌های اصلی مطالعه و بررسی آن، آزمون برش خطی می‌باشد.

^۱ Normal force

^۲ Rolling force

^۳ Side force



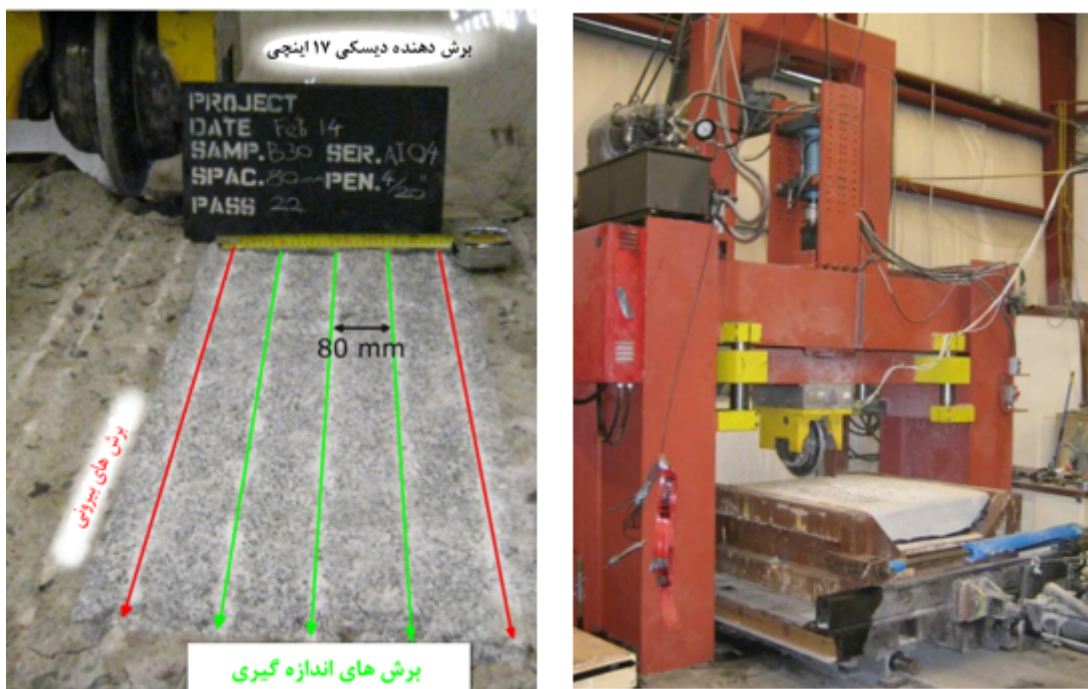
شکل ۲-۸: نیروهای وارد بر برش دهنده‌ی دیسکی (Rostami, 1997)

۲-۵- آزمون برش خطی

آزمون برش خطی بوسیله دستگاه برش خطی^۱ انجام می‌شود. این دستگاه می‌تواند یک دیسک را در اندازه واقعی خود، بر روی سطح نمونه‌های بلوکی سنگ با اعمال نیرو و عمق نفوذ مشخص به حرکت درآورد. دستگاه برش خطی متشکل از یک قاب فولادی صلب است که دیسک بر روی آن نصب شده است. یک دستگاه اندازه‌گیری نیروی سه محوری (که بین کاتر و قاب نصب شده) نیروها را اندازه‌گیری و ثبت می‌کند. نمونه سنگ درون یک جعبه فولادی توسط بتن ثابت شده تا در حین انجام آزمایش حرکت نکند. یک جک هیدرولیکی با کنترل دقیق، نمونه را به سمت کاتر حرکت می‌دهد تا کاتر در سنگ نفوذ کرده و سطح نمونه را تا عمق از قبل تعیین شده، در امتداد یک خط، برش دهد. در حین انجام برش، سلول فشار سه بعدی، بارهای قائم، غلتشی و جانبی که بر روی کاتر اعمال می‌شود را اندازه‌گیری می‌کند (شکل ۲-۹). بعد از هر مرحله، قاب نمونه به اندازه فاصله مشخصی که از قبل تعیین شده است، حرکت داده می‌شود تا برش‌های جانبی نیز ایجاد شوند. بزرگترین مزیت این دستگاه برش خطی، انجام آزمایش در مقیاس واقعی با ابزار برش است. یعنی می‌توان یک دیسک را در اندازه واقعی

^۱ Linear Cutting Machine (LCM)

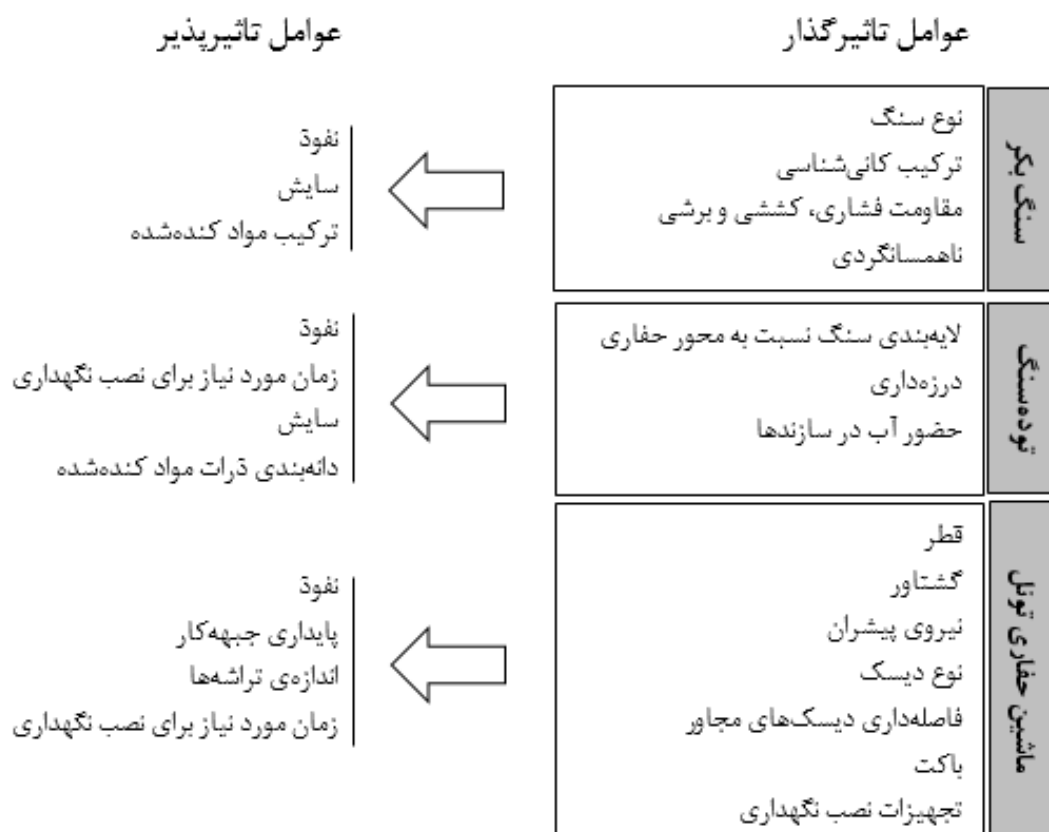
خود بر روی سطح سنگ با نیروی رانش کنترل شده و عمق نفوذ مشخص برای برآورد نیروهای برشی، به حرکت درآورد. دستگاه، امکان مطالعه‌ی کامل خردایش سنگ با ابزار برش مکانیکی، اثر متقابل بین سنگ و دیسک و تأثیر پارامترهای مختلف بر نیروهای برش را فراهم می‌سازد. هزینه بالای ساخت و نگهداری دستگاه منجر به بالا رفتن هزینه‌های انجام آزمایش و محدود شدن تعداد دستگاه به برخی از مراکز تحقیقاتی دنیا شده است.



شکل ۲-۹: دستگاه برش خطی (سمت راست) و اثر برش‌های ناشی از دیسک روی سنگ (سمت چپ) (Entacher, 2013)

۲-۶- عوامل موثر بر عملکرد ماشین حفاری

همانطور که در شکل ۲-۱۰ ملاحظه می‌شود، عملیات حفاری و عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع به عوامل مختلفی وابسته است. اما به طور کلی می‌توان گفت عملکرد یک ماشین حفاری وابسته به بخش خردایش سنگ توسط کله‌ی حفاری، واحد جمع‌آوری و انتقال مواد کنده‌شده و واحد نصب نگهداری می‌باشد. در تحقیق حاضر، خردایش سنگ و نفوذ ماشین حفاری تمام مقطع و عوامل موثر بر آن که در واقع عوامل ژئومکانیکی و عملیاتی ماشین (واحد برش سنگ) هستند، به طور مستقیم مدنظر می‌باشند.



شکل ۲-۱۰: عوامل موثر بر عملکرد ماشین حفاری (Maidl et al. 2008)

۲-۷- پارامترهای ارزیابی عملکرد ماشین

تاکنون پارامترهای مختلفی برای ارزیابی عملکرد ماشین حفاری ارائه شده است. این پارامترها به تفصیل توسط حسن‌پور و رستمی (۱۳۸۹) مورد بررسی قرار گرفته‌اند، که در ادامه خلاصه‌ای از آنها بیان می‌شود.

۲-۷-۱- نرخ نفوذ (PR)^۱

نرخ نفوذ ماشین حفاری در تعریف، نسبت طول حفر شده‌ی تونل به زمان مفید حفر همان بخش از تونل می‌باشد (رابطه‌ی ۲-۱).

$$PR \left(\frac{m}{h} \right) = \frac{L(m)}{t_B(h)} \quad (2-1)$$

^۱ Penetration Rate

که در این رابطه L میزان طول حفاری شده بر حسب متر و t_B زمان مفید حفر مقطع مورد نظر است. البته نرخ نفوذ را بر حسب نفوذ بر تعداد چرخش کله‌ی حفار (ROP^1) نیز بیان می‌کنند که به صورت رابطه‌ی ۲-۲ بیان می‌شود.

$$ROP \left(\frac{mm}{rev} \right) = \frac{1000 PR \left(\frac{m}{h} \right)}{60 RPM} \quad (2-2)$$

در رابطه‌ی ۲-۲ مقدار ROP میزان نفوذ بر حسب میلی‌متر بر هر دور کله‌حفار و RPM^2 تعداد دور کله‌ی حفاری در هر دقیقه است.

۲-۷-۲- نرخ پیشروی (AR^3)

میزان پیشروی ماشین حفاری تونل در یک بازه‌ی زمانی مشخص با در نظرگیری توقف‌های ناشی از موارد مختلف مانند تعویض برش‌دهنده‌های فرسوده، تعمیر و سرویس ماشین و ... یا به عبارت دیگر، حاصل ضرب نرخ نفوذ در ضریب بهره‌وری ماشین را نرخ پیشروی می‌گویند (رابطه‌ی ۳-۲).

$$AR \left(\frac{m}{day} \right) = 24 PR \left(\frac{m}{h} \right) \cdot U (\%) \quad (3-2)$$

در رابطه‌ی بالا، AR نرخ پیشروی بر حسب متر بر روز، PR نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت و U ضریب بهره‌وری ماشین بر حسب درصد می‌باشد.

۲-۷-۳- ضریب بهره‌وری (U^4)

ضریب بهره‌وری عبارت است از نسبت زمان خالص حفاری (t_B) به یک بازه‌ی زمانی مشخص (t) و با رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$U (\%) = \frac{t_B}{t} \quad (4-2)$$

¹ Rate Of Penetration

² Round Per Minute

³ Advance Rate

⁴ Utilization

۲-۷-۴- انرژی ویژه (SE)^۱

انرژی ویژه، میزان انرژی مورد نیاز برای خردایش حجم معین از سنگ توسط ابزار برش مکانیکی می‌باشد که با توجه به تحقیقات گذشته روابط مختلفی برای آن ارائه شده است. اما به طور کلی این پارامتر تابعی از نیروی غلتشی وارد بر دیسک برش‌دهنده می‌باشد که با استفاده از رابطه‌ی ۲-۵ محاسبه می‌شود (Chang, 2006; Choi, 2015) :

$$SE = \frac{F_r \cdot D}{V} \quad (۵-۲)$$

در این معادله SE انرژی ویژه، F_r نیروی غلتشی، D جابجایی دیسک و V حجم سنگ کنده شده در اثر برش می‌باشد.

۲-۷-۵- شاخص نفوذ برجا (FPI)^۲

این شاخص یکی از پارامترهای ترکیبی عملکرد ماشین حفاری است که تابعی از نیروی قائم (F_N) و نرخ نفوذ (ROP) می‌باشد. این شاخص از رابطه‌ی ۲-۵ محاسبه می‌شود.

$$FPI = \frac{F_N}{ROP (mm/rev)} \quad (۶-۲)$$

۲-۸- جمع بندی

به طور کلی در این فصل ابزار حفاری در سنگ سخت، مکانیزم عملکرد این ابزار و پارامترهای ارزیابی عملکرد این ابزار مورد بررسی قرار گرفت. همچنین پارامترهای موثر بر خردایش سنگ توسط این ابزار و در نتیجه عملکرد ماشین حفاری به طور خلاصه ذکر شد. این عوامل هر یک به نوعی عملکرد دستگاه حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی عملکرد دستگاه حفاری صورت گرفته و هر یک از این مطالعات به گونه‌ای تعدادی از عوامل مذکور را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در فصل بعد به شرح مفصل پارامترهای موثر بر عملکرد ماشین حفاری و تحقیقات صورت گرفته در این زمینه پرداخته خواهد شد.

^۱ Specific Energy

^۲ Field Penetration Index

فصل سوم

پیشینه مطالعاتی

همانطور که در فصل گذشته اشاره شد، پارامترهای مختلفی بر عملکرد TBM اثرگذارند. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای از جانب محققان مختلف در سراسر جهان در این زمینه صورت گرفته است. این مطالعات به‌طور کلی در سه شاخه‌ی تجربی، تئوری و مدلسازی عددی جای می‌گیرند. مطالعات تجربی با تحقیق روی داده‌های مربوط به پروژه‌های مختلف انجام شده یا در حال انجام، صورت می‌گیرد. از مهمترین محدودیت‌ها در نتایج این نوع مطالعه، عدم تطبیق دقیق با شرایط گوناگون در مناطق مختلف می‌باشد. مطالعات تئوری با تکیه بر آزمون‌های آزمایشگاهی و بررسی برهم‌کنش سنگ و برش‌دهنده با در نظرگیری پارامترهای هندسی برش (فاصله‌داری دیسک‌ها از یکدیگر و عمق نفوذ دیسک در سنگ)، برش‌دهنده (قطر دیسک، پهنای نوک) و خصوصیات ماده سنگ و اثر آن‌ها بر نیروی‌های وارد بر برش-دهنده توسعه یافته‌اند. در این نوع مطالعه تهیه‌ی نمونه برای انجام آزمون‌های بزرگ مقیاس، دشوار بوده و با هزینه‌های زیادی همراه است. علاوه بر این، بررسی پارامترهای توده‌سنگ و اثرشان بر عملکرد برش‌دهنده در این نوع مطالعه تقریباً غیرممکن است و تنها شرایط بررسی خواص ماده‌سنگ وجود دارد. وجود این محدودیت‌های موجب استفاده از مدلسازی عددی که روشی بسیار جدیدتر از روش‌های مطالعاتی دیگر می‌باشد، شده است. امروزه رشد و تکاملی که در ابزارهای مدلسازی عددی رخ داده، مدلسازی شرایط بسیار پیچیده را ممکن ساخته‌است. البته این نوع مطالعه نیز نیازمند برداشت‌های دقیق صحرایی است، چرا که مطالعات عددی برای ارائه‌ی نتایج دقیق، نیازمند داده‌های ورودی بسیار دقیق می‌باشد. در دهه‌های اخیر این مطالعات همراه با ارائه‌ی مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری تونل بوده که در ادامه به شرح مفصل آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۳-۲- پارامترهای ماده‌سنگ

برای تشخیص رفتار سنگ در مورد حفریزیری، تعدادی پارامتر مربوط به ماده سنگ وجود دارد. از برخی از این پارامترها به عنوان عامل معرف یاد می‌شود. فرآیند خردایش سنگ بالغ بر چهل سال است که توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. هر یک از این محققان با بررسی فرآیند برش سنگ

توسط برش‌دهنده‌ی دیسکی، پارامتری از سنگ را به عنوان عامل تأثیر گذار بر خردایش سنگ معرفی کرده و میزان اهمیت آن را ارائه داده است. راکسبرو^۱ و فیلیپس^۲ (۱۹۷۵) با بررسی خردایش سنگ توسط برش‌دهنده‌ی دیسکی اظهار داشتند که نفوذ دیسک در سنگ زمانی ممکن می‌شود که نیروی- اعمال‌شده بر دیسک، بیشتر از مقاومت فشاری تک محوری شود (Roxborough & Phillips 1975). همچنین لیندکوئیست^۳ و لای^۴ (۱۹۸۳) نشان دادند، که سنگ در اثر فشار اولیه‌ی برش‌دهنده، خردشده و هنگامی که سطح فشار به اندازه‌ی کافی از مقاومت برشی و کششی سنگ بیشتر شد ترک‌های جدید گسترش می‌یابند (Lindqvist & Lai, 1983). گهرینگ^۵ (۱۹۹۷) نیز نشان داد که تشکیل یک زون خردشده به طور کلی به مقاومت فشاری تک محوری سنگ بستگی دارد درحالی‌که تشکیل یک تراشه از سنگ به مقاومت کششی وابسته است. بنابراین مقاومت کششی و مقاومت برشی، هر دو از ورودی‌های بسیار مهم در مدل‌های پیش‌بینی نفوذ هستند (Gehring, 1997). رستمی (۱۹۹۷) نیز طی مطالعه‌ای آزمایشگاهی و انجام برش‌های متعدد با دستگاه آزمون برش خطی اثر مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی غیر مستقیم را روی نیروهای وارد بر برش‌دهنده‌ی دیسکی بررسی کرد (Rostami, 1997). حسن‌پور و همکاران (۲۰۰۹) با مطالعه روی تونل انتقال آب کرج، عملکرد ماشین را در مقاومت- های فشاری تک محوری مختلف را بررسی کردند. همانطور که از نتایج در شکل ۳-۱ پیداست با افزایش مقاومت فشاری تک محوری، نرخ نفوذ ماشین کاهش یافته و میزان انرژی ویژه افزایش یافته است (Hassanpour et al., 2010). همچنین لابرا^۶ و همکاران (۲۰۱۲) با شبیه‌سازی عددی آزمون برش خطی به روش توأمان المان مجزا^۷ و المان محدود^۸ (DEM/FEM) اثر مقاومت‌های فشاری تک محوری

^۱ Roxborough

^۲ Phillips

^۳ Lindqvist

^۴ Lai

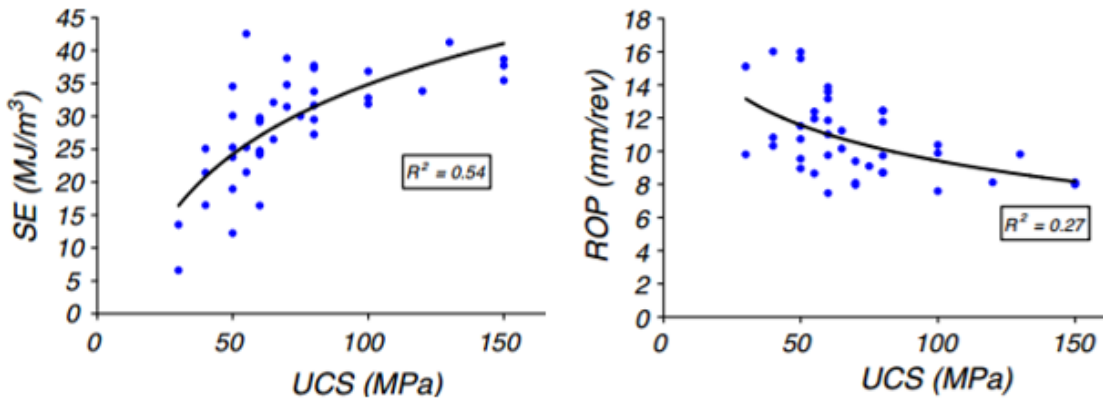
^۵ Gehring

^۶ Labra

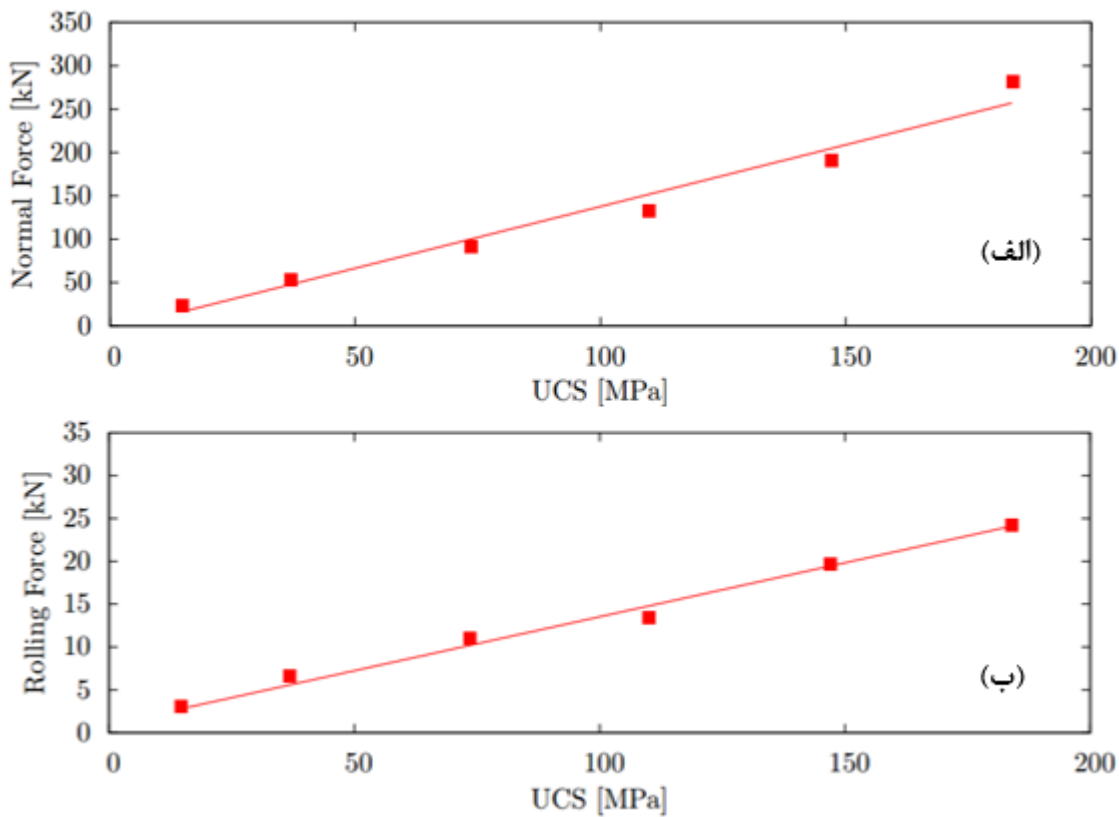
^۷ Discrete Element Method

^۸ Finite Element Method

مختلف بر نیروی قائم و غلتشی وارد بر دیسک را بررسی کردند. همان‌طور در شکل ۳-۲ مشاهده می‌شود، افزایش مقاومت فشاری تک محوری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نیروی قائم و غلتشی وارد بر دیسک دارد (Labra et al., 2012)



شکل ۳-۱: ارتباط مقاومت فشاری تک محوری سنگ با دو پارامتر عملکردی نرخ نفوذ (سمت راست) و انرژی ویژه (سمت چپ) (Hassanpour et al., 2010)



شکل ۳-۲: ارتباط مقاومت فشاری تک محوری با نیروی قائم (الف) و نیروی غلتشی (ب) وارد بر برش-دهنده‌ی دیسکی (Labra et al., 2012)

قابل توجه است که علاوه بر دو پارامتر مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی، شاخص نرخ حفاری (DRI)^۱ که توسط دانشگاه علم و فناوری نروژ ارائه شده است، انرژی حفاری مورد نیاز برای انواع مشخص سنگ را شرح می‌دهد. شاخص نرخ حفاری ترکیبی از مقدار تردی (S₂₀) (بیان‌کننده‌ی مقدار انرژی مورد نیاز برای خردشدن سنگ) و مقدار S_r (بیانگر میزان نفوذ برش‌دهنده در سنگ) می‌باشد. این شاخص تاکنون برای بسیاری از سنگ‌ها ارائه شده است (Bruland, 2000). دیگر پارامتر ماده‌سنگ، تردی^۲ است که در چندین مدل پیش‌بینی بکار گرفته شده است. آلتینداگ^۳ (۲۰۰۳) با مطالعات خود بر روی روابط مختلف شکنندگی و ارتباط آن‌ها با انرژی ویژه، رابطه‌ی (۱-۳) را به عنوان بهترین معرف شکنندگی ارائه داد (Altindag, 2003).

$$B = \frac{\sigma_c \cdot \sigma_t}{2} \quad (1-3)$$

که در این رابطه B شکنندگی، σ_c مقاومت فشاری و σ_t مقاومت کششی غیرمستقیم می‌باشد. همچنین یاگیز (۲۰۰۲) در مطالعات خود با ارائه‌ی تعریفی از شاخص تردی (رابطه‌ی ۲-۳) ارتباط میان تردی سنگ و نرخ نفوذ ماشین در تونل کوئینز^۴ نیویورک را مورد بررسی قرار داد. این ارتباط در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.

$$BI = 0.0157 \cdot PSI \quad (2-3)$$

که در این رابطه BI شاخص تردی و PSI^۵ شاخص شیب منحنی در بار حداکثر در آزمون نفوذ پانچ می‌باشد (Yagiz, 2002).

البته لازم به ذکر است علاوه بر پارمترهایی که شرح داده شد، عملکرد ماشین حفاری می‌تواند از جنبه‌ی سایش دیسک، به خواص کانی شناسی، بافت و اندازه‌ی دانه‌های تشکیل دهنده‌ی سنگ نیز وابسته باشد که در این زمینه نیز مطالعاتی صورت گرفته است که ذکر آن در این تحقیق ضروری نیست.

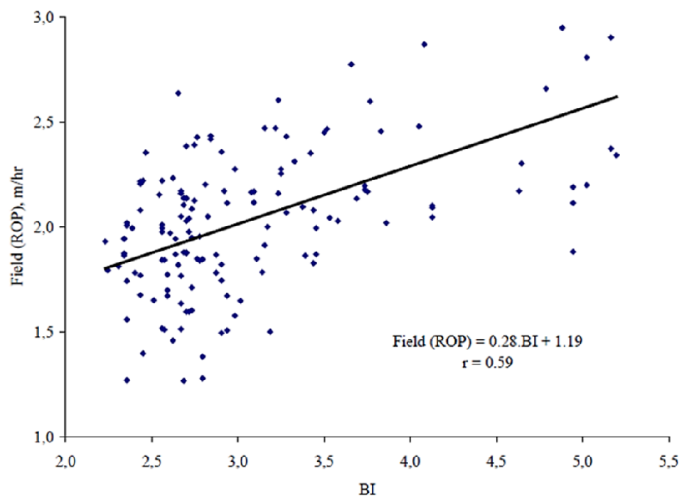
^۱ Drilling Rate Index

^۲ Brittleness

^۳ Altindag

^۴ Queens

^۵ Peak Slope Index



شکل ۳-۳: ارتباط میان شاخص تردی و نرخ نفوذ واقعی در تونل کوئینز (Yagiz, 2002)

۳-۳- پارامترهای توده‌سنگ

علاوه بر خواص سنگ، خصوصیات توده‌سنگ نیز از عوامل تأثیرگذار بر نفوذ یک ماشین حفاری تمام مقطع است. خصوصیات سنگ که در تحقیقات اولیه در زمینه‌ی عملکرد ماشین حفاری نادیده گرفته شده در مطالعات اخیر بسیار حائز اهمیت است. خواص توده‌سنگ به شدت به خصوصیات هندسی و مقاومتی ناپیوستگی‌ها، وابسته است. البته علاوه بر ناپیوستگی‌ها میدان تنش و جریان آب درون توده-سنگ نیز عملکرد ماشین حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هرچند این پارامترها هنوز به طور مناسب بررسی نشده است. بنابراین در اکثر مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری، ملحوظ نشده‌اند (Wilfing, 2016).

ناپیوستگی‌ها دارای خواص مختلفی از جمله فاصله‌داری، جهت‌داری، باز شدگی، امتدادیافتگی، زبری و ... می‌باشند. اما در مجموع دو پارامتر فاصله‌داری و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها از مهم‌ترین عوامل موثر بر عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع هستند. هوارث^۱ (۱۹۸۱) از مطالعه‌ی خود در این زمینه نتیجه گرفت. میزان فاصله‌داری درزه‌ها تا یک حد معینی می‌تواند اثر مطلوبی بر عملکرد روزانه‌ی دستگاه داشته باشد (Howarth, 1981). هوارث (۱۹۸۲) همچنین با انجام آزمایش برش روی نمونه‌ی سنگی با

^۱ Howarth

تک درزه‌ی مصنوعی نشان داد، نیروی مورد نیاز جهت حفاری در سنگ درزه‌دار ۵۰ درصد نیروی مورد نیاز برای حفاری در سنگ بدون درزه و شکاف می‌باشد (Howarth, 1982). بوچی^۱ (۱۹۸۴) مقدار فاصله‌داری ۱۰ سانتی‌متر را به عنوان فاصله‌داری بحرانی معرفی کرد. کمتر از فاصله‌داری بحرانی، عملیات حفاری دچار هدررفت انرژی می‌شود و در بیشتر از این مقدار عدم تشکیل تراشه به وجود می‌آید (Buchi, 1984). درحالی‌که گهرینگ (۱۹۹۷) بالاترین نرخ نفوذ را در فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر مشاهده کرد (Gehring, 1997). هرچند تحقیقات نشان می‌دهند که اثر فاصله‌داری تا حد زیادی به نوع سنگ وابسته است (Poisel, 2010). بارتن^۲ (۲۰۰۰) نیز با انجام مطالعات روی پروژه‌های مختلف، در مورد فاصله‌داری درزه‌ها چنین بیان می‌کند: "وقتی فاصله‌داری درزه‌ها به فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها می‌رسد، نرخ نفوذ، دو تا سه برابر افزایش می‌یابد" (Barton, 2000). البته مجموع تحقیقاتی که روی جهت‌داری انجام شده است، بیانگر این موضوع است که جهت‌داری درزه‌ها نسبت به فاصله‌داری آن‌ها اثر بیشتری بر نرخ نفوذ دارد. بهترین عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع زمانی رخ می‌دهد که جهت‌داری درزه‌ها با محور تونل ۶۰ درجه باشد، در حالی‌که درزه‌های موازی با محور تونل کمترین نرخ نفوذ را سبب می‌شود. (Bruland, 1979; Sanio, 1983; Gong, 2005; Wanner & Abreli, 2000).

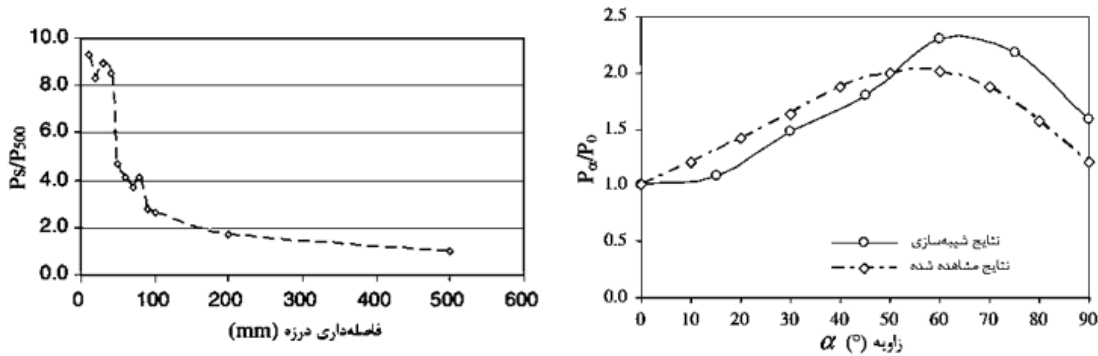
گانگ^۳ و همکاران (۲۰۰۵ و ۲۰۰۶) اثر جهت‌داری و فاصله‌داری درزه‌ها بر فرآیند برش سنگ با تیغه‌های دیسکی را به روش المان مجزا با استفاده از نرم افزار UDEC مورد بررسی قرار دادند که نتایج این دو تحقیق در شکل ۳-۴ ارائه شده است. در این شکل، نمودار سمت راست بیانگر اثر جهت‌داری است. همچنین α زاویه‌ی درزه‌ها با محور تونل و P_α/P_0 نسبت نفوذ در زوایای مختلف به نفوذ در زاویه‌ی صفر می‌باشد. این نمودار نشان می‌دهد بیشترین نفوذ در زاویه‌ی ۶۰ درجه‌ی درزه‌ها با محور تونل حاصل می‌شود. نمودار سمت راست نیز بیانگر اثر فاصله‌داری درزه‌ها بر نفوذ است که در آن

^۱ Buchi

^۲ Barton

^۳ Gong

نسبت نفوذ در فاصله‌داری‌های مختلف به نفوذ در بیشترین فاصله‌داری (۵۰۰ میلی‌متر) می‌باشد. این نمودار نشان می‌دهد با افزایش فاصله‌داری بین درزه‌ها، نفوذ کاهش می‌یابد (Gong et al., 2005; Gong et al., 2006).



شکل ۳-۴: نتایج اثر جهت‌داری در سمت راست بر نفوذ (Gong et al., 2006) و اثر فاصله‌داری بر نفوذ در شکل سمت چپ (Gong et al., 2005)

هونگسو (۲۰۱۳) در یک تحقیق آزمایشگاهی با انجام آزمون برش خطی روی یک نمونه‌ی مصنوعی درزه‌دار، فاصله‌داری ۵ تا ۸ سانتی‌متر را به عنوان فاصله‌داری مطلوب درزه معرفی کرد. همچنین نشان داد اثر فاصله‌داری درزه بر نفوذ در سنگ‌هایی با مقاومت بالا بسیار بیشتر از سنگ‌هایی با مقاومت پایین است (Hongtsue, 2013). چوی^۱ (۲۰۱۶) نیز طی یک مطالعه عددی به روش المان مجزا با استفاده از کد جریان ذرات دو بعدی (PFC^{2D}) توان برش‌دهندگی دیسک را برای یک نمونه‌ی درزه‌دار در جهت-داری و فاصله‌داری‌های مختلف بررسی کرده و نتایجی کیفی ارائه داد (Choi et al., 2016). این نتایج بیانگر افزایش توان برش‌دهندگی با افزایش فاصله‌داری است. همچنین بهترین توان برشی در این تحقیق در زاویه ۶۰ درجه درزه‌ها نسبت به راستای حرکت دیسک به دست آمده است.

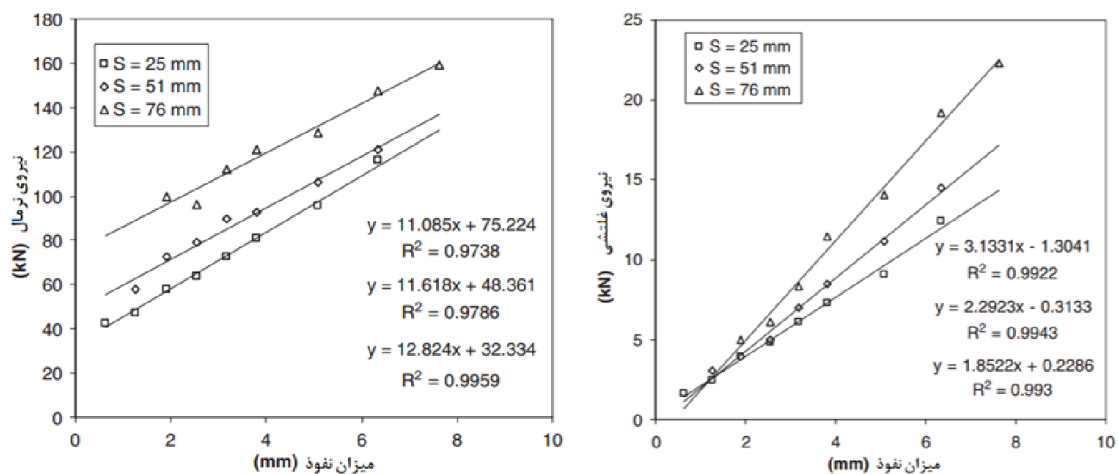
۳-۴- پارامترهای ماشین

از دیگر پارامترهایی که نقش قابل توجهی در عملکرد ماشین دارند، پارامترهای عملیاتی ماشین، نظیر نیروی رانش، گشتاور، توان و دور دستگاه و پارامترهای طراحی نظیر تعداد، قطر، پهنای لبه،

^۱ Choi

زاویه‌ی لبه و نوع برش‌دهنده‌ها و فاصله‌ی میان آن‌ها می‌باشد. در این حوزه نیز تاکنون تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از مهمترین آن‌ها اشاره خواهد شد.

راکسبرو و فیلیپس (۱۹۷۵) با تحقیق روی پارامترهای هندسی دیسک و برش اثر قطر، زاویه‌ی لبه، میزان نفوذ و فاصله‌داری دیسک را بر انرژی ویژه مورد بررسی قرار دادند (Roxborough & Phillips 1975). چانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۶) با انجام آزمون برش خطی روی سنگ گرانیت هوانگ دونگ اثر فاصله‌داری و عمق نفوذ دیسک‌ها را بر انرژی ویژه مورد مطالعه قرار دادند. نقطه قوت این تحقیق محاسبه‌ی حجم کنده شده‌ی سنگ توسط فناوری فتوگرامتریک^۲ است که موجب محاسبه‌ی دقیق انرژی ویژه می‌شود (Chang et al., 2006). گرچ^۳ و همکاران (۲۰۰۷) نیز طی تحقیقی مشابه با انجام آزمون برش خطی روی گرانیت قرمز کلورادو اثر فاصله‌داری دیسک‌ها و عمق نفوذ را بر نیروی قائم و غلتشی وارد بر دیسک بررسی کردند که نتایج آن در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود. براساس این نتایج با افزایش فاصله‌داری و عمق نفوذ نیروی قائم و غلتشی وارد بر دیسک افزایش می‌یابد. البته همانطور که در تصویر سمت راست از شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود، در عمق نفوذهای کم میزان نیروی غلتشی در فاصله‌داری‌های مختلف تقریباً یکسان است (Gertsch et al., 2007).



شکل ۳-۵: اثر فاصله‌داری و نفوذ روی نیروی قائم (سمت چپ) و غلتشی (سمت راست) (Gertsch et al., 2007)

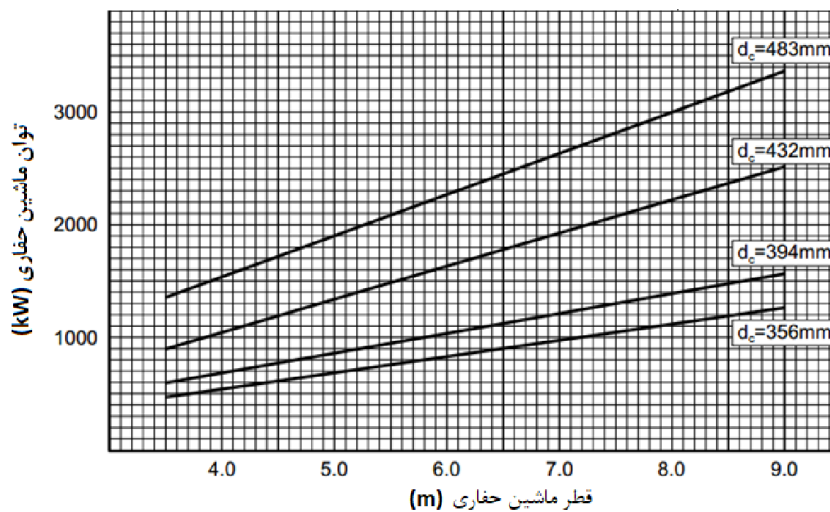
^۱ Chang

^۲ Photogrammetric technology

^۳ Gertsch

(2007)

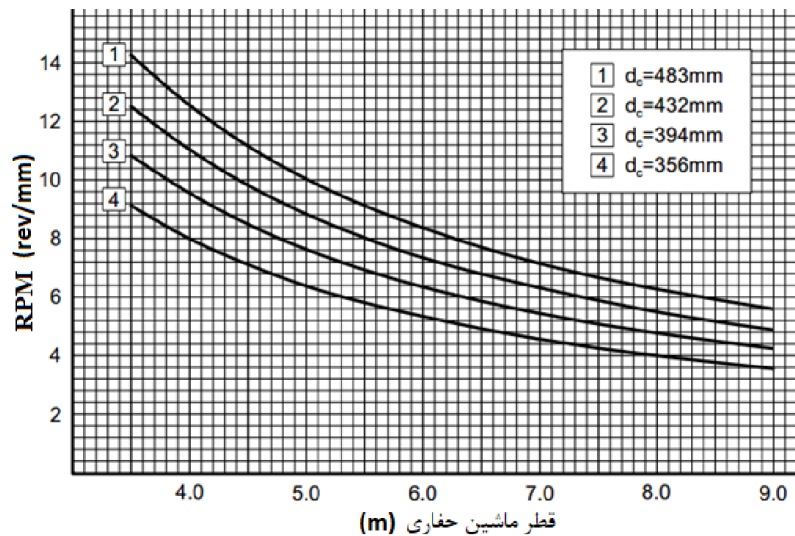
برولند^۱ (۲۰۰۰) با مطالعه روی پارامترهای عملیاتی ماشین، ارتباط توان و دور ماشین حفاری با قطر ماشین را در استفاده از برش‌دهنده‌هایی با اندازه‌های مختلف، مورد بررسی قرار داد که نتایج آن در شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷ مشاهده می‌شود (Bruland, 2000). اما طی مطالعات عددی انجام شده در این زمینه چو^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از نرم‌افزار المان محدود AUTODYN^{3D} برش سنگ را شبیه‌سازی کرده و ارتباط پارامترهای هندسی برش را با انرژی ویژه بررسی کردند (Cho et al., 2008). چوی و همکاران (۲۰۱۵) نیز با حفظ پارامترهای استفاده شده در مطالعه‌ی چو، برش سنگ را به روش عددی المان مجزا و با استفاده از نرم‌افزار PFC^{3D}، شبیه‌سازی کرده و نتایج حاصل را با مطالعات قبلی مقایسه کردند (Choi et al., 2015). در شکل ۳-۸ ارتباط نسبت فاصله‌داری به نفوذ (S/P) با انرژی ویژه در حالت مطالعه‌ی آزمایشگاهی، مطالعه‌ی عددی به روش المان محدود و مطالعه‌ی عددی به روش المان مجزا دیده می‌شود.



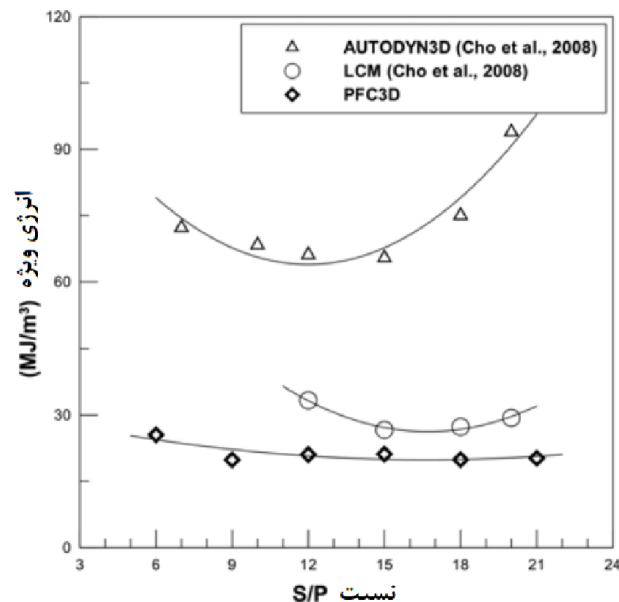
شکل ۳-۶: ارتباط توان ماشین حفاری با قطر ماشین (d_c قطر دیسک برش‌دهنده است). (Bruland, 2000)

^۱ Bruland

^۲ Cho



شکل ۳-۷: ارتباط دور ماشین حفاری با قطر ماشین (dC قطر دیسک برش دهنده است). (Bruland, 2000)



شکل ۳-۸: ارتباط نسبت فاصله‌داری به نفوذ (S/P) با انرژی ویژه (Choi et al., 2013)

۳-۵- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری

طی ۴۰ سال گذشته، مدل‌های بسیاری برای پیش‌بینی سرعت حفاری ماشین حفاری تمام مقطع توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها به دو دسته‌ی مهم نظری و تجربی تقسیم می‌شوند. مدل‌های نظری با توجه به فرآیند خردایش سنگ و بر اساس معادلات تعادل نیرو و انرژی حین برش و با بهره‌گیری از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی توسعه یافته‌اند. مهم‌ترین ضعف این مدل‌ها عدم دخالت پارامترهای توده‌سنگ نظیر وضعیت درزه‌داری می‌باشد. اما مدل‌های تجربی با بررسی همبستگی میان شرایط زمین‌شناسی با

پارامترهای عملکرد واقعی ماشین در پروژه‌های مختلف پیشنهاد شده‌اند. عیب اساسی در مدل‌های تجربی این است که رشد فن آوری و ارائه‌ی ماشین‌هایی با قابلیت متفاوت، استفاده از این روش‌ها را محدود می‌سازد. همچنین استفاده از مدل‌های تجربی، محدود به بانک اطلاعاتی اولیه‌ی جهت ارائه‌ی مدل مورد نظر بوده و در شرایط زمین‌شناسی متفاوت با خطاهایی زیادی همراه است. برخی از این مدل‌ها تنها براساس یک پارامتر آزمایشگاهی مربوط به ماده‌سنگ بنا شده‌اند درحالی‌که برخی دیگر کامل‌تر بوده و در توسعه‌ی آن‌ها علاوه بر خصوصیات ماده‌سنگ، پارامترهای توده سنگ و شرایط درزه-داری نیز دخیل است. در جدول ۱-۳ برخی از مدل‌های رایج ارائه شده، به صورت خلاصه آورده شده است.

جدول ۱-۳: تعدادی از مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM

پارامترهای ورودی		پارامترهای خروجی	مدل
ماشین	سنگ		
نیروی دیسک و RPM	مقاومت فشاری تک محوری	ROP (mm/rev)	۱۹۷۶ گراهام ^۱
نیروی دیسک	مقاومت کششی	PR (m/h)	۱۹۸۰ فارمر ^۲ و گلوپ ^۳
-	طبقه‌بندی سنگ RSR	PR (m/h)	۱۹۸۲ کاسینلی ^۴ و همکاران
نیروی رانش	سختی چکش اشمیت، اندیس نفوذ مخروط، زاویه‌ی اصطکاک داخلی	PR (m/h)	۱۹۸۴ بامفورد ^۵
شعاع دیسک، نیروی دیسک، فاصله‌داری دیسک ها، قطر TBM، RPM	مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، ضریب تصحیح ناهمسانگردی سنگ، پهنای درزه، محتوای میکا	AR و PR (m/h) (m/h)	۱۹۸۴ بوچی

^۱ Graham

^۲ Farmer

^۳ Glossop

^۴ Cassinelli

^۵ Bamford

نیروی دیسک، قطر دیسک و F_N	مقاومت فشاری تک محوری	PR (m/h)	۱۹۸۶	هیوز ^۱
-	طبقه‌بندی سنگ RSR و مقاومت فشاری تک محوری	PR (m/h)	۱۹۹۱	ایناراتو ^۲ و همکاران
شعاع دیسک، پهنای نوک دیسک، فاصله‌داری دیسک ها، قطر TBM، RPM	مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلی	AR و PR (m/h) (m/h)	۱۹۹۳	رستمی و ازدمیر CSM
نیروی دیسک، فاصله‌داری دیسک ها، اندازه و شکل دیسک، قدرت پیشانی حفار RPM،	طبقه‌بندی سنگ RMI	PR (m/h)	۱۹۹۵	پالمستروم ^۳
نیروی دیسک (F_N)	مقاومت فشاری تک محوری و فاکتور تصحیح درزه	ROP (mm/rev)	۱۹۹۷	گهرینگ
نیروی دیسک، فاصله‌داری دیسک ها، اندازه و شکل دیسک، قدرت پیشانی حفار RPM،	مقاومت فشاری تک محوری، شاخص نرخ حفاری، درزه داری و تخلخل	PR (m/h), AR (m/h)	۲۰۰۰	برولند NTNU
نیروی دیسک	پارامتر های مقدار Q، مقاومت توده سنگ، محتوای کوارتز، CLI ^۴ و تنش دومحوره در سطح جبهه کار	PR (m/h), AR (m/h)	۲۰۰۰	بارتن Q _{TBM}
نیروهای دیسک	متوسط فاصله‌داری (JS)	ROP(mm/rev)	۲۰۰۵	رمضان‌زاده
قطر TBM، تراست کلی پیشانی حفار، RPM و گشتاور	مقاومت فشاری تک محوری، Abrasivity، درزه داری توده سنگ، Stand-up time، جریان آب	PR (m/h), AR (m/h), SE (KJ/m ³)	۲۰۰۸	بنیاویسکی ^۵ RME
نیروی دیسک	تعداد حجمی درزه، زاویه‌ی درزه‌ها، مقاومت فشاری تک محوری و شاخص شکنندگی	BI ^۶ (KN/mm/rev)	۲۰۰۹	گانگ و ژائو BI

^۱ Hughes

^۲ Innaurato

^۳ Palmstrom

^۴ Cutter Life Index

^۵ Bieniawski

^۶ Boreability Index

نیروی دیسک و RPM	مقاومت فشاری تک محوری و RQD	FPI (KN/mm/rev)	۲۰۰۹	حسن پور و همکاران
نیروی دیسک و RPM	مقاومت فشاری تک محوری، RQD، وضعیت درزه داری و زاویه‌ی درزه‌ها با محور تونل	FPI (KN/mm/rev)	۲۰۱۰	خادمی و همکاران
F_N	UCS, GSI	PR (mm/rev)	۲۰۱۵	بناتو ^۱ و اورست ^۲

^۱ Benato

^۲ Oreste

۳-۶- جمع بندی

در این فصل پارامترهای موثر بر عملکرد ماشین حفاری سنگ سخت به اجمال مورد بررسی قرار گرفت. این عوامل به طور کلی شامل عوامل عملیاتی شامل پارامترهای ماشین و پارامترهای ژئومکانیکی شامل پارامترهای ماده سنگ و ویژگی‌های توده سنگ یا همان خصوصیات ناپیوستگی‌ها می‌باشند. با توجه به مطالعات صورت گرفته در خصوص این پارامترها، مدل‌های متنوع پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفاری تمام مقطع گوناگونی ارائه شده که به تعدادی از مهمترین آن‌ها در این فصل اشاره شد. با توجه به مطالب ارائه شده و همچنین مدل‌های پیش‌بینی ارائه شده روشن است که تمرکز این مطالعات بیشتر بر تأثیر خصوصیات ماده سنگ و پارامترهای عملیاتی ماشین بوده و کمتر به تأثیر خصوصیات ناپیوستگی‌ها بر عملکرد ماشین حفاری پرداخته شده است. البته یکی از مهمترین دلایل این موضوع، دسترسی دشوار به پارامترهای درزه در حین عملیات حفاری تونل و همچنین دشواری مطالعه‌ی این عامل به صورت آزمایشگاهی می‌باشد. لذا در تحقیق حاضر به بررسی عملکرد برش با استفاده از مطالعه‌ی عددی با تمرکز بر خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها و تأثیر آن‌ها بر خردایش سنگ توسط ابزار برش دیسکی پرداخته خواهد شد که روند آن در فصل‌های بعدی ارائه شده است.

مدلسازی عددی خردایش سنگ بکر

در برخورد با مسائل مهندسی روش‌های مختلفی برای تحلیل و بررسی مسئله وجود دارد. این روش‌ها شامل تحقیقات تجربی، تحلیل فیزیکی و آزمایشگاهی، روش‌های تحلیلی و محاسباتی و روش‌های عددی می‌باشند. تحلیل عددی جدیدترین روش تحلیل نسبت به دیگر روش‌هاست. همانطور که در فصل قبل ذکر شد در زمینه‌ی فرآیند شکست تحقیقات زیادی به روش‌های مختلف صورت گرفته است. وجود محدودیت‌هایی نظیر بررسی اثر شکستگی‌ها، هزینه‌های زیاد روش‌های آزمایشگاهی و مطالعات برجا و همچنین اهمیت زمان، محققان را به سمت استفاده از تحلیل عددی سوق داده است. تحلیل عددی با توجه به نوع محیط از نظر پیوستگی روش‌های مختلفی دارد. به طور معمول از روش‌های المان محدود (FEM)^۱ و تفاضل محدود (FDM)^۲ برای تحلیل محیط‌های پیوسته و از روش المان مجزا (DEM)^۳ جهت تحلیل محیط‌های ناپیوسته استفاده می‌شود. علاوه بر این، روش المان مجزا به صورت تحلیل مکانیکی ذرات، بهترین و مناسب‌ترین روش برای تحلیل فرآیندهایی است که همراه با خردایش و پودر کردن مواد می‌باشند. امروزه این روش در قالب مجموعه نرم‌افزارهای DEMPack ساخت شرکت سیماین^۴ و یا نرم افزار کد جریان ذرات (PFC)^۵ ساخت شرکت آیتسکا^۶ قابل استفاده‌اند.

فرآیند خردایش در سنگ سخت درزه‌دار توسط دیسک‌های برش‌دهنده با تولید و گسترش ترک میان دیسک‌ها و تولید تراشه محقق می‌شود. در این روش وجود درزه نیز به طور مستقیم بر این فرآیند اثرگذار است. از طرفی نرم‌افزار PFC دارای قابلیت شبیه‌سازی رشد ترک و همچنین توانایی مدل کردن تخریب تحت تأثیر تغییرات تنش و شرایط ناپیوستگی‌ها در حین فرآیند تحلیل می‌باشد. بنابراین در

^۱ Finite Element Method

^۲ Finite Difference Method

^۳ Discrete Element Method

^۴ CIMNE

^۵ Particle Flow Code

^۶ Itasca

این تحقیق از کد جریان ذرات (PFC) جهت شبیه‌سازی مکانیزم خردایش سنگ توسط دیسک برش-دهنده و بررسی اثر پارامترهای هندسی بر نیروهای عکس‌العمل وارده از سنگ به دیسک برش‌دهنده استفاده شده است.

۴-۲- کد جریان ذرات (PFC)

نرم‌افزار PFC یک کد عددی المان مجزا است که کاربردهای گوناگونی در تحلیل مسائل مهندسی دارد. این ابزار در علم ژئومکانیک جهت بررسی محیط‌های ناپیوسته و تحلیل شکستگی‌ها می‌تواند نقش بسزایی را ایفا کند.

PFC رفتار مکانیکی سنگ را با مونتاژ تعداد زیادی ذره‌ی صلب دیسکی شکل (در حالت دوبعدی) یا کروی شکل (در حالت سه‌بعدی) با پیوند آن‌ها به یکدیگر نشان می‌دهد. در این کد، جابجایی‌ها و نیروهای برهم‌کنش ذرات با استفاده از قانون دوم نیوتن (برای تعیین حرکت ذرات متحرک تحت نیروی وارد از جانب تماس‌ها) و قانون نیرو-جابجایی (برای تعیین نیروی وارد بر تماس‌ها ناشی از حرکت ذرات) محاسبه می‌شوند. تماس‌های ایجاد شده بین ذرات از مدل‌های گوناگونی پیروی می‌کنند. بهترین مدل جهت شبیه‌سازی سنگ، مدل پیوند موازی^۱ است. (Koyama & Jing, 2007)

۴-۲-۱- مدل پیوند ذرات (BPM)^۲

پوتیوندی^۳ و کاندال^۴ (۲۰۰۴) اذعان داشتند که سنگ مانند یک ماده‌ی متشکل از دانه‌های سیمانی شده رفتار می‌کند که در آن، هم بخش دانه‌ها و هم بخش سیمانی دچار تغییرشکل شده و حتی در صورت امکان دچار شکست می‌شود. بنابراین که یک مدل مفهومی می‌تواند به طور اصولی همه‌ی جنبه‌های رفتار مکانیکی آن را توضیح دهد. براساس این تعریف، مدل ذرات به هم پیوند شده برای

^۱ Parallel-bond contact model

^۲ Bonded Particle Model

^۳ Potyondy

^۴ Cundall

سنگ توسط این محققان تعریف شد (Potyondy & Cundall, 2004).

مدل اساسی ارتباطی ذرات در PFC مدل تماس خطی^۱ بین دو ذره است (شکل ۴-۱). در این مدل

میزان نیرو و جابجایی‌ها براساس روابط ۴-۱ و ۴-۲ محاسبه می‌شود. (Koyama & Jing, 2007)

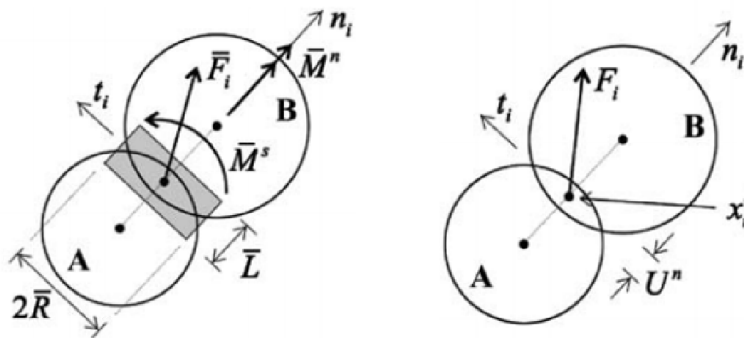
$$\begin{cases} F^n = K^n \cdot U^n \\ \Delta F^s = -K^s \cdot \Delta U^s \end{cases} \quad \text{معادله (۴-۱)}$$

$$F^s \leq \mu \cdot F^n \quad \text{معادله (۴-۲)}$$

در این روابط F^n و ΔF^s مولفه‌ی نیروی قائم، تغییرات نیروی برشی، U^n و ΔU^s مقدار همپوشانی

تماس ذرات و جابجایی برشی، K^n و K^s به ترتیب سختی قائم و سختی برشی تماس و μ مقدار ضریب

اصطکاک می‌باشد.



شکل ۴-۱: تصویر شماتیک از تماس خطی بین ذرات (راست) و پیوند سیمانی بین ذرات (چپ)

اما به طور کلی مدل تماسی خطی تنها قادر به پوشش حرکت نسبی ذرات به طور مستقل بوده و

قادر به محاسبه‌ی حرکات چرخشی و گشتاور نیست اما زمانی که گروهی از ذرات متصل مدنظر باشند،

برای شبیه‌سازی نیاز به تماس‌های سیمانی و محاسبه‌ی گشتاور می‌باشد. در چنین مدل ارتباطی تغییر

کمیت‌ها با روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{cases} \Delta \bar{F}^n = \bar{K}^n \cdot A \cdot \Delta U^s \\ \Delta \bar{F}^s = \bar{K}^s \cdot A \cdot \Delta U^s \end{cases} \quad \text{معادله‌ی (۴-۳)}$$

^۱ Linear Contact Model

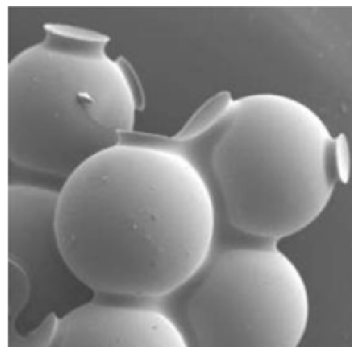
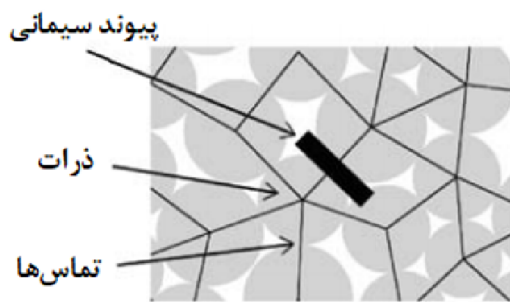
$$\begin{cases} \Delta \bar{M}^n = \bar{K}^s \cdot J \cdot \Delta \theta^n \\ \Delta \bar{M}^s = \bar{K}^n \cdot I \cdot \Delta \theta^s \end{cases} \quad \text{معادله‌ی (۴-۴)}$$

در این روابط \bar{M}^n و \bar{M}^s به ترتیب مولفه‌های نیرو و ممان نسبت به مرکز زون سیمانی شده‌اند. \bar{K}^s و \bar{K}^n نیز سختی قائم و سختی برش مقطع پیوند سیمانی شده هستند. $\Delta \theta^s$ و $\Delta \theta^n$ زوایای چرخش، A سطح مقطع سیمانی شده، I ممان اینرسی و J ممان قطبی مربوط به پیوند سیمانی می‌باشند. مقاومت این پیوند نیز بر اساس روابط ۴-۵ و ۴-۶ محاسبه می‌شود.

$$\bar{\sigma}^{max} = \frac{-\bar{F}^n}{A} + \frac{-|\bar{M}^s| \cdot \bar{R}}{I} < \bar{\sigma}_c \quad \text{معادله‌ی (۵-۴)}$$

$$\bar{\tau}^{max} = \frac{-\bar{F}^n}{A} + \frac{-|\bar{M}^n| \cdot \bar{R}}{J} < \bar{\tau}_c \quad \text{معادله‌ی (۶-۴)}$$

در اینجا \bar{R} شعاع زون سیمانی، $\bar{\sigma}_c$ مقاومت کششی و $\bar{\tau}_c$ مقاومت برشی پیوند سیمانی می‌باشد. به طور کلی در نرم‌افزار PFC پیوند سیمانی که روابط ۴-۴ تا ۴-۶ به آن اختصاص دارد مدل پیوند موازی نامیده می‌شود. (شکل ۲-۴)



شکل ۲-۴: نمایی از برقراری پیوند موازی بین ذرات (Itasca Consulting Group, Inc.)

۴-۳- مدل‌سازی برش در سنگ بکر

برای اطمینان از درستی کارکرد مدل عددی در این مطالعه ابتدا نیاز به ساخت یک مدل مرجع می‌باشد. با توجه به این موضوع که امکان بررسی درزه تحت برش توسط دیسک در آزمایشگاه وجود ندارد در این تحقیق ابتدا یک مدل اولیه با نمونه‌ی سنگ بکر مشابه با شرایط آزمایشگاهی آزمون برش

خطی انجام شده روی نمونه‌ی گرانیات قرمز توسط دیسک برش‌دهنده با قطر $43/2$ سانتی‌متر در مدرسه-
ی معدن کلورادو انجام شد (Gerstch et al., 2007).

۴-۳-۱- تعیین ابعاد حجم اولیه‌ی معرف^۱ برای شبیه‌سازی آزمون‌ها

در مدلسازی عددی المان مجزا به روش تحلیل مکانیک ذرات، سه مسئله مهم وجود دارد:

۱- چگونگی تعیین خواص ذرات و تماس‌ها در مقیاس میکرو

۲- تعیین ابعاد مدل جهت ایجاد یک مدل قابل اعتماد

۳- تعیین ابعاد ذرات تشکیل‌دهنده‌ی مدل

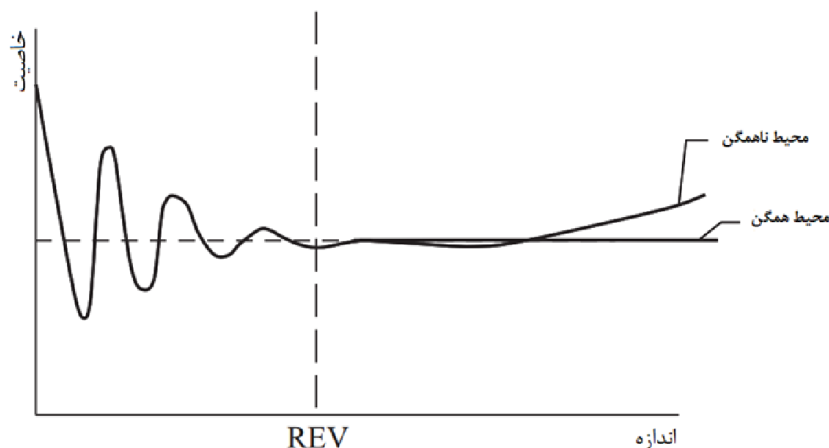
در واقع موارد ۲ و ۳، زیرمجموعه‌ای از مسئله‌ی اساسی تعیین خواص میکرو هستند زیرا اندازه‌گیری خواص میکرو سنگ در آزمایشگاه غیرممکن است. لذا با توجه به وجود این چالش‌ها، قبل از هر چیز ابعاد مدل و ذرات و همچنین ابعاد آزمون‌ها جهت شبیه‌سازی تعیین می‌شوند.

دو مسئله‌ی ابعاد مدل و اندازه‌ی ذرات به هم وابسته‌اند و هیچ استاندارد برای پذیرش درستی اندازه‌ی این دو پارامتر در مدلسازی وجود ندارد. در کاربردهای متفاوت روش مکانیک ذرات، اندازه‌ی ذرات و ابعاد مدل نه براساس ویژگی‌های واقعی بلکه از روی نیازهای مهندسی و محدودیت‌های کامپیوتری تعیین می‌شوند. با وجود این مسائل محققان جهت غلبه بر مشکل راه حل تعیین ابعاد حجم المان معرف (REV) را ارائه داده‌اند. یک بعد REV به عنوان کوچکترین بعد مدل که با افزایش آن خواص مکانیکی مدل تغییر نکند، تعریف می‌شود که مفهوم آن در شکل ۴-۳ نیز نمایان است (Koyama & Jing, 2007).

در تحقیق حاضر با توجه به حساسیت مدل در برش، ابعاد ذرات می‌بایست به گونه‌ای انتخاب شوند که در پهنای دیسک برش‌دهنده که ۱۳ میلی‌متر است حداقل ۲ ذره که شامل یک تماس می‌باشد قرار گیرد. به بیان دیگر دیسک حداقل، تماس بین دو ذره را قطع کند. علاوه بر این، دقت نتایج نیز وابسته

^۱ Representative Elementary Volume

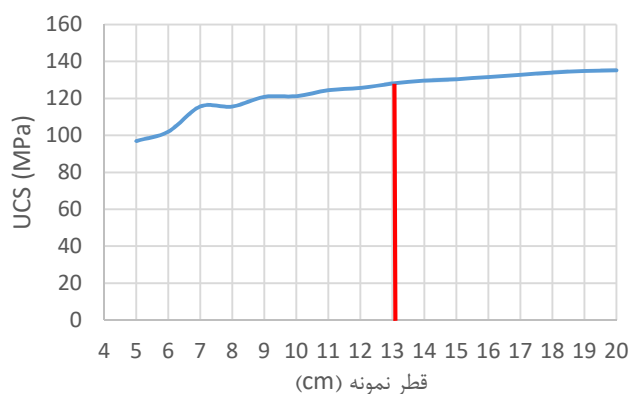
به افزایش تعداد ذرات در پهنه‌ی دیسک است. لذا با در نظرگیری این مسائل و همچنین مسئله‌ی اساسی محدودیت سخت‌افزاری کامپیوترهای مورد استفاده، حداقل شعاع ذره، ۲ میلی‌متر و حداکثر آن ۳ میلی‌متر انتخاب شد. در ادامه ابعاد REV نمونه‌های آزمایشگاهی جهت شبیه‌سازی تعیین شد.



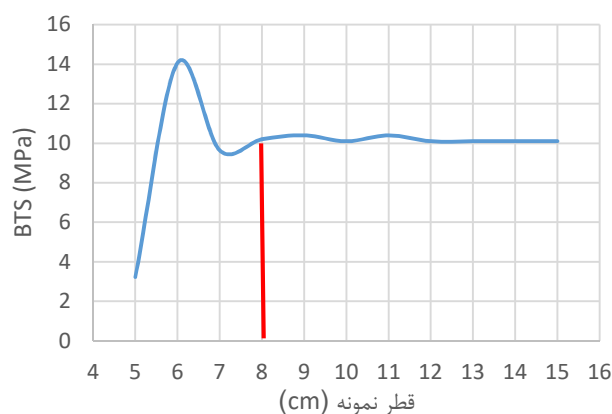
شکل ۴-۳: مفهوم REV (Koyama & Jing, 2007)

این آزمون‌ها شامل آزمون فشاری تک محوری و برزیلی می‌باشد که در بخش ۴-۳-۲ به جزئیات دقیق آن‌ها پرداخته خواهد شد. ابعاد آزمون سه محوری نیز با توجه به این که نتایج این آزمون به تغییر ابعاد نمونه حساس نیست مانند آزمون تک محوری در نظر گرفته می‌شود.

نتایج حاصل از آزمون‌های تک محوری و برزیلی در قطرهای مختلف نمونه در شکل ۴-۴ نشان می‌دهد که در آزمون تک محوره تا قطر ۱۳ سانتی‌متر مقاومت در حال افزایش است اما از این مقدار به بعد مقاومت نمونه با افزایش قطر تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد. در آزمون برزیلی نیز که نتایج آن در شکل ۴-۵ نمایان است از قطر ۸ سانتی‌متر به بعد مقاومت کششی نمونه کاملاً ثابت شده است. البته این مقادیر مقاومت تا این مرحله از تحقیق ارزش کمی نداشته و کمیت مورد نظر، تنها قطر نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۴-۴: تعیین ابعاد REV در آزمون فشاری تک محوری

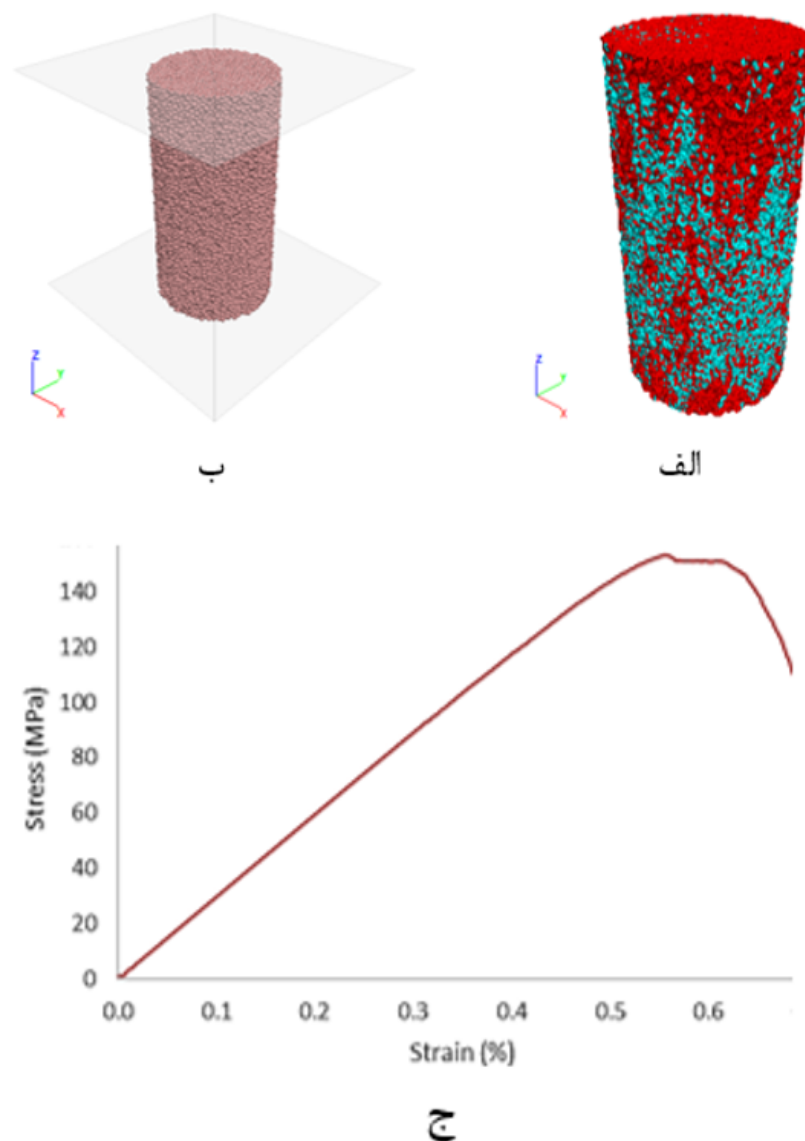


شکل ۴-۵: تعیین ابعاد REV در آزمون برزیلی (کشش غیرمستقیم)

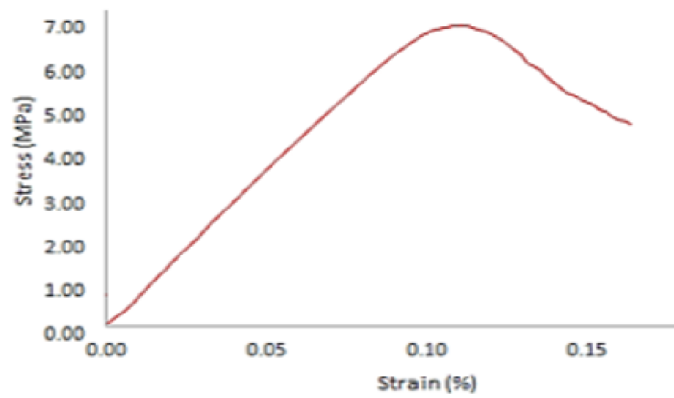
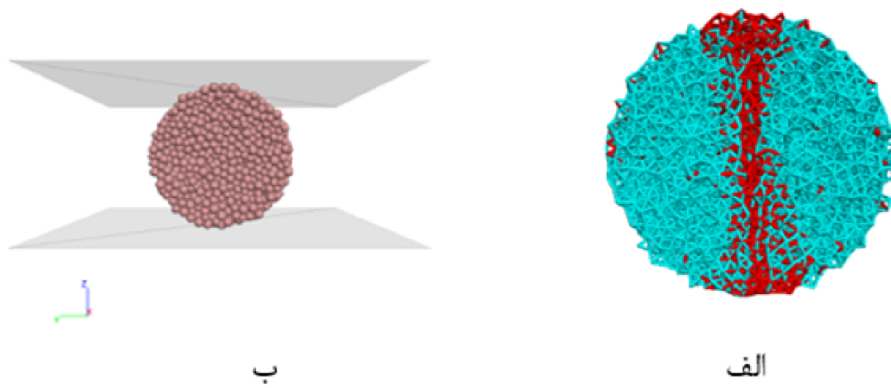
۴-۳-۲- کالیبراسیون خواص آزمایشگاهی

هنگامی که رفتار شکست سنگ با استفاده از مدل عددی مکانیک ذرات مانند کد جریان ذرات (PFC) مدلسازی می‌شود، لازم است خواص میکرو ذرات با توجه به خواص آزمایشگاهی موجود تعیین شوند. زیرا در مدل‌های ترکیب ذرات بین رفتار فیزیکی ذرات تکی و گروهی از ذرات تفاوت عمده‌ای وجود دارد. در این مدلسازی خواص ماکرو مهم سنگ، مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک محوره، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون می‌باشند. بنابراین خواص میکرو با شبیه‌سازی آزمایش‌های تراکمی تک محوری جهت اندازه‌گیری مقدار مقاومت تراکمی تک محوری (شکل ۴-۶)، کششی غیرمستقیم (برزیلی) جهت اندازه‌گیری مقدار مقاومت کششی (شکل ۴-۷) و مقاومت تراکمی سه محوره جهت اندازه‌گیری مقدار مدول الاستیسیته و ضریب پواسون (شکل ۴-۸) با توجه به خواص آزمایشگاهی سنگ

تعیین می‌شوند. در آزمون فشاری تک محوری و سه محوری نسبت ضخامت به قطر نمونه برابر با ۲ است. این مقدار در آزمون برزیلی برابر با ۰/۵ می‌باشد. جهت تعیین خواص میکرو از روش تحلیل معکوس با روش آزمون و خطا با توجه به مقادیر ماکرو موجود استفاده می‌شود. مدل تماسی بین ذرات از نوع پیوند موازی انتخاب شده است. مقادیر میکرو نهایی تماس موازی، تماس خطی اولیه و ذرات تشکیل‌دهنده‌ی مدل در جدول ۴-۱ مشاهده می‌شود، همچنین نتایج کالیبراسیون در جدول ۴-۲ آورده شده است.

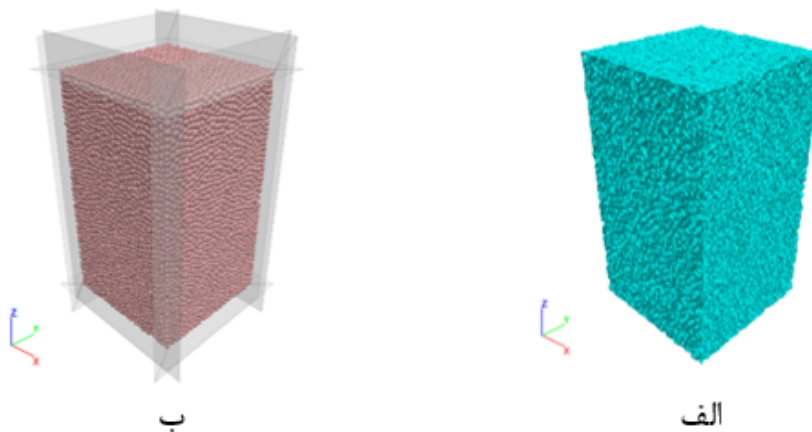


شکل ۴-۶: آزمون مقاومت فشاری تک محوره (الف) تماس بین ذرات و نحوه‌ی گسیختگی نمونه (ب) ذرات تشکیل‌دهنده‌ی نمونه (ج) نمودار تنش - کرنش



ج

شکل ۴-۷: آزمون مقاومت کششی برزیلی - الف) تماس بین ذرات و نحوه گسیختگی نمونه ب) ذرات تشکیل دهنده نمونه ج) نمودار تنش - کرنش



شکل ۴-۸: آزمون مقاومت تراکمی سه محوری - الف) تماس بین ذرات ب) ذرات تشکیل دهنده نمونه
در شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ رنگ قرمز نشان دهنده پیوندهای قطع شده یا به نوعی ایجاد شکستگی در سنگ تحت فشار فکها می باشد. همچنین در مدلسازی هر سه آزمون، برای شبیه سازی فکهای

اعمال کننده‌ی فشار از عنصر دیوار^۱ استفاده شده است. این عنصر کاملاً صلب بوده و هیچ نوع خاصیت مکانیکی برای آن تعریف نمی‌گردد

جدول ۴-۱: پارامترهای میکرو ذرات، پیوند خطی و پیوند موازی

مقدار	پارامترهای تماس موازی	مقدار	پارامترهای تماس خطی و ذرات
۷	Kn / Ks	۲۷۰۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۶۰	مدول یانگ (گیگاپاسکال) - \bar{E}_C	۷	Kn / Ks
۱۵	مقاومت کششی (مگاپاسکال) - $\bar{\sigma}_C$	۳۰	مدول یانگ (گیگاپاسکال) - E_C
۳۰	چسبندگی (مگاپاسکال) - \bar{c}	۰/۵۸	ضریب اصطکاک - μ
		۱/۵	R_{max} / R_{min}
		۰/۰۰۲	شعاع ریزترین ذره $R_{min} - (m)$

نسبت سختی قائم به سختی برشی و R_{max} / R_{min} نسبت شعاع بزرگترین ذره به کوچکترین ذره می‌باشد.

جدول ۴-۲: خواص ژئومکانیکی سنگ

PFC	مقدار آزمایشگاهی (Gertsch, 2007)	پارامتر
۱۵۰/۳	۱۵۸	UCS (مگاپاسکال)
۷/۲	۶/۷۵	BTS (مگاپاسکال)
*۴۱/۰۸	۴۱	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
۰/۲۲	۰/۲۳	نسبت پواسون
۲۷۰۰	۲۷۰۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۰/۱۲	۰/۱۰	تخلخل

*مدول یانگ بدست آمده در نرم افزار PFC با استفاده از شبیه سازی آزمون سه محوره بدست آمده است.

با توجه به اینکه در شبیه سازی آزمایش مقاومت تراکمی تک محوره (شکل ۴-۶) تنها به دست آوردن مقاومت تراکمی تک محوره مورد نظر بود، بخشی از میکروپارامترها ثابت در نظر گرفته شد و بخشی دیگر از میکروپارامترها بر اساس مقدار آزمایشگاهی مقاومت تراکمی تک محوره کالیبره شد. نکته قابل

^۱ Wall component

ذکر، عدم در نظر گرفتن شیب نمودار تنش- کرنش این آزمون به عنوان مقدار مدول یانگ است. کالیبراسیون سایر میکروپارامترها بر اساس مقدار مدول یانگ آزمایشگاهی در مرحله بعد از آن توسط شبیه‌سازی آزمایش مقاومت تراکمی سه محوره صورت گرفته است. بنابراین شیب نمودار مقاومت تراکمی تک محوره با مقدار مدول یانگ آزمایشگاهی اختلاف دارد.

۳-۳-۴- شبیه‌سازی دیسک برش‌دهنده

دیسک شبیه‌سازی شده در این مدل‌سازی از نوع دیسک مقطع ثابت می‌باشد. این دیسک دارای قطر ۴۳/۲ سانتی‌متر و پهنای لبه‌ی ۱۳ میلی‌متر می‌باشد. جهت مدل‌سازی دیسک‌ها در این تحقیق تنها به مدل‌سازی قسمت رینگ دیسک برش‌دهنده که در شکل ۹-۴-الف با کادر قرمز رنگ مشخص شده بسنده شده است. زیرا مدل کامل دیسک نیاز به تولید تعداد فست^۱ (عنصر به وجود آورنده دیوار، به گونه‌ای که هر دیوار متشکل از دو فست است) زیادی دارد. این امر موجب افزایش زمان اجرای مدل می‌شود که در مجموع تأثیری در جواب‌ها ندارد. قابل ذکر است که دیسک‌های مدل شده از جنس فست بوده و کاملاً صلب فرض شده‌اند. در شکل ۹-۴-الف تصویر دیسک برش‌دهنده با قطر ۴۳,۲ سانتی‌متر (۱۷ اینچ) و همچنین تصویر دیسک شبیه‌سازی شده با همین قطر و ضخامت پهنای ۱۳ میلی‌متر در شکل ۹-۴-ب مشاهده می‌شود.

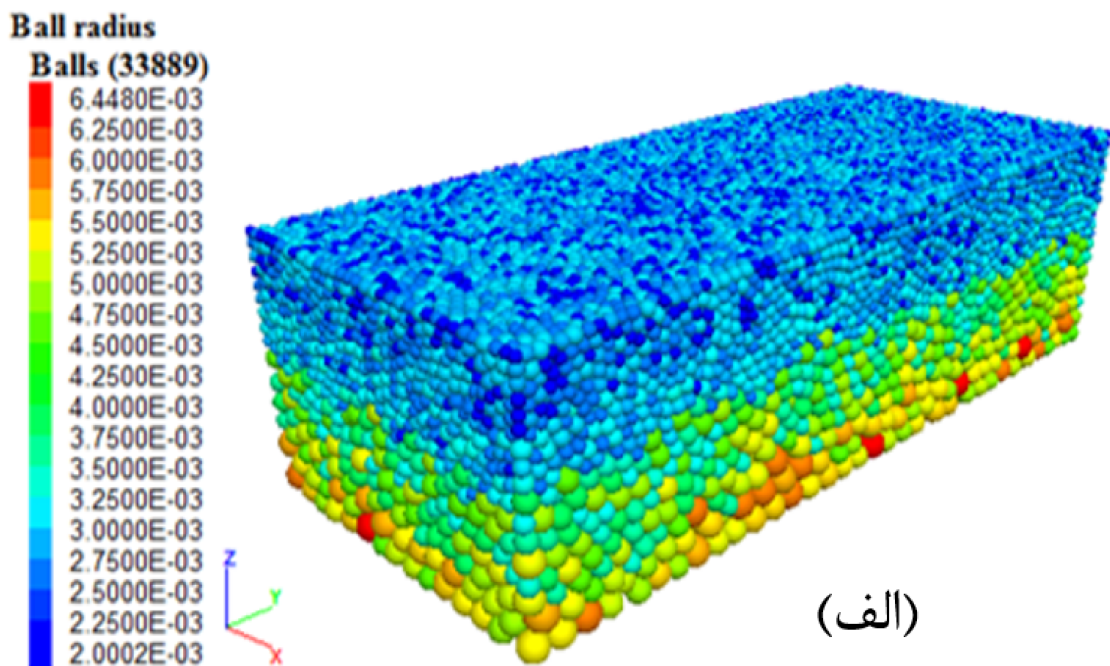


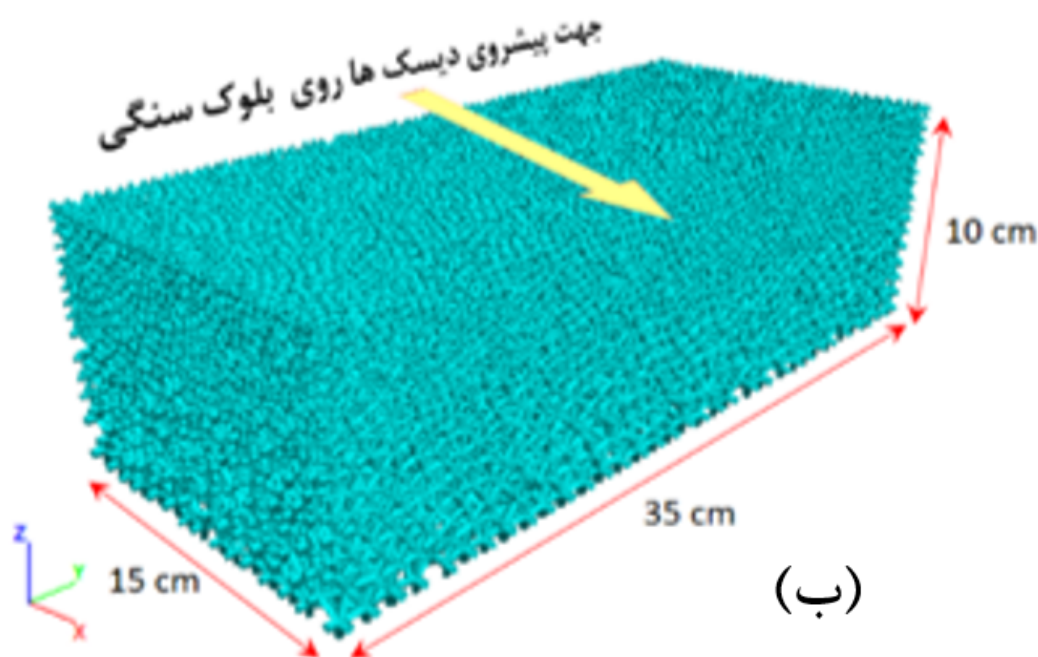
شکل ۹-۴: الف) تصویر دیسک CCS ب) دیسک مدل شده در نرم‌افزار PFC

^۱ Facet

۴-۳-۴- شبیه‌سازی بلوک سنگی

زمان محاسبات در تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار PFC به شدت به ابعاد مدل و نیز تعداد ذرات تشکیل‌دهنده مدل وابسته است. در نتیجه انتخاب ابعاد و شعاع ذرات در مدل از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق ابعاد بلوک و شعاع ذرات به گونه‌ای انتخاب شده است که با توجه به کاهش زمان، آشفستگی مدل در بخش‌های غیر از محل برش به حداقل برسد. ابعاد بلوک مدل شده $10 * 35 * 15$ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین شعاع ذرات به صورت بازه‌ای از ۲ تا $6/45$ میلی‌متر انتخاب شده است. روند افزایش شعاع ذرات (شکل ۴-۱۰-الف) از بالا به پایین می‌باشد به طوری که برش‌ها در محلی صورت می‌گیرند که ریزترین ذرات وجود دارند. تصویر تماس‌های بین ذرات تشکیل‌دهنده بلوک شبیه‌سازی شده نیز در شکل ۴-۱۰-ب قابل مشاهده است.



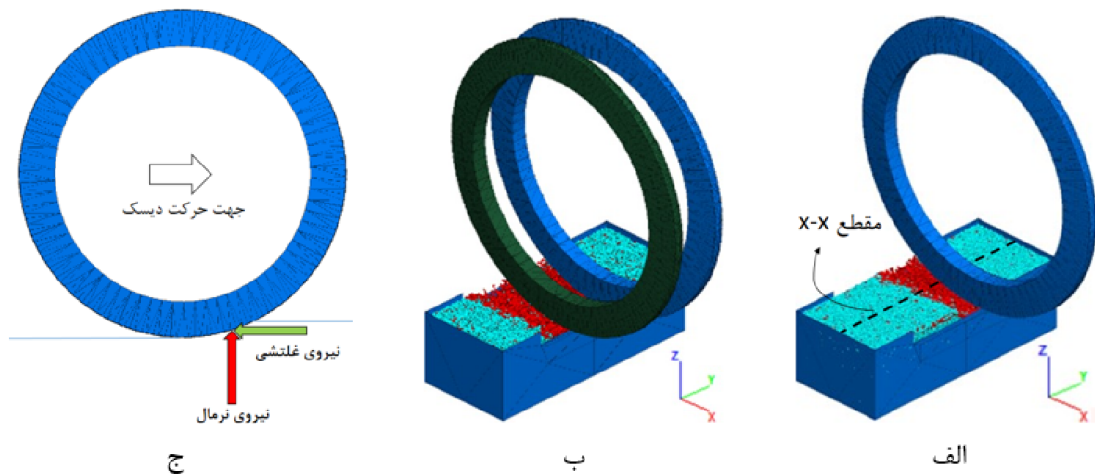


شکل ۴-۱۰: نمونه‌ی سنگی مدل شده - الف) تصویر توزیع ذرات سازنده‌ی بلوک با نمایش بازه‌ی شعاعی ذرات ب) تصویر تماس‌های بین ذرات

۴-۳-۵- مدلسازی برش‌ها

در این مطالعه جهت بررسی عمق نفوذ بر نیروهای عکس‌العمل وارده بر دیسک برش‌دهنده چهار برش اولیه و هشت برش ثانویه روی نمونه‌ی سنگی زده شده است. برش‌های ثانویه در چهار عمق نفوذ ۵، ۶، ۷ و ۸ میلی‌متر با دو فاصله‌داری ۵۱ و ۷۶ میلی‌متر صورت گرفته‌اند. برش‌ها به گونه‌ای هستند که ابتدا دیسک اول در یک عمق نفوذ مشخص، برش اول را ایجاد کرده و سپس دیسک دوم در همان عمق نفوذ با یک فاصله‌ی معین از برش اول، برش دوم را ایجاد می‌کند. نیروی قائم و نیروی غلتشی وارد شده به دیسک در برش دوم، پارامترهای کنترلی مدنظر در این مطالعه می‌باشند. در این مدلسازی نیروی قائم از مجموع نیروهای ایجاد شده در تماس‌های بین ذرات در راستای قائم و نیروی غلتشی نیز از مجموع همین نیروهای تماسی در راستای افقی بدست می‌آیند. در شکل ۴-۱۱ برش اول، برش دوم و راستای اعمال نیروهای قائم و غلتشی به دیسک نشان داده شده است. بخش الف و ب در این شکل به ترتیب تصویری از تماس ذرات تشکیل‌دهنده تحت برش‌های اول و دوم را نشان می‌دهد. قسمت آبی

رنگ بخش سالم سنگ است و بخشی که به رنگ قرمز در آمده، تماس‌هایی می‌باشند که در اثر اعمال نیرو از جانب دیسک قطع شده‌اند. در اینجا غلبه‌ی نیروی کششی ایجاد شده در تماس‌های میان ذره‌ای بر مقاومت کششی این تماس‌ها موجب شکست آنها شده است.

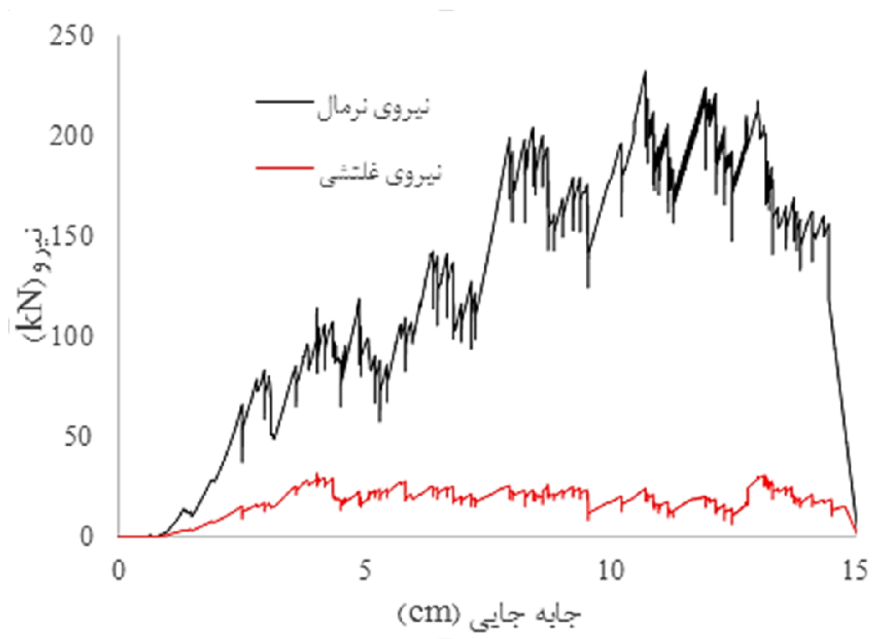


شکل ۴-۱۱: شبیه‌سازی آزمون برش مستقیم - الف) برش اول ب) برش دوم ج) نیروهای عکس‌العمل از سنگ به دیسک

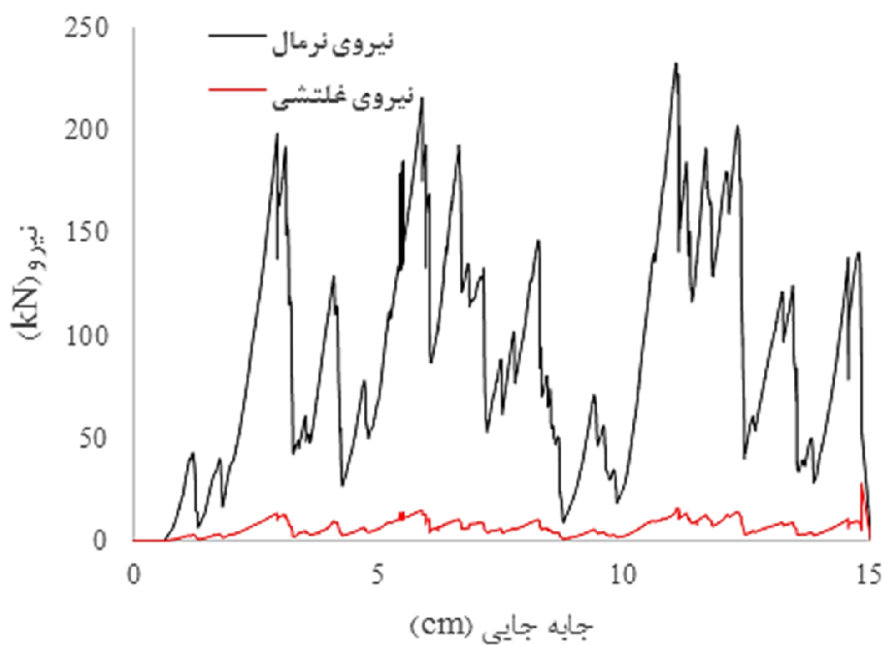
نمودار نیرو-جابجایی حاصل از برش اول، برش دوم با فاصله‌داری ۵۱ میلی‌متر و برش دوم با فاصله‌داری ۷۶ میلی‌متر از برش اول به ترتیب در شکل ۴-۱۲، شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ ارائه شده است. در این نمودارها نیروی قائم و غلتشی بر حسب میزان جابه‌جایی دیسک ارائه می‌شود. به وضوح آشکار است که در برش اول به دلیل عدم وجود برش قبلی و نبود سطح آزاد نیروی قائم و غلتشی بالاتری جهت برش سنگ نیاز است و همچنین نوسان نمودار هنگام کنده شدن ذرات توسط دیسک در برش اول بسیار کمتر است. روند برش در عمق نفوذ و فاصله‌داری‌های دیگر نیز به همین صورت است که تنها به آوردن میانگین نیروهای قائم و غلتشی آنها بسنده شده است.

در جدول ۴-۳ مراحل برش، میزان نفوذ، فاصله‌داری و مقادیر میانگین نیروهای قائم و غلتشی وارد بر دیسک در برش‌های ثانویه ارائه شده است. از آنجایی که نیروهای قائم و غلتشی، فاکتورهای اصلی در طراحی نیروی پیشران (Thrust) و گشتاور (Torque) مایشن حفاری تونل می‌باشند، با بررسی تغییرات میانگین نیروی قائم و غلتشی وارد بر دیسک به ازای عمق نفوذ و فاصله‌داری مختلف دیسک‌ها، می‌توان

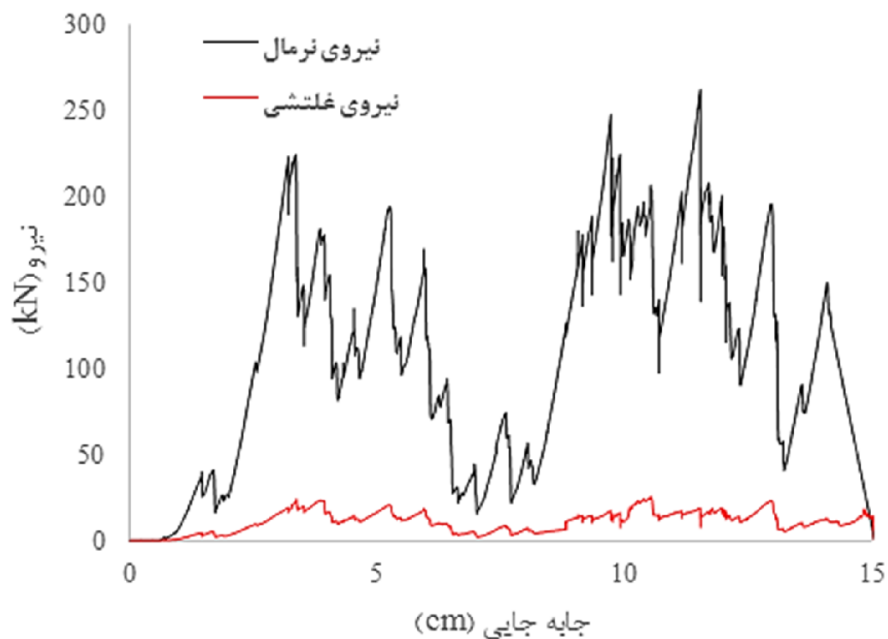
بخوبی تأثیر هر یک از این دو عامل هندسی برش بر عملکرد ماشین حفاری سنگ سخت را ارزیابی نمود.



شکل ۴-۱۲: نمودار نیرو - جابجایی برش اول با عمق نفوذ ۵ میلی‌متر



شکل ۴-۱۳: نمودار نیرو - جابجایی برش دوم با عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و فاصله‌داری ۵۱ میلی‌متر از برش اول



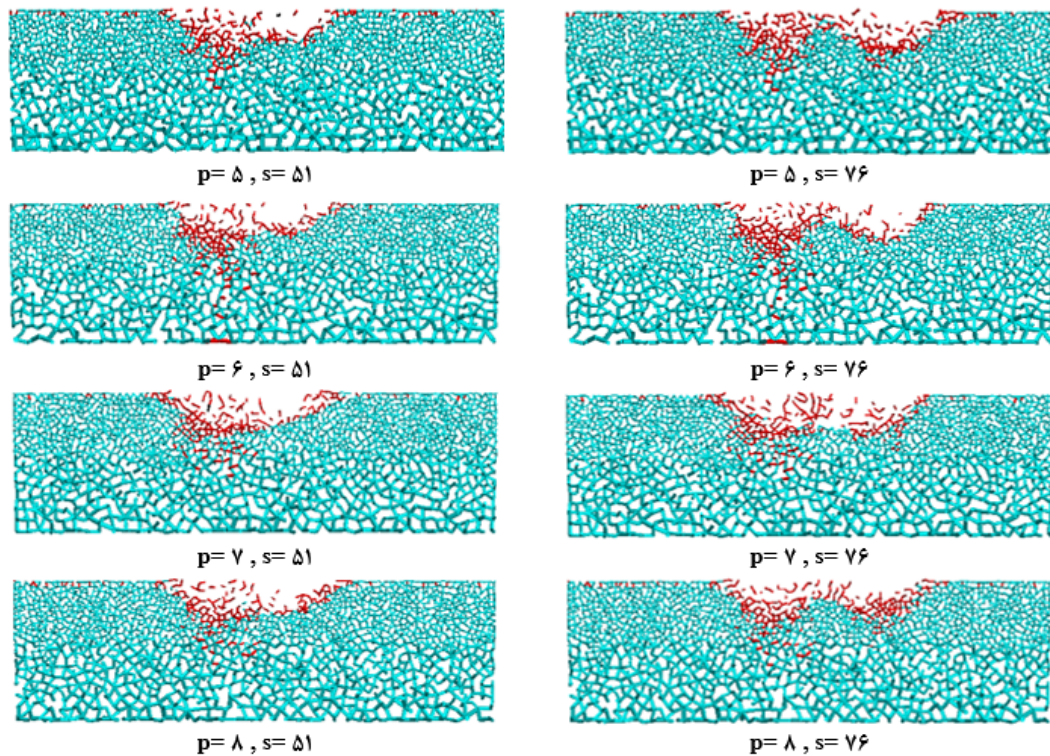
شکل ۴-۱۴: نمودار نیرو - جابجایی برش دوم با عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و فاصله‌داری ۷۶ میلی‌متر از برش اول

جدول ۴-۳: مراحل برش و مشخصات هر یک از مراحل

#	عمق نفوذ (میلی‌متر)	فاصله‌داری (میلی‌متر)	نیروی‌های میانگین در مدلسازی		نیروی‌های میانگین در آزمایشگاه	
			نیروی قائم (کیلو نیوتن)	نیروی غلتشی (کیلو نیوتن)	نیروی قائم (کیلو نیوتن)	نیروی غلتشی (کیلو نیوتن)
۱	۵	۵۱	۸۷/۷	۶/۵	۱۰۶/۴	۱۱/۴
۲	۶	۵۱	۱۰۶/۲	۷/۱	۱۱۸	۱۳/۴
۳	۷	۵۱	۱۲۴/۱	۸/۳	۱۳۰	۱۵/۷
۴	۸	۵۱	۱۳۳/۴	۹/۶	۱۴۱	۱۸
۵	۵	۷۶	۱۰۹/۳	۸/۴	۱۳۰/۶	۱۴/۴
۶	۶	۷۶	۱۲۸/۸	۹	۱۴۲	۱۷/۵
۷	۷	۷۶	۱۴۷/۴	۱۱/۵	۱۵۳	۲۰/۶
۸	۸	۷۶	۱۵۱	۱۲/۷	۱۶۴	۲۳/۸

به طور کلی اگر فاصله داری دیسک‌ها از فاصله‌داری بحرانی بیشتر شود برش دوم بی اثر است، زیرا هیچ تراشه‌ای از سنگ در بین دو خط برش ایجاد نمی‌شود (Rostami & Ozdemir, 1996). این موضوع در مقاطعی از سنگ برش خورده توسط دیسک، در دو فاصله‌داری ۵۱ و ۷۶ میلی‌متر در عمق نفوذهای

مختلف که در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است به وضوح آشکار است. در این شکل می‌توان ملاحظه کرد، با افزایش فاصله‌داری در هر عمق نفوذ از ۵۱ میلی‌متر به ۷۶ میلی‌متر بازدهی برش کمتر می‌شود. اما از طرفی دیگر مشاهده می‌شود که با افزایش عمق، اندازه‌ی تراشه‌ی ایجاد شده در بین دو خط برش در فاصله‌داری بزرگتر بیشتر می‌شود. البته این موضوع با افزایش نیروهای قائم و غلتشی وارد بر دیسک نیز همراه است.



شکل ۴-۱۵: مقاطع مختلف برش با عمق نفوذ p و فاصله‌داری s در مقطع $x-x$

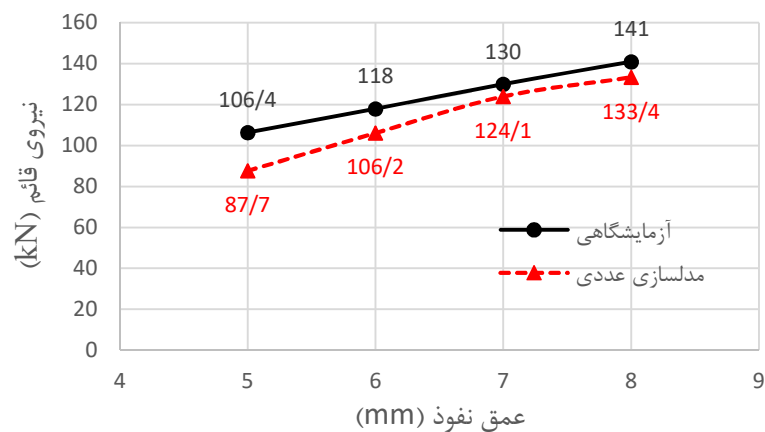
موقعیت مقطع انتخاب شده‌ی $x-x$ روی سنگ در شکل ۴-۱۱-الف نشان داده شده است. این مقطع در واقع صفحه‌ای عمود بر محور x یا راستای حرکت دیسک برش‌دهنده است که بلوک را به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کند.

۴-۳-۶- نتایج برش در سنگ بکر

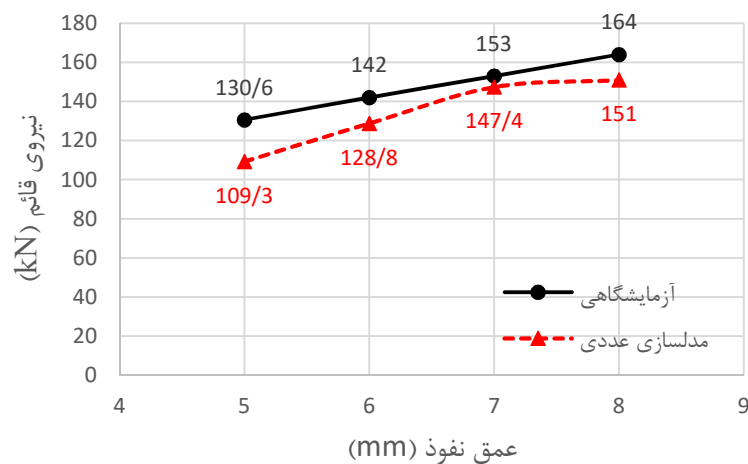
منظور از نیروی قائم و غلتشی که پارامتر خروجی مطالعات آزمون برش خطی می‌باشد، در واقع نیروهای عکس‌العمل اعمالی از سنگ به دیسک، متناسب با عمق نفوذ تعریف شده است. مقدار نیروی

نشان داده شده در حقیقت یک عامل معرف جهت تعیین میزان نیروی پیشران و گشتاور مورد نیاز در ماشین حفاری تمام مقطع است.

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق مشاهده می‌شود که دو پارامتر عمق نفوذ دیسک و فاصله‌داری دو دیسک از یکدیگر با نیروهای عکس‌العمل که پارامترهای خروجی این مطالعه می‌باشند رابطه‌ی مستقیم دارد. همانطور که پیداست نیروهای قائم و غلتشی با افزایش عمق نفوذ افزایش می‌یابند. با مقایسه‌ی دو نمودار ارائه شده در شکل ۴-۱۶ و شکل ۴-۱۷ مشاهده می‌شود با افزایش فاصله میان دو خط برش (از مقدار ۵۱ میلی‌متر به ۷۶ میلی‌متر) نیروی قائم در سطح بالاتری قرار می‌گیرند. این نتیجه در مقایسه‌ی نمودارهای نیروی غلتشی نشان داده شده در شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ نیز صادق است.

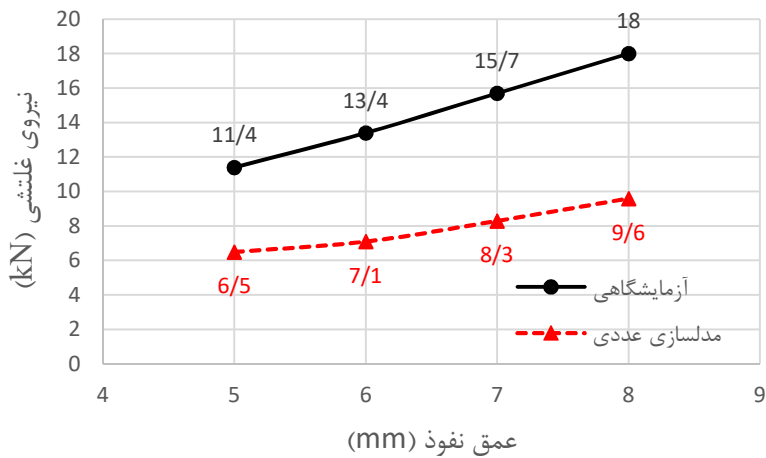


شکل ۴-۱۶: نمودار نیروی قائم برش دوم در عمق نفوذ های مختلف با فاصله‌داری ۵۱ میلی‌متری از برش اول

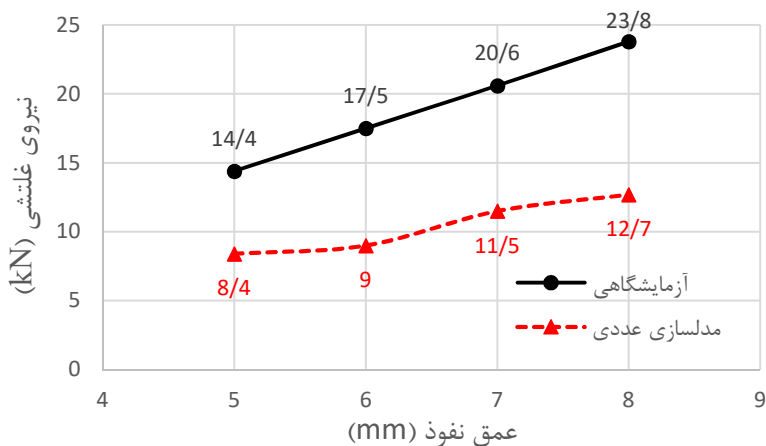


شکل ۴-۱۷: نمودار نیروی قائم برش دوم در عمق نفوذ های مختلف با فاصله‌داری ۷۶ میلی‌متری از برش

اول



شکل ۴-۱۸: نمودار نیروی غلتشی برش دوم در عمق نفوذ های مختلف با فاصله‌داری ۵۱ میلی‌متری از برش اول



شکل ۴-۱۹: نمودار نیروی غلتشی برش دوم در عمق نفوذ های مختلف با فاصله‌داری ۷۶ میلی‌متری از برش اول

در نمودارهای فوق نمودار مشکی رنگ نشان دهنده‌ی نتایج آزمایشگاهی برش خطی انجام شده روی گرانیت قرمز کلورادو است (Gertsch et al., 2007). همچنین نمودار قرمز رنگ که با خط چین رسم شده است مقادیر حاصل از تحلیل عددی را نشان می‌دهد. از مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی با مقادیر آزمایشگاهی برداشت می‌شود، نیروهای قائم حاصل از مدلسازی عددی تطابق بهتری را نسبت به نیروهای غلتشی با مقادیر واقعی دارند. همچنین از مقایسه‌ی نمودار نیروی قائم مدلسازی با آزمایشگاهی مشخص می‌شود که با افزایش عمق نفوذ از مقدار ۵ به ۷ میلی‌متر این تطابق به نزدیک‌ترین مقدار خود

می‌رسد. این اختلاف زیاد بین میزان نیروی غلتشی آزمایشگاهی و مدلسازی می‌تواند با کاهش اندازه‌ی ذرات تشکیل دهنده بهبود یابد. در مجموع می‌توان گفت با کاهش اندازه‌ی ذرات و متناسب با آن افزایش تعداد ذرات سازنده‌ی مدل می‌توان به نتایج بهتری دست یافت. البته این امر نیازمند دسترسی به سخت‌افزارهایی با پردازش‌گرهای بسیار قوی است.

۴-۴- جمع بندی

در این بخش از تحقیق، پارامترهای هندسی برش شامل فاصله‌داری و عمق نفوذ دیسک برش دهنده روی نیروهای اعمالی بر دیسک در سنگ بکر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل با نتایج آزمون آزمایشگاهی برش خطی انجام شده روی سنگ گرانیت قرمز کلورادو مقایسه شد. نتایج حاکی از این است که دو پارامتر عمق نفوذ دیسک و فاصله‌داری دو دیسک از یکدیگر با نیروهای اعمالی به دیسک که پارامترهای خروجی این مطالعه بوده رابطه‌ی مستقیم دارند. به طوری که نیروهای قائم و غلتشی با افزایش عمق نفوذ در هر برش بدون در نظر گرفتن اثر برش کناری افزایش می‌یابند. همچنین با مقایسه‌ی نیروهای حاصل از برش‌های اولیه و ثانویه مشاهده می‌شود نیروی‌های حاصل در برش‌های ثانویه به دلیل وجود ناحیه‌ی شکسته‌ی جانبی کمتر می‌باشد. اما با افزایش فاصله‌ی میان دو خط برش از مقدار ۵۱ میلی‌متر به ۷۶ میلی‌متر مقدار نیروهای اعمالی به دیسک مجدداً زیاد می‌شوند. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدلسازی عددی و نتایج آزمایش برش خطی روی سنگ گرانیت قرمز کلورادو مشاهده می‌شود که نتایج مدلسازی و آزمایشگاهی از تطابق قابل قبولی برخوردار است. اما اختلاف موجود می‌تواند ناشی از ساده‌سازی‌هایی چون صلب فرض کردن دیسک برش دهنده، بزرگی ابعاد ذرات و کوچک بودن ابعاد مدل‌سنگی نسبت به مدل واقعی باشد. لازم به ذکر است که این فرض‌ها با توجه به امکانات محدود سخت‌افزاری جهت مدلسازی و محدودیت‌های زمانی انجام کار در نظر گرفته شد.

فصل پنجم

مدلسازی عددی خریدایش سنگ در زودار

۵-۱- مقدمه

نتایج حاصل از مدلسازی برش در سنگ بکر و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی، بیانگر درستی روند مدلسازی برش با استفاده از ابزار المان مجزای PFC3D است. در این بخش از پژوهش، پس از تعیین خواص هندسی و خواص مقاومتی درزه به بررسی اثر پارامترهای فاصله‌داری و جهت‌داری درزه بر خردایش سنگ پرداخته خواهد شد. در این مطالعه درزه‌ها ناپایا و با بازشدگی ثابت ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. همچنین پارامترهای مقاومتی درزه ثابت فرض شده است. لازم به ذکر است که در مدلسازی حاضر پارامترهای ورودی مقاومتی درزه نیز مانند پارامترهای مقاومتی ماده‌سنگ نیاز به کالیبراسیون دارند.

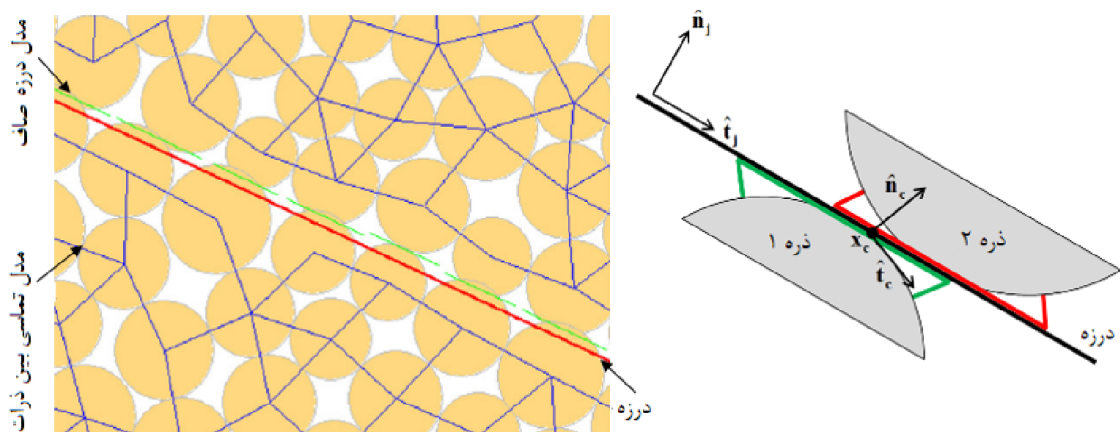
۵-۲- کالیبراسیون خواص مقاومتی درزه

برای اعمال خواص مقاومتی به درزه‌های تولید شده در بلوک سنگی، از مدل تماسی درزه صاف^۱ استفاده شده است. این مدل تماسی همانطور که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است، تماس‌های موجود در محل اعمال درزه را از بین برده و تماس‌هایی با خواص مرتبط با درزه جایگزین آن‌ها می‌کند. برای بدست آوردن خواص میکرو این مدل، از شبیه‌سازی آزمون برش مستقیم^۲ استفاده شده است.

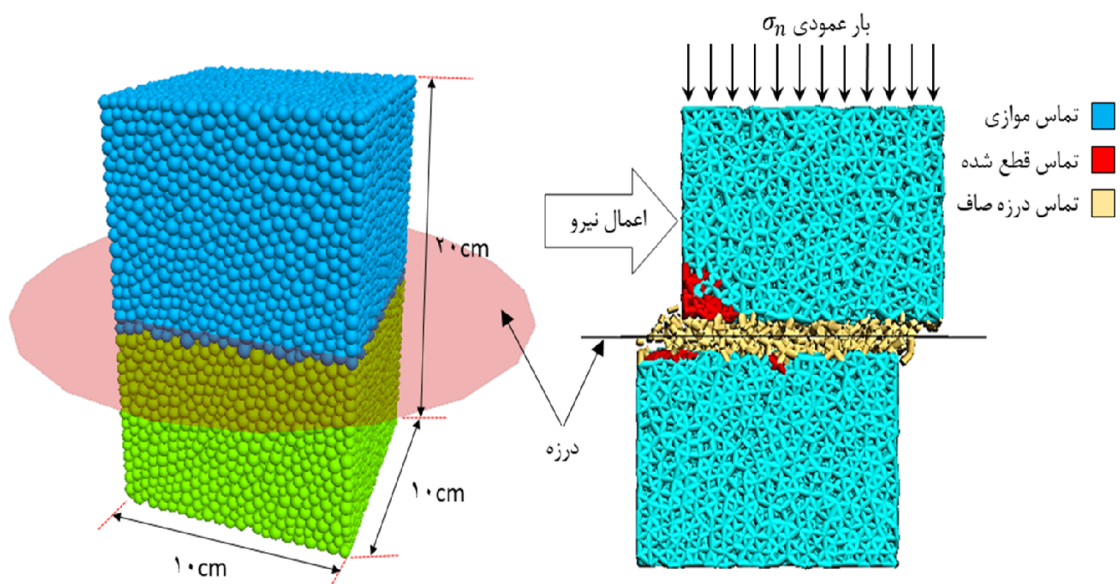
برای شبیه‌سازی آزمون برش مستقیم ابتدا بلوکی با ابعاد $10 \times 10 \times 20$ سانتی‌متر متشکل از ۲۱۷۲۵ ذره با خواصی برابر با گرانیت قرمز که در بخش قبل مورد استفاده قرار گرفت، ایجاد شده است. این بلوک با اعمال یک تک درزه‌ی افقی با خواص مقاومتی ماکرو معین به دو قسمت مساوی تقسیم شده و بخش بالایی با اعمال نیرو در راستای افقی روی سطح درزه می‌لغزد. با حرکت بخش بالایی، تنش برشی در هر لحظه ثبت می‌شود که این تنش با تغییرات خواص مقاومتی درزه دستخوش تغییر می‌گردد. در شکل ۵-۲ جزئیات شبیه‌سازی آزمون برش مستقیم ارائه شده است.

^۱ Smooth joint contact model

^۲ Direct shear test



شکل ۱-۵: تصویر شماتیک از مدل تماسی درزه صاف (Bahaaddini et al, 2012)

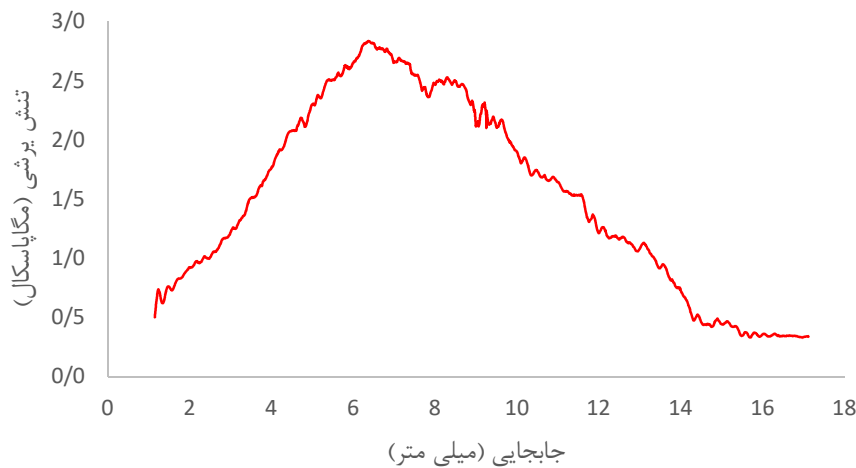


شکل ۲-۵: جزئیات شبیه‌سازی آزمون برش مستقیم

تغییرات خواص مدل درزه صاف به منظور دستیابی به مقاومت برشی آزمایشگاهی درزه موجود در مطالعه‌ی حسینی (۱۳۹۵) انجام شده است. در شکل ۳-۵ نمودار تنش برشی-جابجایی براساس مقادیر موجود در جدول ۱-۵ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱: خواص ماکرو و میکرو درزه

مقدار	خواص تماسی درزه صاف	مقدار	خواص آزمایشگاهی
$1,5 \times 10^{11}$	سختی قائم (نیوتن بر متر) - k_n	۲,۸۵	مقاومت برشی (مگاپاسکال) - τ_{max}
$1,5 \times 10^{11}$	سختی برشی (نیوتن بر متر) - k_s	۲	بار عمودی (مگاپاسکال) - σ_n
۰	مقاومت کششی (مگاپاسکال) - σ_c	۰	چسبندگی - C
۰	چسبندگی (مگاپاسکال) - c	۲۷	زاویه اصطکاک - φ
۲۷	زاویه اصطکاک ($^\circ$) - φ		

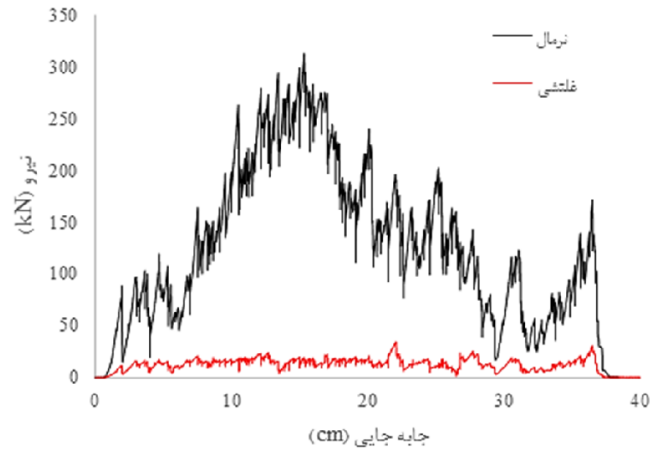


شکل ۵-۳: نمودار تنش برشی-جابجایی حاصل از مدل‌سازی

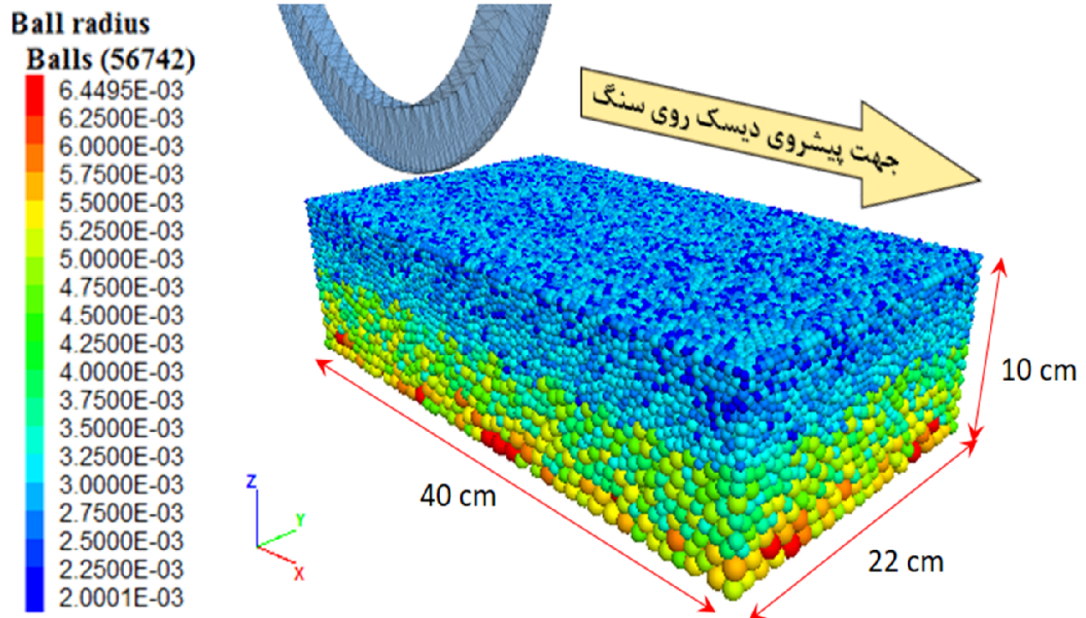
۵-۳- مدل‌سازی بلوک سنگی

در این بخش با توجه به اهداف مسئله، ابعاد بلوک سنگ مدل شده در امتداد برش افزایش و در بعد عمود بر آن کاهش یافته است. اما با توجه به محدودیت‌های موجود، بعد ارتفاع تغییری نکرده است. نمای بلوک شبیه‌سازی شده جهت تحلیل درزه‌داری در شکل ۵-۵ نشان داده شده است. خواص میکرو بلوک شبیه‌سازی شده مبتنی بر جدول ۴-۲ می‌باشد.

پیش از اعمال درزه در بلوک سنگی، ابتدا یک خط برش روی نمونه در حالت بکر ایجاد شده است. مقادیر نیروی قائم و غلتشی میانگین وارد به دیسک طی این برش به ترتیب ۱۲۸ و ۱۵/۲ کیلونیوتن بدست آمده است. نمودار نیروی قائم-جابجایی برش در سنگ بکر در شکل ۵-۴ ارائه شده است.



شکل ۴-۵: نمودار نیروی قائم-جابجایی برش در سنگ بکر



شکل ۵-۵: نمای بلوک شبیه‌سازی شده با توزیع ذرات براساس شعاع

۴-۵- تحلیل حساسیت پارامترهای درزه

در این بخش از پژوهش تأثیر ویژگی‌های هندسی درزه شامل جهت‌داری (شیب) و فاصله‌داری بر خردایش سنگ، تحت برش توسط برش‌دهنده‌ی دیسکی با عمق نفوذی برابر با ۵ میلی‌متر بررسی شده است. جهت شیب در تمام تحلیل‌ها ثابت و برخلاف امتداد حرکت دیسک است. درزه‌ها با چهار زاویه‌ی صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق با فاصله‌داری‌های مختلف بررسی می‌شوند. مشخصات هندسی درزه‌های اعمال شده و نیروهای حاصل از برش در هر مرحله، به طور کامل در جدول ۲-۵ ارائه شده

است. نیروی میانگین قائم (MNF) و نیروی میانگین غلتشی (MRF) در هر خط برش در واقع مجموع نیروهای وارد بردیسک در طول برش، تقسیم بر تعداد آنها می‌باشد. انرژی ویژه ارائه شده در این جدول نیز از رابطه‌ی ۲-۵ محاسبه می‌شود.

جدول ۲-۵: مشخصات درزه‌ها و نتایج حاصل از برش در هر مرحله

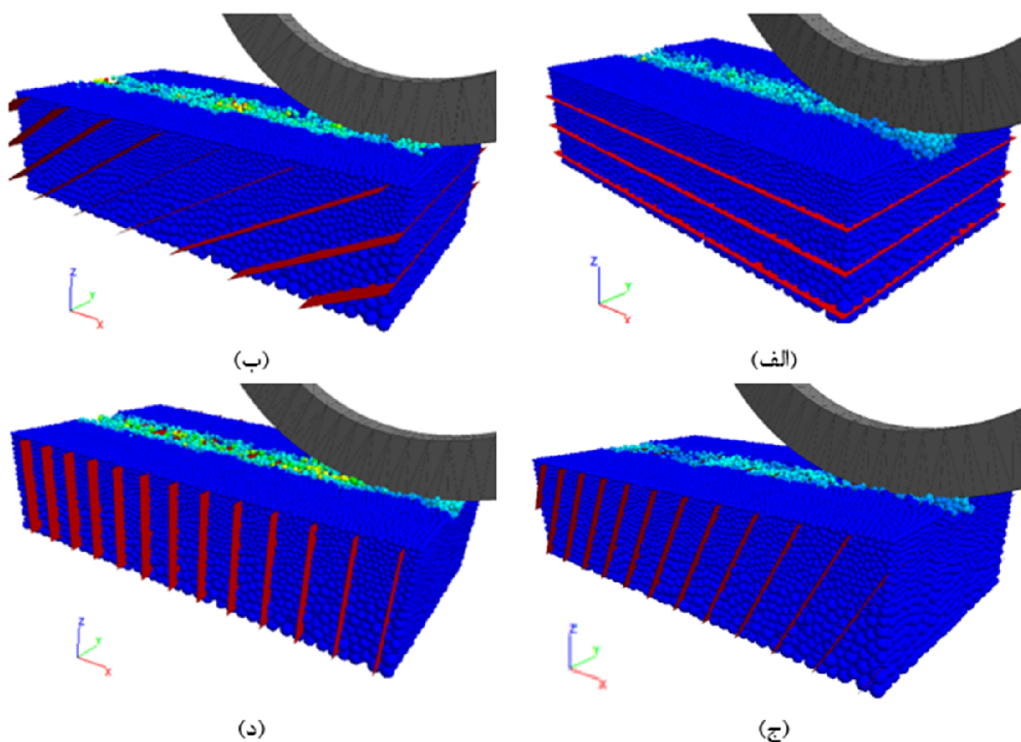
#	شیب درزه	فاصله‌داری درزه‌ها (سانتی متر)	نیروی قائم میانگین (کیلونیوتن)	نیروی غلتشی میانگین (کیلونیوتن)	انرژی ویژه (کیلوژول بر متر مکعب)
۱	۰	۱	۱۱/۵	۲	۲/۱۶
۲	۰	۲	۳۳	۵/۴	۴/۳۴
۳	۰	۳	۶۷/۸	۹/۹	۶/۹۳
۴	۰	۴	۸۵/۳	۱۱/۷	۸/۳۲
۵	۳۰	۳	۶۱	۸/۳	۶/۷۷
۶	۳۰	۵	۶۲/۷	۹/۵	۶/۹
۷	۳۰	۱۰	۸۱	۱۰	۷/۲۸
۸	۳۰	۱۵	۱۰۰	۱۱/۶	۸/۵۶
۹	۳۰	۲۰	۱۱۰/۱	۱۱/۶	۸/۸۹
۱۰	۶۰	۳	۵۵/۴	۶/۸	۵/۹۹
۱۱	۶۰	۵	۵۹/۸	۹	۶/۹۷
۱۲	۶۰	۱۰	۷۱/۸	۱۰/۲	۷/۵۹
۱۳	۶۰	۱۵	۷۶/۲	۱۰/۴	۸/۵۳
۱۴	۶۰	۲۰	۹۸/۸	۱۲/۳	۸/۶
۱۵	۹۰	۳	۴۳/۳	۷	۵/۸۹
۱۶	۹۰	۵	۵۶/۳	۸/۸	۶/۵۷
۱۷	۹۰	۱۰	۸۹/۶	۱۱/۳	۸/۶۳
۱۸	۹۰	۱۵	۱۰۱/۷	۱۲/۶	۱۰/۱۳
۱۹	۹۰	۲۰	۱۱۷/۴	۱۳/۵	۱۰/۶۵

۵-۴-۱- بررسی تأثیر شیب درزه

همانطور که اشاره شد خط برش‌ها در شرایط درزه‌داری با شیب‌های صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ در فاصله‌داری‌های مختلف انجام شده و عملکرد برش در هر یک از این شیب‌ها با توجه به شرایط مدل در فاصله‌داری‌های متفاوت مورد تحلیل قرار گرفته‌است که در ادامه تشریح خواهد شد.

۵-۴-۱-۱- تأثیر شیب در فاصله‌داری ۳ سانتی‌متر

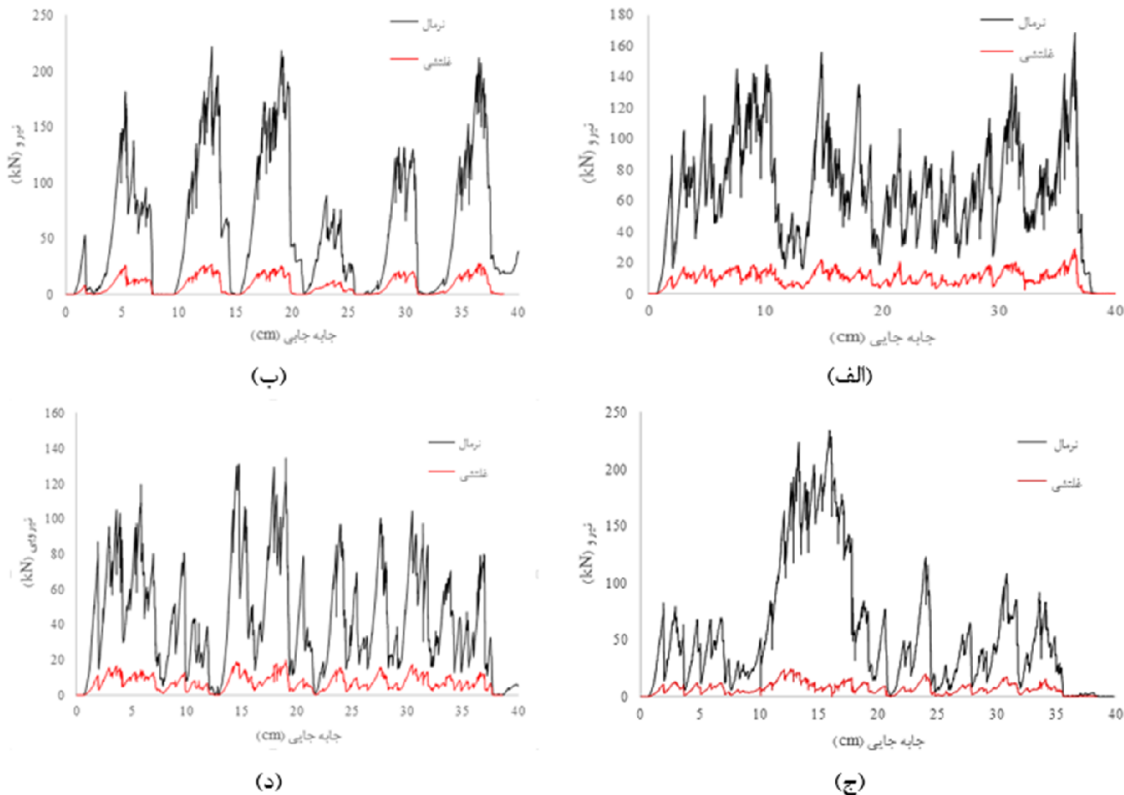
با توجه به محدودیت در افزایش ارتفاع بلوک سنگی، مقادیر فاصله‌داری در حالت شیب صفر درجه متفاوت با شیب‌های دیگر در نظر گرفته شده است. با این وجود، فاصله‌داری ۳ سانتی‌متر در همه‌ی تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است. فلذا می‌توان تأثیر شیب درزه بر نیروهای اعمالی بر دیسک را در این فاصله‌داری مورد بحث و بررسی قرار داد. شکل ۵-۶ تصویری از درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با فاصله‌داری ۳ سانتی‌متر در شیب‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۶: نمای درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با فاصله‌داری ۳ سانتی‌متر و زاویه الف) صفر درجه (ب) ۳۰ درجه (ج) ۶۰ درجه (د) ۹۰ درجه

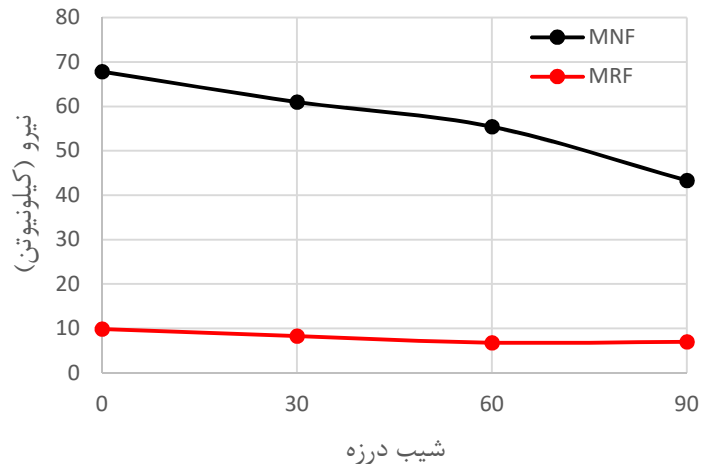
مقادیر نیروهای حاصل از برش در ۴ شیب مختلف با فاصله‌داری ۳ سانتی‌متر در شکل ۵-۷ ارائه شده است. این نمودارها نمایانگر نوسان نیروی قائم و غلتشی طی جابجایی دیسک روی سطح سنگ می‌باشد. این جابجایی برابر با طول بلوک سنگی به اندازه‌ی ۴۰ سانتی‌متر است. همانطور که در این شکل مشخص است نیروهای وارد به دیسک در نقاط برون زدگی درزه به مقدار قابل توجهی افت می‌کند که این افت ناشی از تأثیر مستقیم درزه بر تولید تراشه و در نتیجه عملکرد ابزار برش است. برای تحلیل

نتایج مقدار میانگین نیروی قائم و غلتشی از هر یک از این نمودارها استخراج شده است که مقادیر آنها در جدول ۵-۲ ارائه شده است.



شکل ۵-۷: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با فاصله‌داری ۳ سانتی‌متر و زاویه
الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه

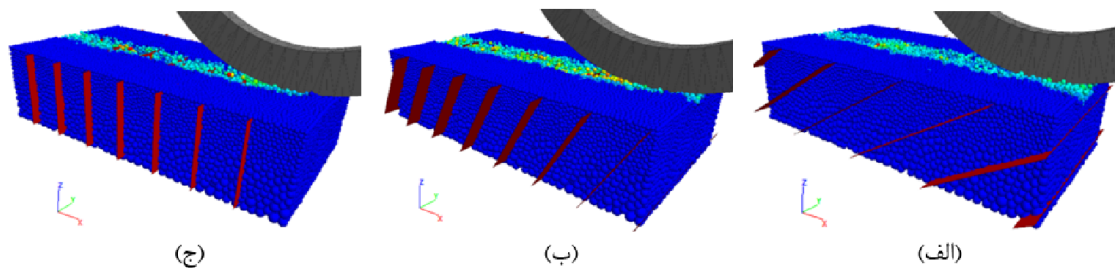
با بررسی مقادیر نیروی میانگین در شیب‌های مختلف با فاصله‌داری ثابت ۳ سانتی‌متر مشاهده می‌شود که با افزایش شیب از مقدار صفر به ۹۰ درجه نیروی قائم از مقداری برابر با ۶۷/۸ کیلونیوتن به مقداری برابر با ۴۳/۳ کیلونیوتن کاهش می‌یابد اما نیروی غلتشی دچار تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌شود (شکل ۵-۸). فاصله‌داری ۳ سانتی‌متر بسیار کوچک بوده و در این محدوده از فاصله‌داری، سنگ بسیار خرد شده محسوب می‌شود، بنابراین به‌طور قطعی نمی‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شیب از مقدار صفر به ۹۰ درجه، مقدار نیروی قائم کم خواهد شد. بر این اساس جهت بررسی این موضوع، تأثیر پارامتر جهت‌داری در ۴ فاصله‌داری ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر نیز بر نیروهای وارد بر دیسک مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



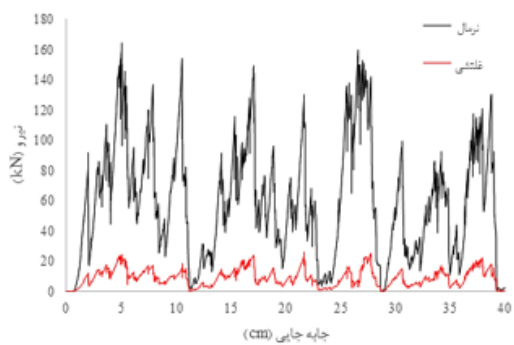
شکل ۵-۸: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در شیب‌های مختلف درزه با فاصله داری ۳ سانتی‌متر

۵-۴-۱-۲- تأثیر شیب در فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر

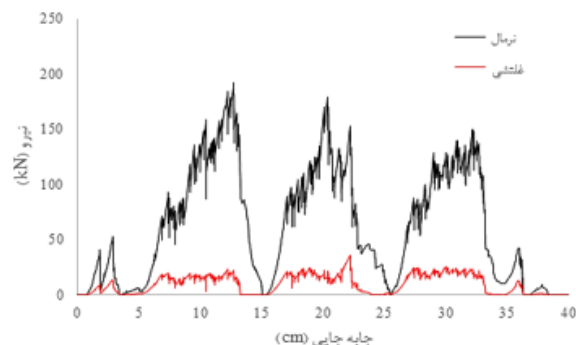
با توجه به محدودیت ابعاد، در فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر و بیشتر، تنها شیب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ مورد بررسی قرار گرفته است. تصاویر درزه‌های اعمال‌شده در این بخش در شکل ۵-۹ نشان داده شده همچنین نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از هر برش در شکل ۵-۱۰ ارائه شده است.



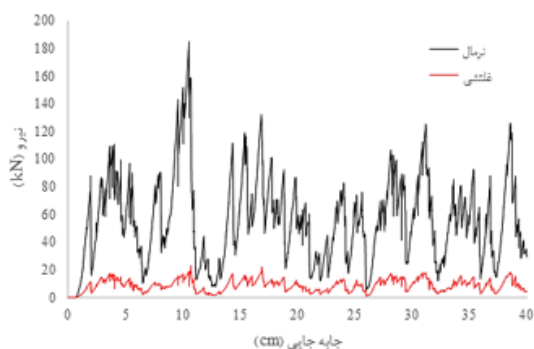
شکل ۵-۹: نمای درزه‌های اعمال‌شده در بلوک سنگی با فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر و زاویه الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه



(ب)



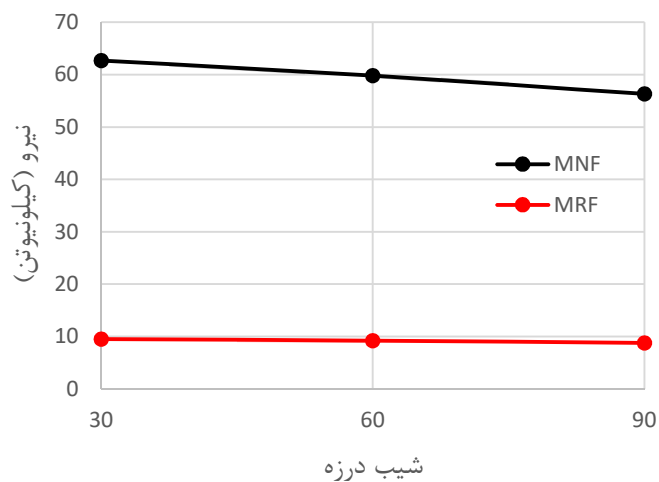
(الف)



(ج)

شکل ۵-۱۰: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر و زاویه
 (الف) ۳۰ درجه (ب) ۶۰ درجه (ج) ۹۰ درجه

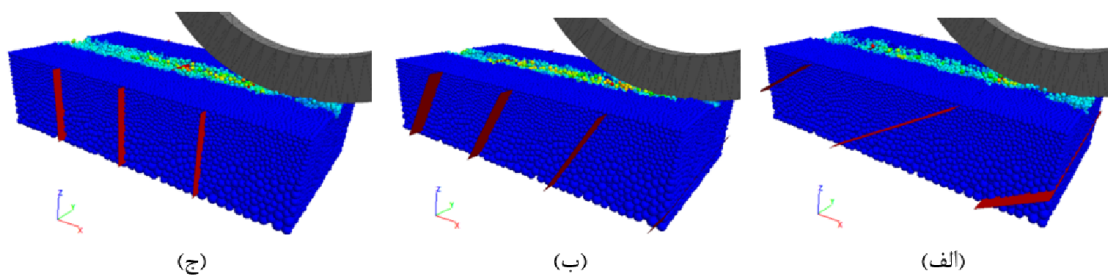
مقادیر نیروی قائم میانگین حاصل از برش برای شیب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب ۶۲/۷، ۵۹/۸ و ۵۶/۳ کیلونیوتن و مقادیر نیروی غلتشی نیز به ترتیب برابر با ۹، ۹/۵ و ۸/۸ کیلونیوتن می‌باشد. با توجه به شکل ۵-۱۱ که روند تغییرات نیرو در شیب‌های مختلف با فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهد، در فاصله‌داری ۵ سانتی‌متر نیز مانند فاصله‌داری ۳ سانتی‌متر روند تغییرات نیروی قائم با افزایش شیب درزه نزولی است. در نیروی غلتشی نیز تغییر چشم‌گیری مشاهده نمی‌شود.



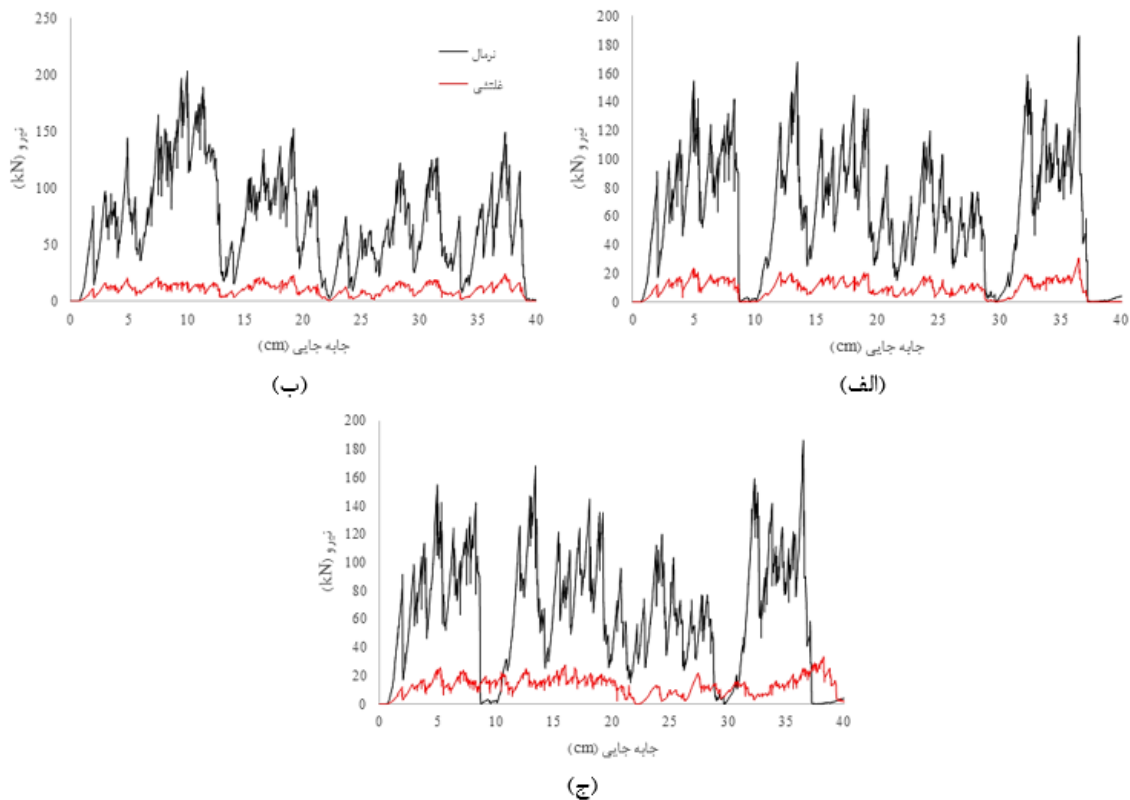
شکل ۵-۱۱: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در شیب‌های مختلف درزه با فاصله داری ۵ سانتی‌متر

۵-۴-۱-۳- تأثیر شیب در فاصله‌داری ۱۰ سانتی‌متر

تصاویر درزه‌های اعمال‌شده در این بخش نیز در شکل ۵-۱۲ نشان‌داده شده است. همچنین نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از هر برش در شکل ۵-۱۳ ارائه شده است.

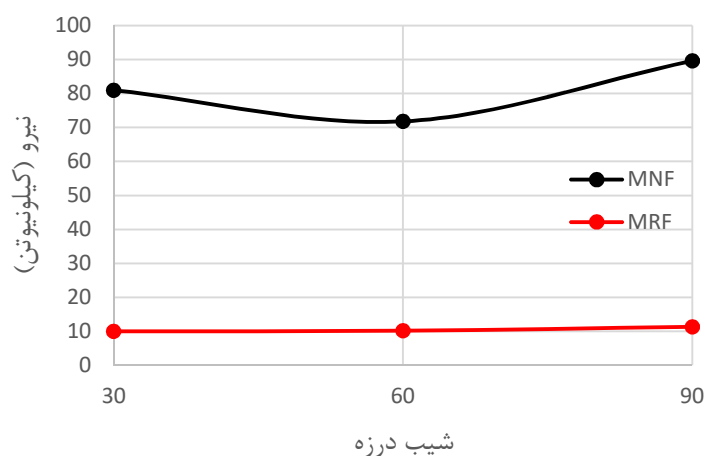


شکل ۵-۱۲: نمای درزه‌های اعمال‌شده در بلوک سنگی با فاصله‌داری ۱۰ سانتی‌متر و زاویه الف) ۳۰ درجه (ب) ۶۰ درجه (ج) ۹۰ درجه



شکل ۵-۱۳: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با فاصله‌داری ۱۰ سانتی‌متر و زاویه (الف) ۳۰ درجه (ب) ۶۰ درجه (ج) ۹۰ درجه

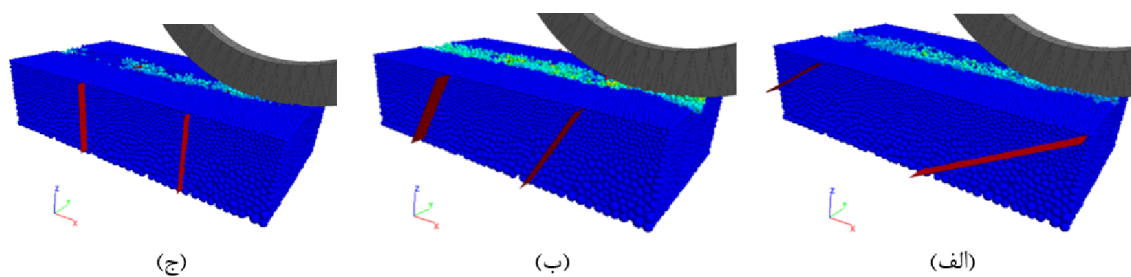
مقادیر نیروی قائم میانگین حاصل از برش برای شیب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه در فاصله‌داری ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب ۸۱، ۷۱/۸ و ۸۹/۶ کیلونیوتن و مقادیر نیروی غلتشی نیز به ترتیب برابر با ۱۰، ۱۰/۲ و ۱۱/۳ کیلونیوتن می‌باشد. با دقت در نتایج این گام از تحلیل حساسیت پارامتر شیب ناپیوستگی-ها، مشاهده می‌شود که مقدار نیروی قائم اعمال شده از سنگ به دیسک، در شیب ۶۰ درجه کمترین مقدار و در شیب ۹۰ درجه بیشترین مقدار را دارد. این روند، روند نزولی مطلق تغییرات نیرو به‌ازای افزایش شیب در دو فاصله‌داری ۳ و ۵ سانتی‌متر را نقض می‌کند.



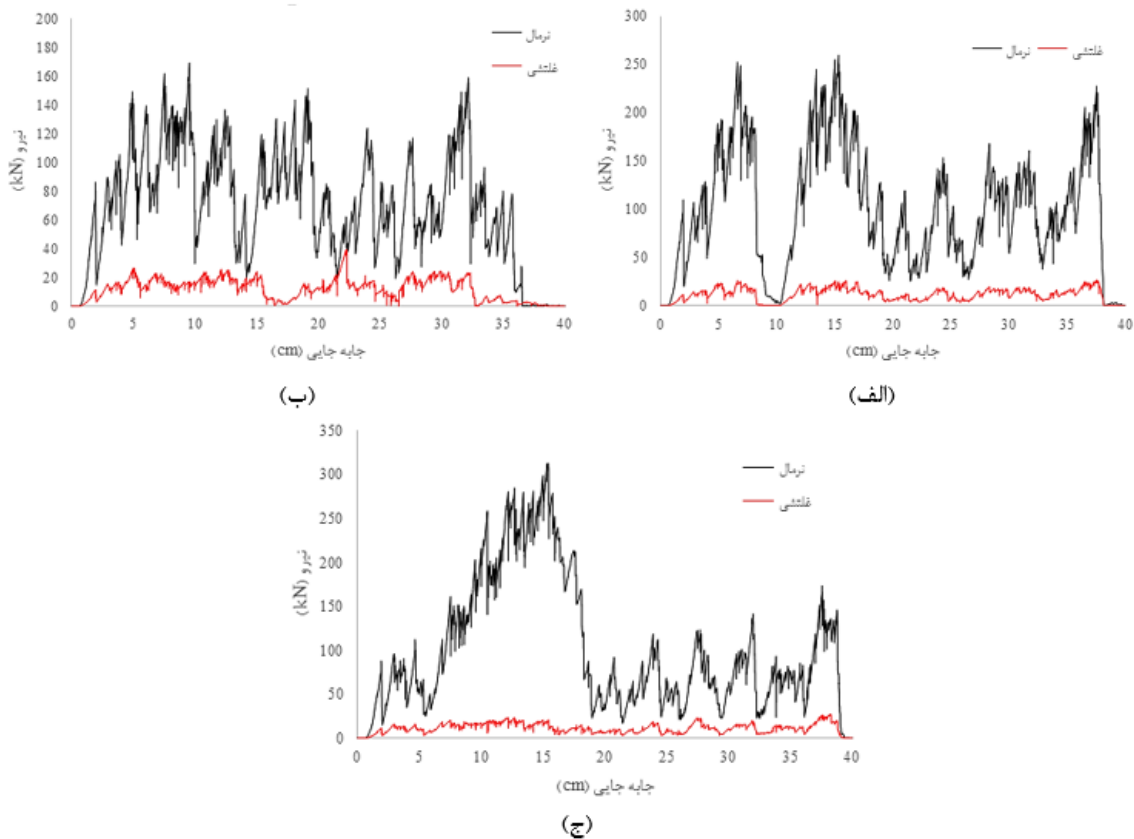
شکل ۵-۱۴: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در شیب‌های مختلف درزه با فاصله داری ۱۰ سانتی‌متر

۵-۴-۱-۴-۵- تأثیر شیب در فاصله‌داری ۱۵ سانتی‌متر

با توجه به تغییر در روند تغییرات نیرو در فاصله‌داری ۱۰ سانتی‌متر نسبت به فاصله‌داری‌های کوچکتر جهت آگاهی از روند تغییرات نیرو در فاصله‌داری‌های بزرگتر در این بخش به بررسی شیب در فاصله‌داری ۱۵ سانتی‌متر پرداخته می‌شود. تصاویر درزه‌های اعمال‌شده و نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از هر خط برش به ترتیب در شکل ۵-۱۵ و شکل ۵-۱۶ ارائه شده است.

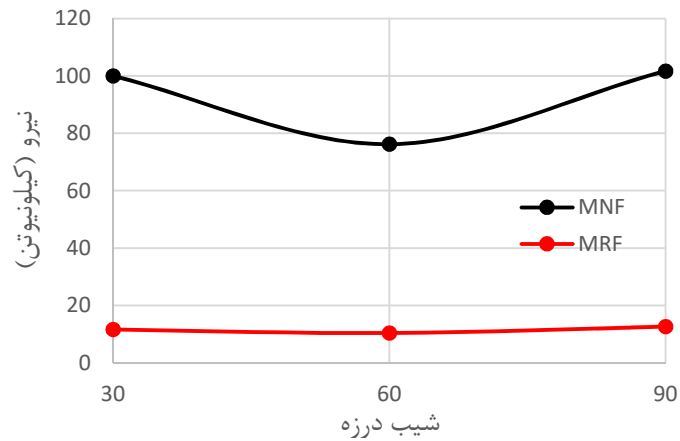


شکل ۵-۱۵: نمای درزه‌های اعمال‌شده در بلوک سنگی با فاصله‌داری ۱۵ سانتی‌متر و زاویه الف) ۳۰ درجه (ب) ۶۰ درجه (ج) ۹۰ درجه



شکل ۵-۱۶: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با فاصله‌داری ۱۵ سانتی‌متر و زاویه
 (الف) ۳۰ درجه (ب) ۶۰ درجه (ج) ۹۰ درجه

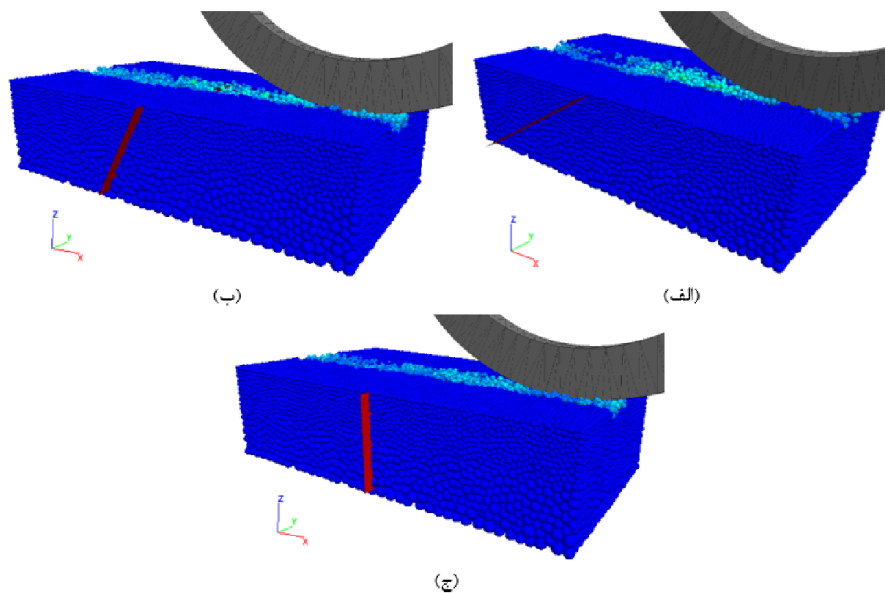
مقادیر نیروی قائم میانگین حاصل از برش برای شیب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب ۱۰۰، ۷۶/۲ و ۱۰۱/۷ کیلونیوتن و مقادیر نیروی غلتشی نیز به ترتیب برابر با ۱۱/۶، ۱۰/۴ و ۱۲/۶ کیلونیوتن می‌باشد. همانطور که در نمودار شکل ۵-۱۷ مشاهده می‌شود در فاصله‌داری ۱۵ سانتی‌متر نیز به مانند فاصله‌داری ۱۰ سانتی‌متر کمترین مقدار نیرو در شیب ۶۰ درجه و بیشترین آن در ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. در فاصله‌داری‌های کمتر از ۱۰ سانتی‌متر، بهترین عملکرد در جهت‌داری ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. جهت حصول اطمینان از این موضوع، این تحلیل در فاصله‌داری ۲۰ سانتی‌متر نیز صورت خواهد گرفت.



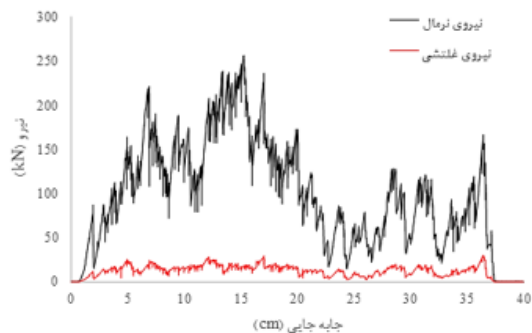
شکل ۵-۱۷: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در شیب‌های مختلف درزه با فاصله داری ۱۵ سانتی‌متر

۵-۱-۴-۵- تأثیر شیب در فاصله‌داری ۲۰ سانتی‌متر

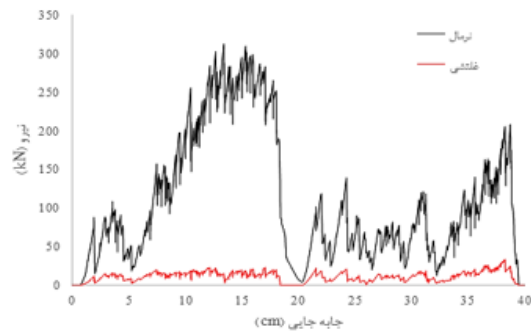
از آنجایی که طول بلوک سنگی ۴۰ سانتی‌متر است در این مرحله از تحلیل تنها امکان اعمال یک درزه وجود دارد. نمای درزه‌ی وارد شده در بلوک با سه شیب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه با فاصله‌داری ۲۰ سانتی‌متر از مرزهای بلوک در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است. نمودارهای نیروی قائم و غلتشی ناشی از حرکت دیسک روی سطح سنگ نیز در شکل ۵-۱۹ نمایان است.



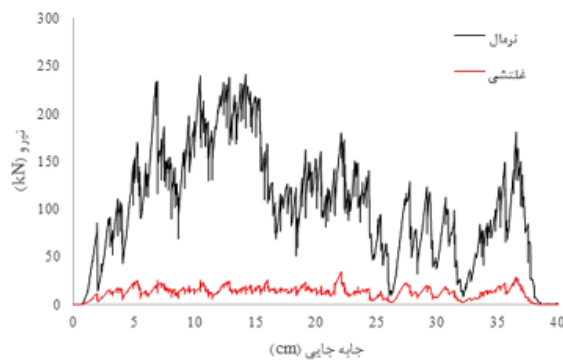
شکل ۵-۱۸: نمای درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با فاصله‌داری ۲۰ سانتی‌متر و زاویه الف) ۳۰ درجه ب) ۶۰ درجه ج) ۹۰ درجه



(ب)



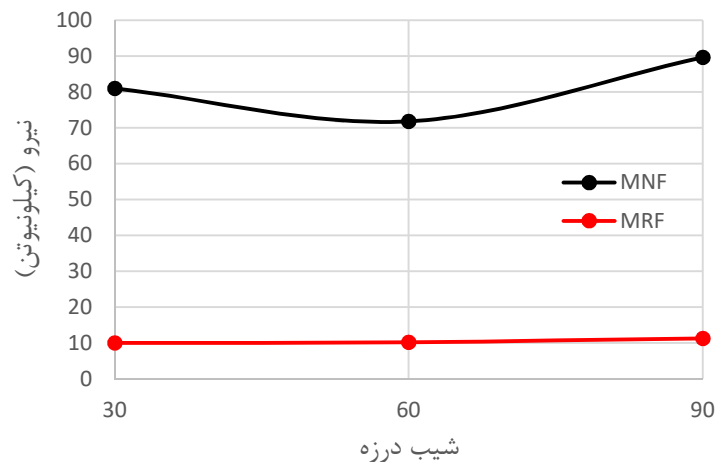
(الف)



(ج)

شکل ۵-۱۹: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با فاصله‌داری ۲۰ سانتی‌متر و زاویه
 (الف) ۳۰ درجه (ب) ۶۰ درجه (ج) ۹۰ درجه

مقادیر نیروی قائم میانگین حاصل از برش برای شیب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب ۱۱۰/۱، ۹۸/۸ و ۱۱۷/۴ کیلونیوتن و مقادیر نیروی غلتشی نیز به ترتیب برابر با ۱۱/۶، ۱۲/۳ و ۱۳/۵ کیلونیوتن می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل، در میان سه مقدار شیب بررسی شده کمترین نیروی میانگین قائم در شیب ۶۰ درجه رخ داده است. این نتیجه مطابق بر نتایج حاصل از دو مرحله‌ی قبل می‌باشد. در نیروی غلتشی نیز به مانند حالات قبل تغییر چندانی رخ نداده است.



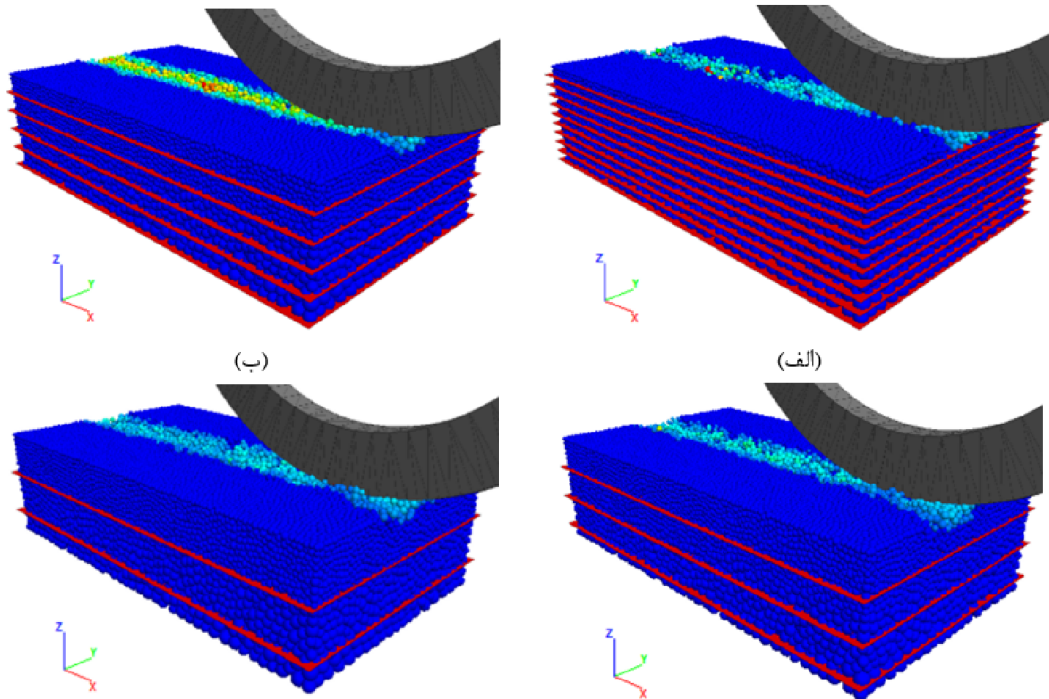
شکل ۵-۲۰: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در شیب‌های مختلف درزه با فاصله‌داری ۲۰ سانتی‌متر

۵-۴-۲- بررسی تأثیر فاصله‌داری درزه

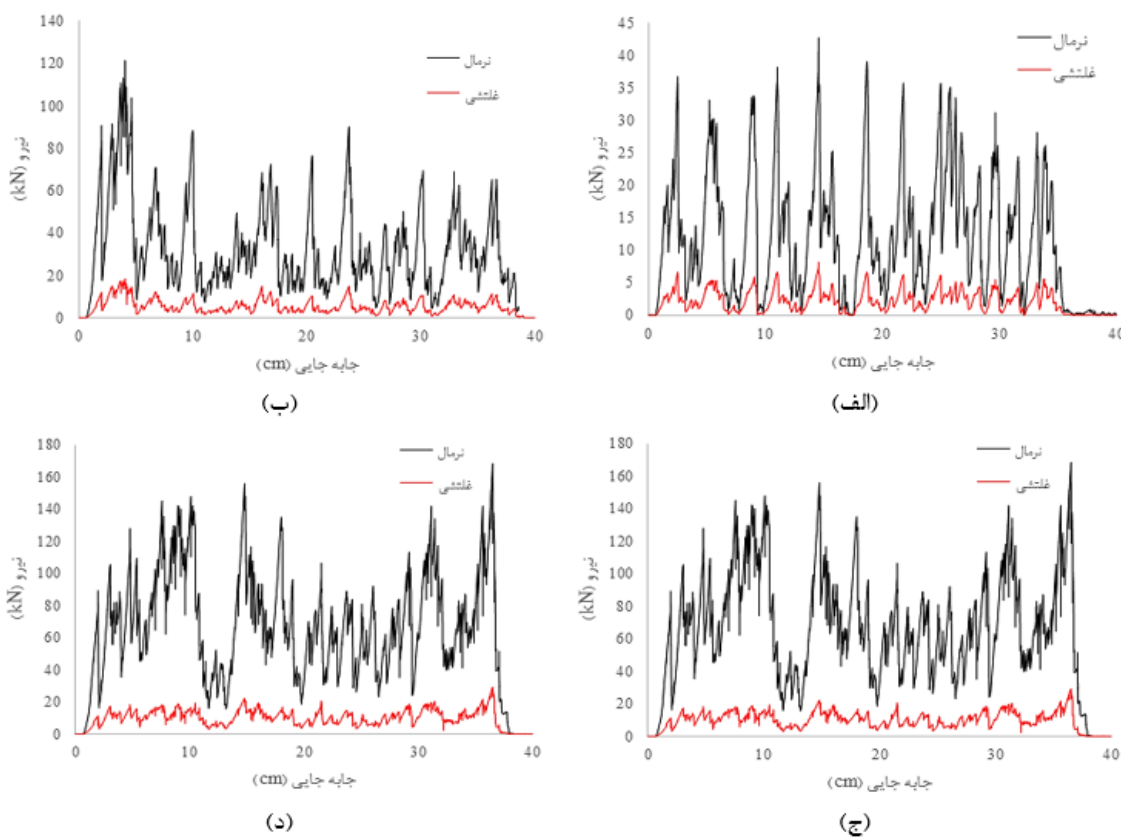
با توجه به یکی از نتایج حاصل از تحلیل تأثیر جهت‌داری درزه‌ها مشخص شد که فاصله‌داری بین درزه‌ها به عنوان دیگر پارامتر هندسی درزه تأثیر بسزایی در عملکرد برش دارد. این پارامتر با توجه به تأثیر مستقیم بر مقاومت توده سنگ و همچنین بهبود در گسترش ترک‌های ناشی از برش دیسک و تشکیل تراشه اهمیت ویژه‌ای دارد. در این تحقیق فاصله‌داری ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر برای شیب صفر درجه و فاصله‌داری ۳، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر برای شیب‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۴-۲-۱- تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها با شیب صفر درجه

در شیب صفر درجه درزه‌ها با فاصله‌داری کمی نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. تصویر درزه‌ها و نمودارهای نیرو-جابجایی ناشی از برش در این مرحله به ترتیب در شکل ۵-۲۱ و شکل ۵-۲۲ ارائه شده‌اند.

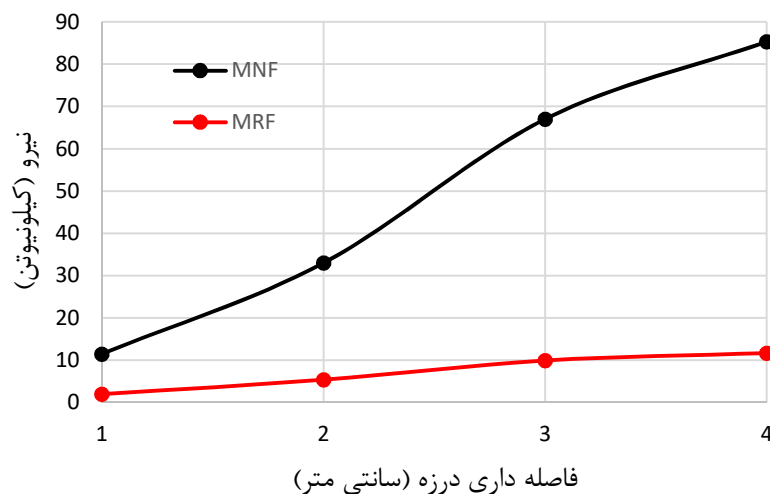


شکل ۵-۲۱: نمای درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با شیب صفر درجه و فاصله‌داری الف) ۱ سانتی‌متر (ب) ۲ سانتی‌متر (ج) ۳ سانتی‌متر (د) ۴ سانتی‌متر



شکل ۵-۲۲: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با شیب صفر درجه و فاصله‌داری الف) ۱ سانتی‌متر (ب) ۲ سانتی‌متر (ج) ۳ سانتی‌متر (د) ۴ سانتی‌متر

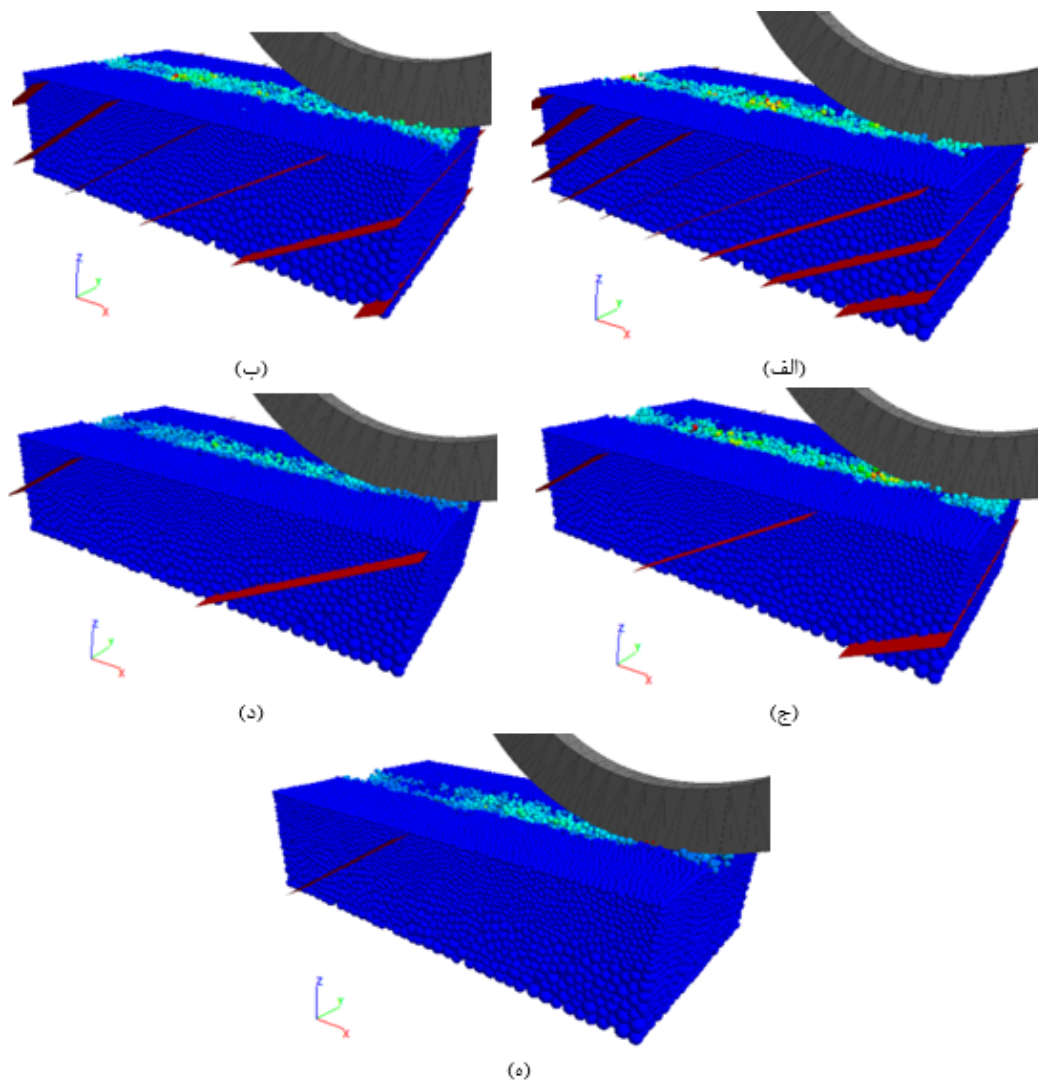
با توجه به نتایج حاصل از برش سنگ توسط دیسک در این مرحله نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در کمترین فاصله‌داری یعنی ۱ سانتی‌متر به ترتیب ۱۱/۵ و ۲ کیلونیوتن و در فاصله‌داری ۴ سانتی‌متر به ترتیب ۸۵/۳ و ۱۱/۷ کیلونیوتن می‌باشد. این نتایج به معنای اختلافی بسیار زیاد در نیروی‌های وارد به دیسک و عملکرد ابزار برش با افزایش فاصله‌داری بین درزه‌ها از ۱ به ۴ سانتی‌متر است (شکل ۵-۲۳). اما اینکه این اختلاف در فواصل بزرگتر نیز وجود دارد و یا تغییر شیب بر درزه‌ها بر تأثیر فاصله‌داری اثرگذار است یا خیر، به بررسی عملکرد برش در فاصله‌داری‌های بزرگتر در شیب‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه وابسته است.



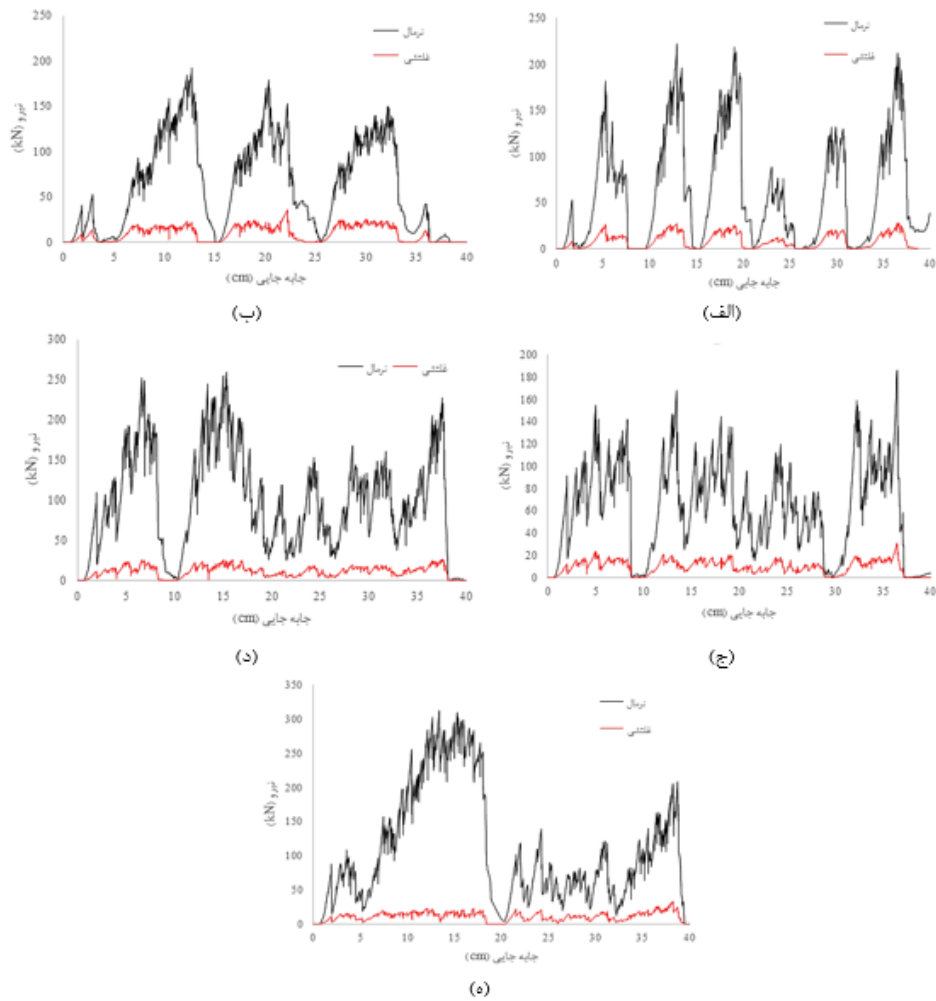
شکل ۵-۲۳: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در فواصل مختلف درزه با شیب صفر درجه

۵-۴-۲- تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها با شیب ۳۰ درجه

در مقادیر شیب ۳۰ درجه و بیشتر از آن، به دلیل رفع محدودیت ارتفاع نمونه در فاصله‌داری‌های بزرگ، از فاصله‌داری‌های ۳، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است تا تأثیر افزایش فاصله‌داری درزه‌ها در فواصل بزرگتر نیز مشخص شود. تصاویر درزه‌های اعمال شده و نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از هر برش به ترتیب در شکل ۵-۲۴ و شکل ۵-۲۵ قابل مشاهده است.



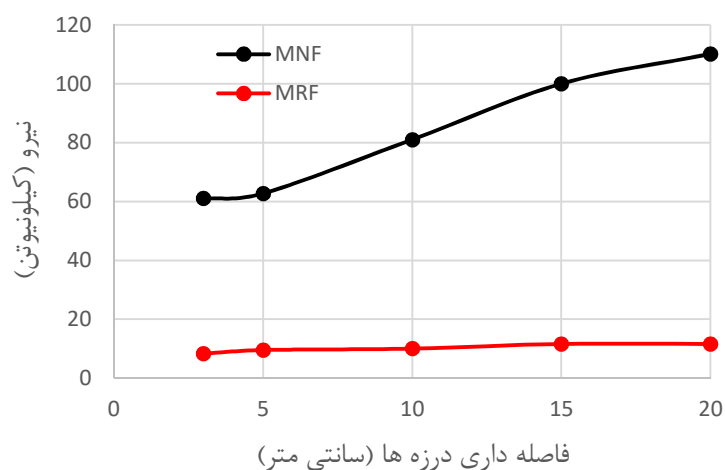
شکل ۵-۲۴: نمای درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با شیب ۳۰ درجه و فاصله‌داری الف) ۳ سانتی‌متر
 ب) ۵ سانتی‌متر ج) ۱۰ سانتی‌متر د) ۱۵ سانتی‌متر ه) ۲۰ سانتی‌متر



شکل ۵-۲۵: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با شیب ۳۰ درجه و فاصله‌داری الف) ۳ سانتی‌متر (ب) ۵ سانتی‌متر (ج) ۱۰ سانتی‌متر (د) ۱۵ سانتی‌متر (ه) ۲۰ سانتی‌متر. مقادیر نیروهای قائم و غلتشی میانگین حاصل از هر برش در جدول ۵-۳ آورده شده است. با توجه به این مقادیر، نیروی قائم با افزایش فاصله‌داری همچنان روندی افزایشی دارد اما نیروی غلتشی تقریباً دچار تغییر چشم‌گیری نمی‌شود (شکل ۵-۲۶).

جدول ۵-۳: مقادیر نیروی حاصل از برش در حالت درزه داری با شیب ۳۰ درجه

نیرو (kN)	فاصله داری (cm)				
میانگین نیروی قائم	۶۱	۶۲/۷	۸۱	۱۰۰	۱۱۰/۱
میانگین نیروی غلتشی	۸/۳	۹/۵	۱۰	۱۱/۶	۱۱/۶

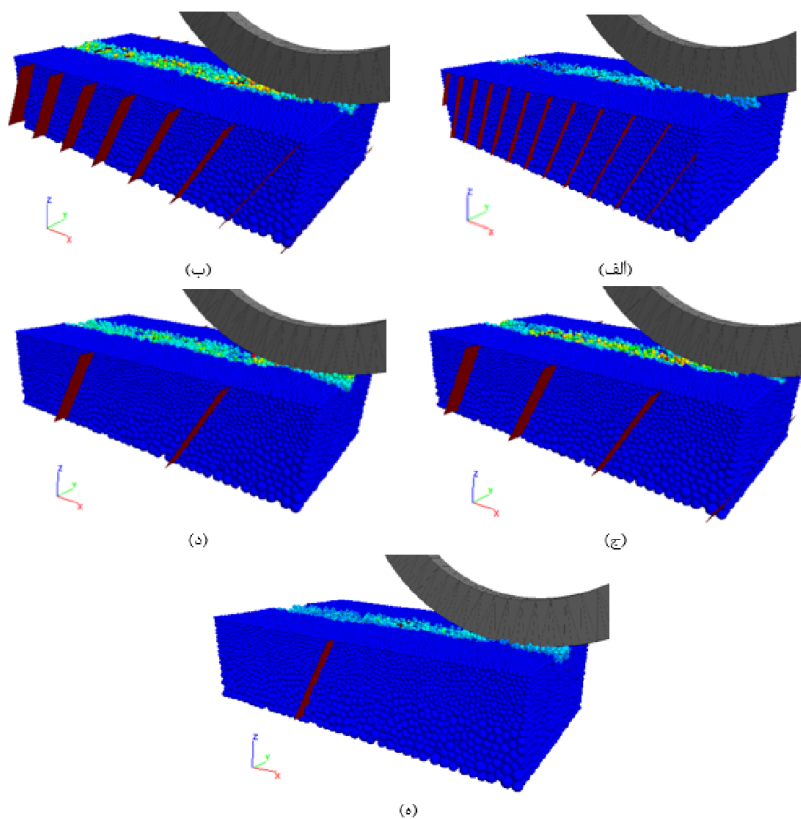


شکل ۵-۲۶: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در فواصل مختلف درزه با شیب ۳۰ درجه

۵-۴-۲-۳- تأثیر فاصله داری درزه ها با شیب ۶۰ درجه

تصویر درزه ها و نمودارهای نیرو-جابجایی ناشی از برش در شیب ۶۰ درجه و فاصله داری های مختلف

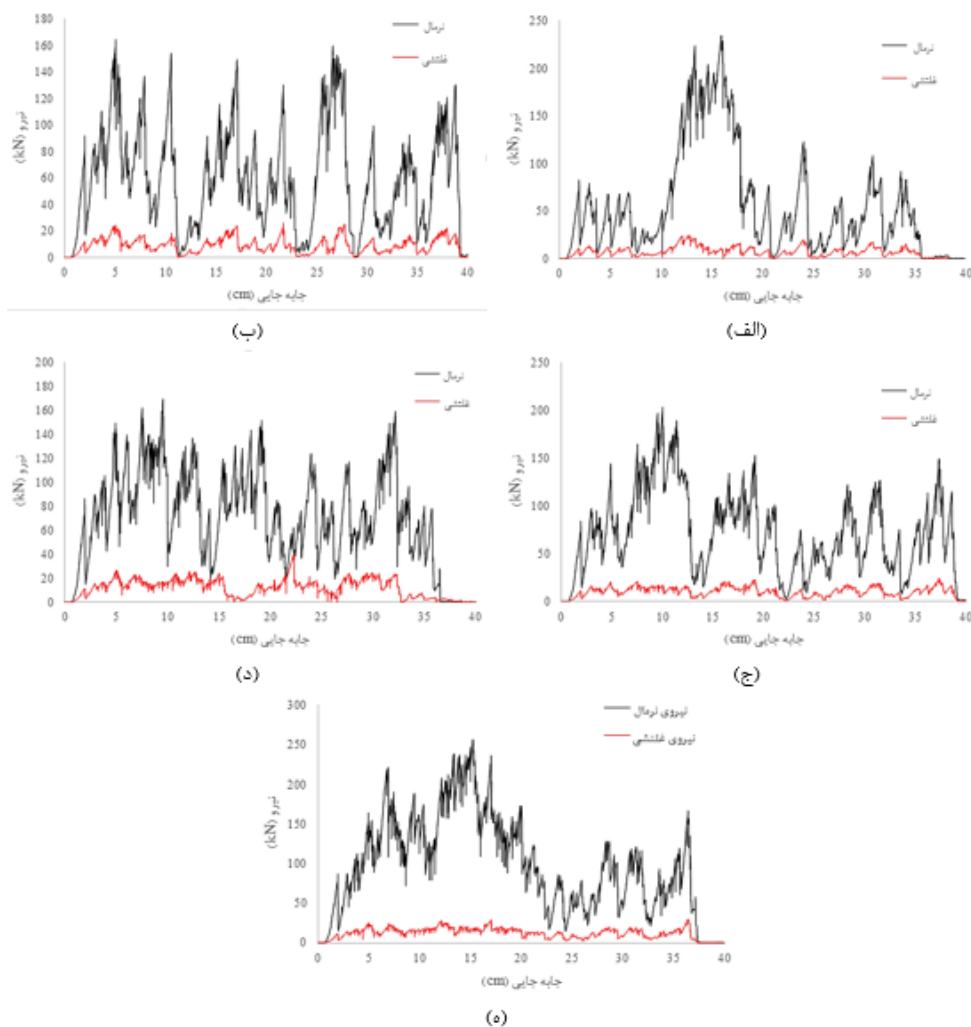
به ترتیب در شکل ۵-۲۷ و شکل ۵-۲۸ ارائه شده اند.



شکل ۵-۲۷: نمای درزه های اعمال شده در بلوک سنگی با شیب ۶۰ درجه و فاصله داری (الف) ۳ سانتی متر

(ب) ۵ سانتی متر (ج) ۱۰ سانتی متر (د) ۱۵ سانتی متر (ه) ۲۰ سانتی متر

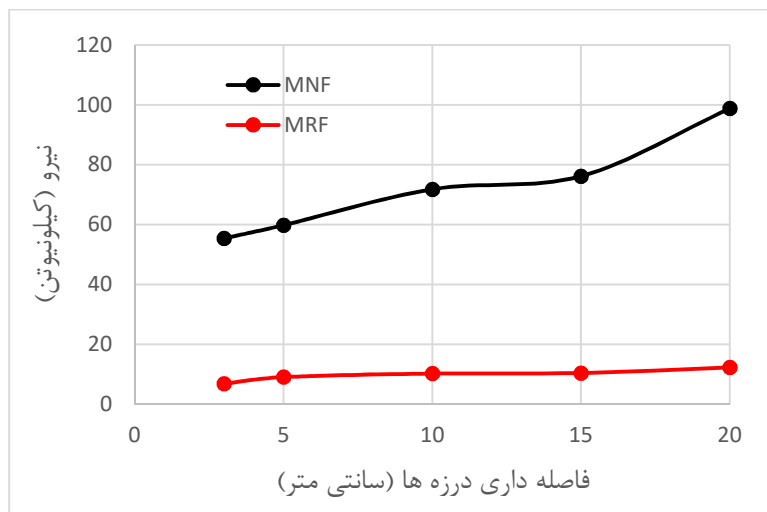
در این بخش از تحلیل درزه مشاهده می‌شود که نیروهای قائم و غلتشی همچنان با افزایش فاصله میان درزه‌ها افزایش می‌یابند. البته شیب افزایش نیروی غلتشی بسیار کمتر از نیروی قائم است. همچنین با دقت در مقادیر نیروی قائم در محدوده‌ی فاصله‌داری ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر (جدول ۴-۵) و همچنین با مشاهده‌ی نمودار شکل ۵-۲۸ مشخص می‌شود سطح نمودار در این محدوده نسبت به جهت‌داری ۳۰ درجه کاهش یافته‌است. البته این کاهش سطح نمودار در محدوده ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر شدیدتر است.



شکل ۵-۲۸: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با شیب ۶۰ درجه و فاصله‌داری الف) ۳ سانتی‌متر ب) ۵ سانتی‌متر ج) ۱۰ سانتی‌متر د) ۱۵ سانتی‌متر ه) ۲۰ سانتی‌متر

جدول ۴-۵: مقادیر نیروی حاصل از برش در حالت درزه داری با شیب ۶۰ درجه

۲۰	۱۵	۱۰	۵	۳	فاصله داری (cm) / نیرو (kN)
۹۸/۸	۷۶/۸	۷۱/۸	۵۹/۸	۵۵/۴	میانگین نیروی قائم
۱۲/۳	۱۰/۴	۱۰/۲	۹	۶/۸	میانگین نیروی غلتشی



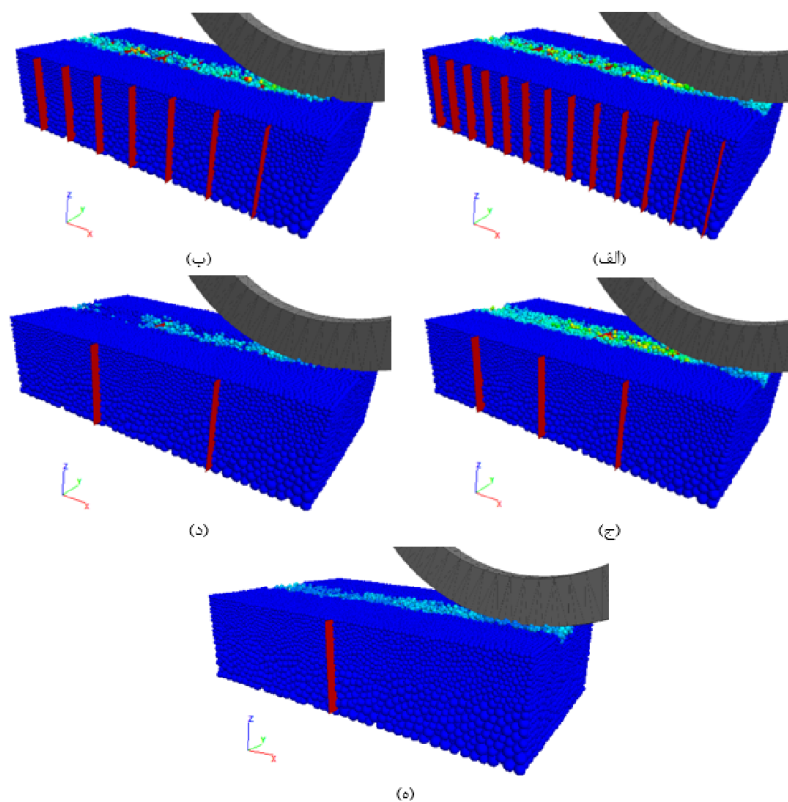
شکل ۵-۲۹: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در فواصل مختلف درزه با شیب ۶۰ درجه

۵-۴-۲-۴- تأثیر فاصله داری درزه‌ها با شیب ۹۰ درجه

در شیب ۹۰ درجه که درزه عمود بر امتداد حرکت دیسک قرار می‌گیرند، درزه‌هایی با فاصله داری های ۳، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی متر استفاده شده است، تا روند تغییرات نیرو به ازای افزایش فاصله داری درزه‌ها در این حالت نیز مشخص شود. تصاویر درزه‌های اعمال شده و نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از هر برش به ترتیب در شکل ۵-۳۰ و شکل ۵-۳۱ قابل مشاهده است.

نیروهای وارد به دیسک در این حالت در جدول ۵-۵ ارائه شده است. همانطور که از نتایج پیداست، مشابه نتایج تحلیل در شیب‌های کوچکتر، تغییرات نیروهای اعمالی به دیسک با افزایش فاصله داری رابطه‌ای مستقیم دارد (شکل ۵-۳۲). اما در شیب ۹۰ درجه مقادیر نیرو در فاصله داری ۱۰ تا ۲۰ سانتی متر بیشترین مقدار را نسبت به نیروهای حاصل در شیب‌های دیگر دارند. همچنین بیشترین مقدار نیروی قائم در شیب ۹۰ درجه که در فاصله داری ۲۰ سانتی متر اتفاق افتاده مقداری نزدیک به نیروی

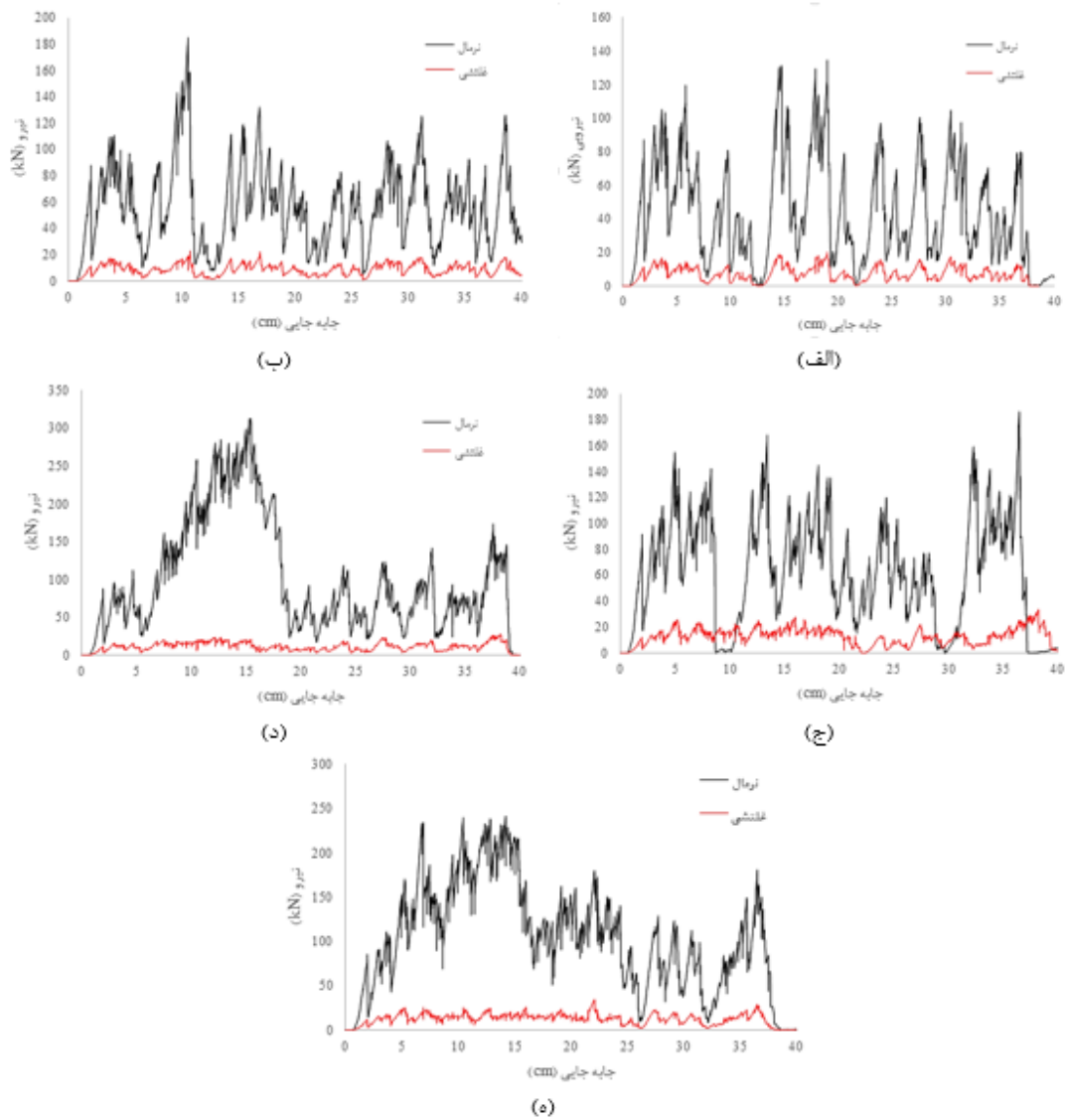
قائم میانگین در حالت برش در سنگ بکر (۱۲۸ کیلونیوتن) است. که می توان نتیجه گرفت در فاصله-داری بیش از ۱۵ سانتی متر بین درزه‌ها تأثیر درزه در بهبودی عملکرد برش کاهش می یابد. البته اثبات این موضوع به طور دقیق نیاز به بررسی فاصله‌داری‌های بزرگتر دارد که با توجه به محدودیت ابعاد مدل در این تحقیق، بررسی آن ممکن نخواهد بود.



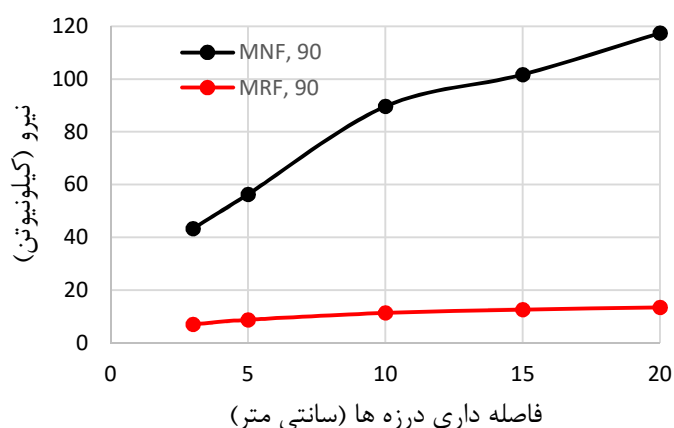
شکل ۵-۳۰: نمای درزه‌های اعمال شده در بلوک سنگی با شیب ۹۰ درجه و فاصله‌داری الف) ۳ سانتی‌متر (ب) ۵ سانتی‌متر (ج) ۱۰ سانتی‌متر (د) ۱۵ سانتی‌متر (ه) ۲۰ سانتی‌متر

جدول ۵-۵: مقادیر نیروی حاصل از برش در حالت درزه داری با شیب ۹۰ درجه

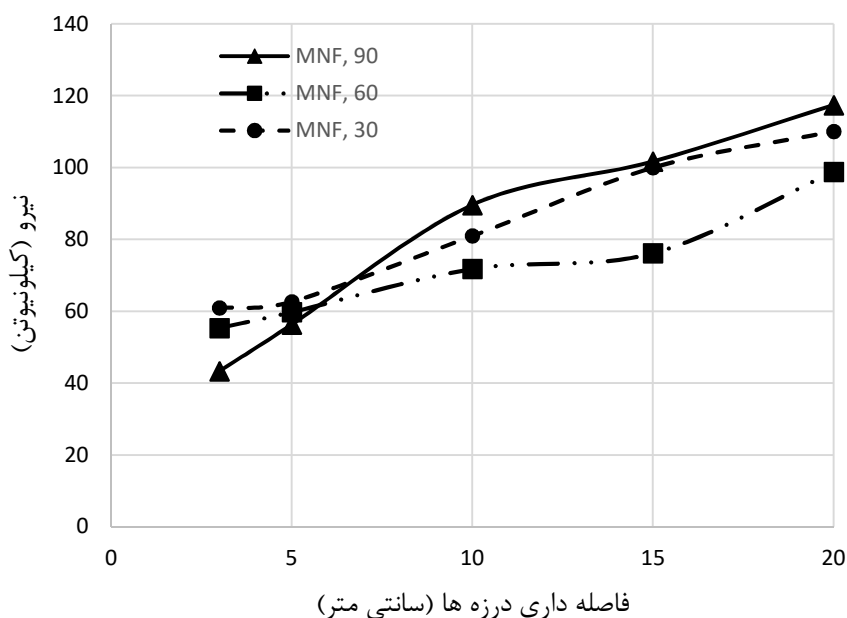
۲۰	۱۵	۱۰	۵	۳	نیرو (kN) / فاصله داری (cm)
۱۱۷/۴	۱۰۱/۷	۸۹/۳	۵۶/۳	۴۳/۳	میانگین نیروی قائم
۱۳/۵	۱۲/۶	۱۱/۳	۸/۸	۷	میانگین نیروی غلتشی



شکل ۵-۳۱: نمودار نیروی-جابجایی در بلوک سنگی دارای درزه‌هایی با شیب ۹۰ درجه و فاصله‌داری الف) ۳ سانتی‌متر ب) ۵ سانتی‌متر ج) ۱۰ سانتی‌متر د) ۱۵ سانتی‌متر ه) ۲۰ سانتی‌متر



شکل ۵-۳۲: تغییرات نیروی قائم و غلتشی وارد به دیسک در فواصل مختلف درزه با شیب ۹۰ درجه



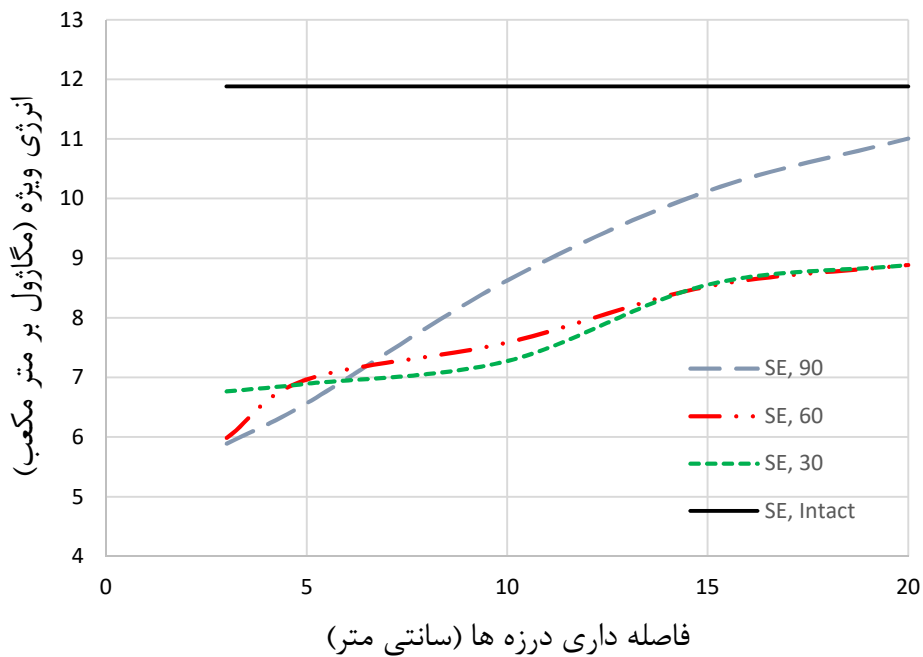
شکل ۵-۳۳: نمودارهای نیروی قائم در فاصله داری های مختلف برای سه شیب درزه ۳۰، ۶۰ و ۹۰

۵-۴-۳- بررسی تأثیر درزه‌داری بر انرژی ویژه

همانطور که قبلاً اشاره شد در این مطالعه انرژی ویژه بر اساس رابطه‌ی ۲-۵ بدست می‌آید. به طوری که حجم سنگ خرد شده در واقع حجم تعداد ذره یا توپی است که در اثر فشار دیسک بر سطح سنگ تماسش با دیگر ذرات قطع شده و از بلوک جدا می‌شود. نیروی غلتشی نیز در واقع نیروی غلتشی میانگین (MRF) ناشی از هر برش در مراحل مختلف است. مقادیر انرژی ویژه مربوط به هر برش به طور

کلی در جدول ۲-۵ در ابتدای همین فصل ارائه شد.

با توجه به نمودار شکل ۳۴-۵ مشاهده می‌شود انرژی ویژه مورد نیاز با افزایش فاصله داری درزه، افزایش می‌یابد و این روند تغییرات برای هر سه شیب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه صادق است. البته لازم به ذکر است که شیب تغییرات برای جهت‌داری ۹۰ درجه بسیار تند تر از حالات دیگر است به طوری که در فاصله داری ۲۰ سانتی متر به مقدار زیادی به انرژی ویژه سنگ بکر (۱۱/۸۸ مگاژول بر مترمکعب) نزدیک شده است و این می‌تواند بیانگر تأثیر زیاد درزه‌داری با شیب ۹۰ درجه بر نیروهای غلتشی وارد بر دیسک و در نتیجه کاهش بازدهی عملکرد برش در این شیب باشد.



شکل ۳۴-۵: نمودار تأثیر فاصله داری درزه در شیب های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روی انرژی ویژه

۵-۵- جمع بندی

در این فصل با توجه به اهداف پژوهش، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی درزه بر عملکرد برش دیسک و در نتیجه خردایش سنگ پرداخته شد. برای تحقق این امر درزه‌هایی با شیب صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ در فاصله‌داری‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این قسمت از مطالعه در دو بخش مجزای تأثیر جهت‌داری و تأثیر فاصله‌داری بر عملکرد برش با بررسی پارامترهای کنترلی نیروی قائم، نیروی غلتشی و انرژی ویژه صورت گرفت. بررسی نیروهای نرمال نشان می‌دهد که وابستگی نیروی قائم به جهت‌داری به‌طور نسبی است و در فاصله‌داری‌های بیش از ۱۰ سانتی‌متر مشخص می‌شود. این در حالی است که نیروی قائم به فاصله‌داری خیلی وابسته است و با افزایش فاصله‌داری افزایش می‌یابد. از سوی دیگر وابستگی نیروی غلتشی به جهت‌داری و فاصله‌داری چندان محسوس نمی‌باشد. همچنین می‌توان دریافت که وابستگی عملکرد ابزار برش به جهت‌داری باید در فاصله‌داری بیش از ۱۰ سانتی‌متر بررسی شود، زیرا در فاصله‌داری‌های کمتر از ۱۰ سانتی‌متر توده سنگ در شرایط بسیار خرد شده قرار دارد و جهت‌داری درزه‌ها تأثیر منظمی بر انرژی ویژه ندارد.

فصل ششم

پیچگیری و شهادت

۶-۱- نتیجه گیری

در این پژوهش فرآیند خردایش سنگ سخت توسط برش‌دهنده‌ی دیسکی با تمرکز بر تأثیر پارامترهای هندسی درزه بر عملکرد دیسک با استفاده از روش عددی المان مجزا مورد ارزیابی قرار گرفت. فرآیند خردایش در سنگ توسط دیسک‌های برش‌دهنده با تولید و گسترش ترک میان دیسک‌ها و تولید تراشه محقق می‌گردد و وجود درزه نیز به طور مستقیم بر این فرآیند اثرگذار است. از طرفی نرم‌افزار PFC دارای قابلیت شبیه‌سازی رشد ترک و همچنین توانایی مدل کردن تخریب تحت تأثیر تغییرات تنش و شرایط ناپیوستگی‌ها در حین فرآیند تحلیل می‌باشد. بنابراین کد جریان ذرات (PFC) به عنوان بهترین ابزار جهت شبیه‌سازی فرآیند خردایش سنگ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. به منظور پیشبرد اهداف این تحقیق ابتدا برای اطمینان از صحت فرآیند مدلسازی عددی، خردایش سنگ بکر به عنوان یک مدل مرجع، مدلسازی شد. سپس نتایج حاصل با نتایج آزمایش LCM انجام شده روی گرانیت قرمز کلورادو مورد مقایسه قرار گرفت. در ادامه با اعمال درزه در مدل به بررسی سناریوهای مختلف درزه‌داری بر فرآیند خردایش در مدل عددی پرداخته شد.

۶-۱-۱- نتایج مدلسازی در سنگ بکر

در بخش از تحقیق، پارامترهای هندسی برش شامل فاصله‌داری و عمق نفوذ دیسک برش‌دهنده روی نیروهای اعمالی بر دیسک در سنگ بکر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل با نتایج آزمون آزمایشگاهی برش خطی انجام شده روی سنگ گرانیت قرمز کلورادو مقایسه شد. نتایج ذیل خلاصه‌ی یافته‌های حاصل از بررسی‌های انجام شده در این بخش است:

- دو پارامتر عمق نفوذ دیسک و فاصله‌داری دو دیسک از یکدیگر با نیروهای اعمالی به دیسک که پارامترهای خروجی این مطالعه بوده رابطه‌ی مستقیم دارند. به طوری که نیروهای قائم و غلتشی با افزایش عمق نفوذ در هر برش بدون در نظر گرفتن اثر برش جاتی، افزایش می‌یابند.

- همچنین با مقایسه‌ی نیروهای حاصل از برش‌های اولیه و ثانویه مشاهده می‌شود نیروی‌های وارد به دیسک در برش‌های ثانویه به دلیل وجود زون شکسته‌ی جانبی، کمتر می‌باشد. اما با افزایش فاصله‌ی میان دو برش مقدار نیروهای اعمالی به دیسک مجدداً زیاد می‌شوند.
- در آخر با مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدلسازی عددی و نتایج آزمایش برش خطی روی سنگ گرانیت قرمز کلورادو مشاهده می‌شود که نتایج مدلسازی و آزمایشگاهی از تطابق قابل قبولی برخوردار است و اختلاف موجود می‌تواند ناشی از ساده‌سازی‌هایی چون صلب فرض کردن دیسک برش‌دهنده، بزرگی ابعاد ذرات و کوچک بودن ابعاد مدل‌سنگی نسبت به مدل واقعی باشد.

۶-۱-۲- نتایج مدلسازی در سنگ درزه‌دار

در این بخش به بررسی پارامترهای هندسی درزه و تأثیر آن بر عملکرد برش دیسک پرداخته شد. برای تحقق این امر درزه‌هایی با شیب صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ در فاصله‌داری‌های متفاوت با مقاومت درزه، بازشدگی و پایایی ثابت (کاملاً ناپایا) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این قسمت از مطالعه در دو بخش مجزای تأثیر جهت‌داری و تأثیر فاصله‌داری بر عملکرد برش با بررسی پارامترهای کنترلی نیروی قائم، نیروی غلتشی و انرژی ویژه صورت گرفت. اما نتایج این دو بخش از یکدیگر مستقل نبوده و کاملاً همپوشانی دارد.

نتایج حاصل از مطالعه‌ی سناریوهای مختلف درزه‌داری نشان می‌دهد:

- تأثیر تغییرات شیب درزه نسبت به امتداد حرکت دیسک بر نیروی غلتشی دیسک ناچیز و قابل اغماض است اما تغییرات نیروی قائم کاملاً محسوس و به گونه‌ای است که در فاصله‌داری صفر تا ۱۰ سانتی‌متر با فاصله‌داری‌های بیش از ۱۰ سانتی‌متر متفاوت است. به طوریکه در فاصله‌داری‌های کوچکتر از ۱۰ سانتی‌متر، بهترین عملکرد ابزار برش در زاویه‌ی ۹۰ درجه‌ی درزه‌ها نسبت به امتداد حرکت دیسک رخ می‌دهد اما هنگامی که فاصله‌داری

بین درزه‌ها بیش از ۱۰ سانتی‌متر باشد بهترین عملکرد ابزار برش دیسک در زاویه‌ی ۶۰ درجه‌ی درزه‌ها حاصل می‌شود.

- همچنین با تمرکز بر فاصله‌داری درزه و تغییرات آن مشاهده می‌شود فاصله‌داری نسبت به شیب تأثیر بیشتری بر نیروی غلتشی وارد بر دیسک دارد. با افزایش فاصله‌داری بین درزه‌ها نیروهای برشی افزایش یافته است. این موضوع بیانگر کاهش بازدهی ابزار برش به ازای افزایش فاصله میان درزه‌ها است. البته با توجه به بازه‌ی بزرگ تغییرات میانگین نیروی قائم در زوایای صفر و ۹۰ درجه می‌توان گفت فاصله‌داری در این زوایا از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است.

- در انتها انرژی ویژه مورد نیاز نیز با در نظر گرفتن پارامتر حجم سنگ کنده شده مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی نتایج حاصل از این بخش می‌توان دریافت که وابستگی عملکرد ابزار برش به جهت داری باید در فاصله‌داری بیش از ۱۰ سانتی‌متر بررسی شود، زیرا در فاصله‌داری‌های کمتر از ۱۰ سانتی‌متر توده سنگ در شرایط بسیار خرد شده قرار دارد و جهت داری درزه‌ها تأثیر منظمی بر انرژی ویژه ندارد.

۶-۲- پیشنهادات

۱- در بررسی خردایش سنگ تحت نفوذ دیسک با روش برش خطی زاویه‌ی امتداد درزه‌ها با امتداد حرکت دیسک همچنان ثابت است. در حالیکه با توجه به نفوذ ماشین حفاری طی حرکت دورانی کله‌ی حفار بر سطح سنگ در واقعیت دیسک برش‌دهنده در هر لحظه از چرخش کله حفاری زاویه برخورد دیسک با درزه نسبت به قبل متفاوت است. لذا پیشنهاد می‌شود این مدلسازی با بررسی پارامترهای هندسی درزه طی حرکت دورانی دیسک انجام پذیرد.

۲- در این تحقیق پارامتر مقاومتی میکرو درزه با دقت بسیاری تعدیل شد. اما با توجه عنوان تحقیق، این پارامتر به صورت ثابت در نظر گرفته شد. بنابراین از آنجایی که ممکن است تغییر این پارامتر بر نتایج حاصل از تحقیق حاضر شود پیشنهاد می‌شود تأثیر پارامتر مقاومتی درزه نیز بر خردایش سنگ در ادامه‌ی این تحقیق مورد بررسی قرار گیرد.

- امیری حسینی، خ.، ۱۳۹۵، تعیین پارامترهای مقاومت برشی سنگ‌های معدن شماره یک گل گهر. فصلنامه پژوهشی پژوهشگر، شماره ۱۸
- حسن پور، ج.، رستمی، ج.، عملکرد ماشین‌های تونل‌بری در سنگ سخت، انتشارات فن آریا
- Aeberli, U., & Wanner, W. J. (1978). On the influence of discontinuities at the application of tunneling machines. In Proceedings of the 3rd international congress IAEG, Madrid (pp. 7-14).
- Altindag, R. (2003). Correlation of specific energy with rock brittleness concepts on rock cutting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 103(3), 163-171.
- Bahaaddini, M., Sharrock, G., & Hebblewhite, B. K. (2013). Numerical investigation of the effect of joint geometrical parameters on the mechanical properties of a non-persistent jointed rock mass under uniaxial compression. *Computers and Geotechnics*, 49, 206-225.
- Bamford, W. E. (1984). Rock test indices are being successfully correlated with tunnel boring machine performance. In *Fifth Australian Tunnelling Conference: State of the Art in Underground Development and Construction; Preprints of Papers* (p. 218). Institution of Engineers, Australia.
- Barton, N. R. (2000). *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*. CRC Press.
- Bartz Website: <http://www.bartz.es>
- Benato, A., & Oreste, P. (2015). Prediction of penetration per revolution in TBM tunneling as a function of intact rock and rock mass characteristics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 74, 119-127.
- Bieniawski, Z. T., Celada, B., Galera, J. M., & Tardáguila, I. (2008, June). New

- applications of the excavability index for selection of TBM types and predicting their performance. In Proceedings of the World Tunnel Congress, Akra, India (pp. 1618-1629).
- Bieniawski, Z. T., Celada, B., Galera, J. M., & Tardáguila, I. (2008, June). New applications of the excavability index for selection of TBM types and predicting their performance. In Proceedings of the World Tunnel Congress, Akra, India (pp. 1618-1629).
- Bruland, A. (2000). Hard rock tunnel boring (Doctoral dissertation, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi).
- Buchi, E. (1984). Einfluss geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine. Inauguraldissertation, Philosophisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Bern, 136.
- Cassinelli, F., Cina, S., & Innaurato, N. (1983, February). Power consumption and metal wear in tunnel-boring machines: analysis of tunnel-boring operation in hard rock: In: Tunneling 82, Proceedings of the 3rd International Symposium, Brighton, 7–11 June 1982, P 73–81. Publ London: IMM, 1982. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 20, No. 1, p. A25). Pergamon.
- Cassinelli, F., Cina, S., & Innaurato, N. (1983, February). Power consumption and metal wear in tunnel-boring machines: analysis of tunnel-boring operation in hard rock: In: Tunneling 82, Proceedings of the 3rd International Symposium, Brighton, 7–11 June 1982, P 73–81. Publ London: IMM, 1982. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 20, No. 1, p. A25). Pergamon.
- Chang, S. H., Choi, S. W., Bae, G. J., & Jeon, S. (2006). Performance prediction of TBM disc cutting on granitic rock by the linear cutting test. *Tunnelling and underground space technology*, 21(3), 271.
- Cho, J. W., Yu, S. H., Jeon, S. W., & Chang, S. H. (2008). Numerical study on rock fragmentation by TBM disc cutter. *Journal of Korean Tunnelling and Underground*

Space Association, 10(2), 139-152.

Choi, S. O., & Lee, S. J. (2015). Three-dimensional numerical analysis of the rock-cutting behavior of a disc cutter using particle flow code. *KSCE Journal of Civil engineering*, 19(4), 1129-1138.

Choi, S. O., & Lee, S. J. (2016). Numerical study to estimate the cutting power on a disc cutter in jointed rock mass. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), 440-451.

CIMNE Website: www.cimne.com

Delisio, A., Zhao, J., & Einstein, H. H. (2013). Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Löttschberg Base Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 131-142.

Entacher, M. (2013). Measurement and interpretation of disc cutting forces in mechanized tunneling. Diss., Leoben, Montanuniversität, Lehrst. f. Subsurface Engineering.

Farmer, I. W., & Glossop, N. H. (1980). Mechanics of disc cutter penetration. *Tunnels and Tunnelling*, 12(6), 22-25.

Gehring, K. (1997). Classification of drillability, cuttability, borability and abrasivity in tunnelling. *Felsbau*, 15(3), 183-191.

Gertsch, R., Gertsch, L., & Rostami, J. (2007). Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction. *International Journal of rock mechanics and mining sciences*, 44(2), 238-246.

Gong, Q. M., Jiao, Y. Y., & Zhao, J. (2006). Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(1), 46-55.

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

Graham, P. C. (1976). Rock exploration for machine manufacturers. *Exploration for rock engineering*, 173-80.

- Hamidi, J. K., Shahriar, K., Rezai, B., & Rostami, J. (2010). Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 333-345.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Khamsehchiyan, M., & Bruland, A. (2009). Developing new equations for TBM performance prediction in carbonate-argillaceous rocks: a case history of Nowsood water conveyance tunnel. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 4(4), 287-297.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Khamsehchiyan, M., Bruland, A., & Tavakoli, H. R. (2010). TBM performance analysis in pyroclastic rocks: a case history of Karaj water conveyance tunnel. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(4), 427-445.
- Herrenknecht A. G. Website: www.herrenknecht.com
- Howarth, D. F. (1981, January). The effect of jointed and fissured rock on the performance of tunnel boring machines. In *ISRM International Symposium*. International Society for Rock Mechanics.
- Howarth, F. F. (1982). Some fundamental aspects of the use of disc cutters in hard-rock excavation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 82(11), 309-315.
- Hughes, H. M. (1986). The relative cuttability of coal-measures stone. *Mining Science and Technology*, 3(2), 95-109.
- Innaurato, N., Mancini, A., Rondena, E., & Zaninetti, A. (1991, January). Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy. In *7th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2013). "PFC (Particle Flow Code)." <http://www.itascacg.com/software/pfc>.
- Jain, P., Naithani, A. K., & Singh, T. N. (2014). Performance characteristics of tunnel boring machine in basalt and pyroclastic rocks of Deccan traps—A case study. *Journal of Rock mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(1), 36-47.
- Koyama, T., & Jing, L. (2007). Effects of model scale and particle size on micro-

- mechanical properties and failure processes of rocks—a particle mechanics approach. *Engineering analysis with boundary elements*, 31(5), 458-472.
- Labra, C. A. (2012). Advances in the development of the discrete element method for excavation processes.
- Lindqvist, P. A., & Hai-Hui, L. (1983). Behaviour of the crushed zone in rock indentation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 16(3), 199-207.
- Lislerud, A. (1997). Principles of mechanical excavation (pp. 97-12). Posiva.
- Ma, H. S., Yin, L. J., Gong, Q. M., & Wang, J. (2013). Experimental Study on the Effect of Joint Spacing on Fragmentation Modes and Penetration Rate under TBM Disc Cutters. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 353, pp. 890-894). Trans Tech Publications.
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., & Herrenknecht, M. (2008). *Hardrock tunnel boring machines*. John Wiley & Sons.
- Nelson, P., O'Rourke, T. D., & Kulhawy, F. H. (1983, January). Factors affecting TBM penetration rates in sedimentary rocks. In *The 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.
- Odonne, F., Lézin, C., Massonnat, G., & Escadeillas, G. (2007). The relationship between joint aperture, spacing distribution, vertical dimension and carbonate stratification: An example from the Kimmeridgian limestones of Pointe-du-Chay (France). *Journal of Structural Geology*, 29(5), 746-758.
- Palmstrom, A. (1995). RMI—a rock mass characterization system for rock engineering purposes. na.
- Poisel, R., Tentschert, E., Preh, A., Ostermann, V., Chwatal, W., & Zettler, A. (2010). The interaction of machine and rock mass analysed using TBM data and rock mass parameters/. *Interaktion Maschine-Gebirge analysiert mittels TBM-Daten und Gebirgskennwerten*. *Geomechanics and Tunnelling*, 3(5), 510-519.
- Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 41(8), 1329-1364.

- Ramezanzadeh, A. (2005). Performance analysis and development of new models for performance prediction of hard rock TBMs in rock mass (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).
- 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 (Doctoral dissertation, Colorado School of Mines).
- Rostami, J., & Ozdemir, L. (1993, June). A new model for performance prediction of hard rock TBMs. In Proceedings of the rapid excavation and tunneling conference (pp. 793-793). SOCIETY FOR MINING, METALLOGY & EXPLORATION, INC.
- Rostami, J., Gertsch, R., & Gertsch, L. (2002, July). Rock fragmentation by disc cutter: a critical review and an update. In Proceedings of North American rock mechanics symposium (NARMS'02), Toronto, Ontario.
- Rostami, J., Ozdemir, L., & Nilson, B. (1996, May). Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models. In Proceedings of Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling Technology, Las Vegas (pp. 1-10).
- Roxborough, F. F., & Phillips, H. R. (1975, December). Rock excavation by disc cutter. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 12, No. 12, pp. 361-366). Pergamon.
- Sanio, H. P. (1985, June). Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 22, No. 3, pp. 153-161). Pergamon.
- Wilfing, L. S. F. (2016). The Influence of Geotechnical Parameters on Penetration Prediction in TBM Tunneling in Hard Rock: Special focus on the parameter of rock toughness and discontinuity pattern in rock mass (Doctoral dissertation, Dissertation, München, Technische Universität München, 2016).
- Yagiz, S. (2002). Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM Model basic penetration for hard rock tunneling machines (Doctoral dissertation, Colorado School of Mine).

of the research show a good agreement between modeling and laboratory results. At the end, the effect of discontinuous with different geometric properties on the performance of the cutting disc has been investigated. The results of the cross-section analysis show that the effect of the discontinuities on cutting performance decreases with increasing spacing between the discontinuities. Also, by examining the joint directional parameter, it is indicated that when the discontinuities have an angle of 60 degrees relative to the front, the best cutting performance is obtained. It should be noted that, however, this result is true for interchanges greater than parts 10 cm.

Keywords: TBM – Linear cutting test – Discrete element method – PFC3D

Abstract

Mechanized excavation method has some advantages such as decreasing vibration, decreasing manpower, increasing the advance speed and other points compared to the conventional methods. Therefore, use of TBM has increased to construct underground spaces Because of the major need for underground spaces. Unlike traditional methods, the use of TBM requires a lot of preliminary studies. Due to the importance of the time and cost of project, the prediction of the TBM performance is an important part of these studies. The TBM performance is influenced by various factors such as geomechanical and operational factors. Geomechanical factors include intact rock and discontinuities characterization. Also, the operational factors include the torque and thrust, the geometry of the discs, the distance between the discs and the way they are placed on the cutterhead. So far, many studies including analytical, empirical and numerical modeling have been done to investigate the effect of these factors on the penetration rate of TBM. The TBM performance is basically dependent on the performance of the cutting disc because of the cutting tools is intermediate element of the transfer of energy (Thrust and torque) from the cutterhead to the rock and finally leads to crushing. Linear cutting test is one of the most popular laboratory methods which is known as an accurate and reliable method for evaluating the cutting disc performance and its effective parameters.

The high cost of sample preparation in this method and the cost of carrying out the test, as well as the unusually of this test, to investigate the effect of cross-cutting on the cutting in the rocks is due to the limitations of this method. Therefore, numerical models have been developed to compensate for these limitations. Nowadays, the distinct element numerical method of is a common method for analyzing discontinuous environments and processes such as crushing stone by cutting tools. In this research, for modelling the effect of discontinuities geometric characterization on the cutting performance has been done using particle flow code (PFC3D) software due to the ability to simulate crack growth as well as degradation modeling under the influence of stress variation.

At the First, by simulating a granite sample and creating multiple slices with a disc cutter with a diameter of 43 cm in distance and the depth of the various penetrations on it, the amount of force applied to the disk and the effect Two parameters of distance and depth of influence on these forces have been investigated and finally the results have been compared with the results of laboratory research in this field. The results of this section



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

MSc Thesis in Tunneling and underground spaces

**Numerical modeling of the effect of geometrical parameters of
joints on rock cutting by disc cutters in jointed hard rock**

By: Navid Afrasiabi

Supervisor:

Dr. Ahmad Ramezanzadeh

Advisor:

Dr. Mahdi Noroozi

January 2018