

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری تخصصی مکانیک سنگ :

توسعه شاخص حفرپذیری توده سنگ درزه دار در حفاری مکانیزه با ماشین های حفاری تمام مقطع تونل

نگارنده:

مرتضی خسروی

اساتید راهنما :

دکتر احمد رمضان زاده

دکتر شکراله زارع

بهمن ماه ۱۳۹۹

شماره: ۹۳۰۰۵۳۵
تاریخ: ۱۳۹۹/۱۱/۳۰
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۱: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای مرتضی خسروی دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن به شماره دانشجویی ۹۳۰۰۵۳۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۳ در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۳۰ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: توسعه شاخص حفریذیری توده سنگ درزه دار در حفاری مکانیزه با ماشین های حفاری تمام مقطع تونل دفاع و با اخذ نمره ۱۹.۲۵ به درجه عالی نائل گردید.

جدول تعیین درجه نمره رساله برای ورودیهای ۹۴ و ماقبل

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	☐ د) مردود: کمتر از ۱۵

جدول تعیین درجه نمره رساله برای ورودیهای ۹۵ و مابعد

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۶	☐ د) مردود: کمتر از ۱۶

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر کورش شهریار	داور خارجی	استاد	
۲	دکتر احمد رمضان زاده	استاد راهنما	دانشیار	
۳	دکتر شکراله زارع	استاد راهنما	دانشیار	
۴	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	داور داخلی	دانشیار	
۵	دکتر مجید نیکخواه	داور داخلی	استادیار	
۶	دکتر اصغر عزیزی	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای مرتضی خسروی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم اثر ہے:

ہمہ آموز کاران درس "عاشقانہ زیستن"

شکر و قدردانی

شکر و سپاس پروردگار یکتا و بی‌همتا که به من توفیق داد تا این مرحله از زندگی را دریابم.

شکر و سپاس از زحمات استادان راهنمایم آقایان دکتر احمد رمضان زاده و دکتر شکراله زارع که در کمال سعه صدر در انجام

این رساله راهنما و راه‌گشایم بودند.

شکر و سپاس از زحمات بی‌نهایت پدر، مادر، همسر و دخترم که در طول مسیر زندگی همراه و راهنمایم هستند.

تعمدنامه

اینجانب **مرتضی خسروی** دانشجوی دوره دکتری رشته **مهندسی معدن - مکانیک سنگ** دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **توسعه شاخص حفریذیری توده سنگ درزه دار در حفاری مکانیزه با ماشین های حفاری تمام مقطع تونل** تحت راهنمایی **دکتر احمد رمضان زاده و دکتر شکراله زارع** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 می باشد 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 می گردد.
- 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 .



امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

استفاده از ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل به علت سرعت بالای حفاری، تأثیر کم بر محیط در برگیرنده تونل و همچنین سطح ایمنی بالا به سرعت در حال افزایش می‌باشد. با نظر به روند افزایشی استفاده از این ماشین‌ها، یکی از مسائل مهم و مؤثر در عملکرد آنها در توده‌سنگ‌های درزه‌دار، حفریپذیری می‌باشد. با توجه به اینکه حفریپذیری توده‌سنگ درزه‌دار به عنوان مؤلفه جامعی که منعکس کننده تعامل بین توده‌سنگ و ابزار برشی می‌باشد لذا با نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل در ارتباط بوده و عوامل مؤثر در نرخ نفوذ، بر حفریپذیری نیز تأثیر دارند. از مهمترین این عوامل دو مشخصه درزه‌ها (زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری) می‌باشد. در این تحقیق بر اساس بانک داده تشکیل شده از پروژه‌های تونل‌های انتقال آب کرمان (قطعه شمالی) و زاگرس (قطعه ۲) در ایران، تونل انتقال آب کویینز در نیویورک و تونل ماروشی- واکولا در هند به بررسی تأثیر دو خصوصیت هندسی درزه‌ها در حفریپذیری توده سنگ درزه‌دار پرداخته شده است. در مرحله اول با توجه به در دسترس بودن داده‌های سیستم ثبت داده ماشین حفار تونل انتقال آب کرمان، به بررسی تأثیر مجزا و تلفیقی سه مشخصه درزه (زاویه صفحه درزه، فاصله‌داری و تداوم) بر نرخ نفوذ پرداخته شده است. نتیجه بیانگر ارتباط مستقیم تداوم درزه با حفریپذیری توده‌سنگ درزه‌دار می‌باشد. همچنین با افزایش تداوم درزه، تأثیر ضریب خردشدگی کل به عنوان یک ضریبی که بیانگر تأثیر توأم زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری می‌باشد، در نرخ نفوذ بیشتر می‌شود.

با توجه به در دسترس بودن دو مؤلفه زاویه و فاصله‌داری درزه‌ها در پروژه‌های تشکیل دهنده بانک داده، به بررسی تأثیر هر کدام از این عوامل بر حفریپذیری سپس به تأثیر توأمان هر دو مؤلفه با استفاده از ضریب خردشدگی کل پرداخته شده است. نتایج نشان دهنده این است که با افزایش ضریب خردشدگی کل، حفریپذیری نیز افزایش می‌یابد. بر اساس سیستم رده‌بندی تعداد درزه در واحد حجم، شاخص حفریپذیری نیز به سه رده تقسیم گردیده است. در ادامه بر روی پنج نمونه سنگ از مقطع‌های مختلف قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان، آزمایش نفوذ پانچ انجام سپس بر اساس اطلاعات ثبت شده در سیستم ثبت داده دستگاه آزمایش و سیستم ثبت داده ماشین حفار، با استفاده از ضریب همبستگی اسپرمن، همبستگی بین داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بین نسبت نیرو به جابجایی در آزمایش با شاخص حفریپذیری واقعی همبستگی وجود دارد که بر این اساس رابطه‌ای با ضریب همبستگی $0/68$ ارائه شده است. در ادامه با توجه به اینکه در رابطه جدید تأثیر دو خصوصیت هندسی درزه‌ها (زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری) لحاظ نشده لذا از ضریب خردایش کل برای لحاظ کردن تأثیر این دو خصوصیت استفاده شده است. بر این اساس یک شاخص حفریپذیری برای توده سنگ ارائه شده که ضریب همبستگی آن $0/78$ می‌باشد. همچنین موضوع تأثیر دو مشخصه درزه‌ها بر حفریپذیری با استفاده از مدلسازی عددی به کمک نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدلسازی آزمایش برش خطی

مدل و به مقایسه میانگین تغییرات نیروی عمودی و غلتشی حاصل از مدل با نتایج به دست آمده در آزمایشگاه و همچنین مدل تئوری CSM پرداخته شده است. آنچه که در این مقایسه مشهود است، اختلاف کمتر بین نتایج حاصل از مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی نسبت به مدل تئوری CSM وجود دارد. سپس درزه‌هایی با شیب‌های صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ و فاصله‌داری‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌متر در به مدل اضافه گردیده است. نتایج بیانگر این است که درزه با زاویه بین ۴۰ تا ۶۵ درجه نیروی عمودی و غلتشی کاهش یافته لذا انتظار افزایش حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار وجود دارد. در صورتی که در زاویه بین ۴۰ تا ۶۵ درجه علاوه بر تأثیر زاویه، تأثیر فاصله‌داری را نیز لحاظ کنیم، مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله‌داری نیروی عمودی و غلتشی افزایش لذا حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی:

حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار، ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل، تونل انتقال آب کرمان، تونل انتقال آب زاگرس، تونل انتقال آب کویینز، تونل انتقال آب ماروشی-واکولا

لیست مقالات مستخرج از رساله:

- 1- Khosravi Morteza, Ramezanzadeh Ahmad, Zare Shokrollah. (2021) "Effects of Joint Orientation and Spacing on the Boreability of Jointed Rock Mass Using Tunnel Boring Machines" Arabian Journal of Geosciences, <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06428-x>.
- 2- Khosravi Morteza, Ramezanzadeh Ahmad, Zare Shokrollah. (2020) "Effect of Rock Joint on Boreability of TBM at Northern Section of Kerman Water Conveyance Tunnel" International Journal of Mining and Geo-Engineering, ID: IJMGE-201909-594825.
- 3- Khosravi Morteza, Ramezanzadeh Ahmad, Zare Shokrollah. (2021) "Evaluation of Disc Cutter Performance in Rock Cutting Process Using 3D Finite Element Method" International Journal of Numerical Methods in Civil Engineering

۴- مرتضی خسروی ، احمد رمضان زاده ، شکراله زارع. (۱۳۹۹) "توسعه شاخص حفزپذیری توده سنگ درزه دار بر اساس شاخص شکست سنگ در حفاری با TBM" نشریه علمی پژوهشی مکانیک سنگ ایران

۵- مرتضی خسروی ، احمد رمضان زاده ، شکراله زارع. (۱۳۹۶) "بررسی مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM با توجه به پارامترهای مؤثر در حفزپذیری توده سنگ درزه‌دار" سومین همایش منطقه ای و دوازدهمین همایش ملی تونل ایران، تهران

فهرست

۱	فصل اول: کلیات.....
۲	۱-۱- مقدمه.....
۲	۲-۱- بیان مسئله.....
۳	۳-۱- ضرورت انجام تحقیق.....
۳	۴-۱- فرضیات تحقیق.....
۴	۵-۱- روش انجام تحقیق.....
۶	۶-۱- ساختار رساله.....
۷	فصل دوم: مبانی نظری برش سنگ.....
۸	۱-۲- مقدمه.....
۸	۲-۲- تعاریف.....
۱۰	۳-۲- ایجاد و گسترش ترک در سنگ با ابزار برش.....
۱۱	۴-۲- شکنندگی سنگ.....
۱۲	۴-۲-۱- آزمایش شاخص نفوذ پانچ.....
۱۵	۵-۲- شاخص حفرپذیری توده سنگ.....
۱۶	۶-۲- ارزیابی عملکرد دیسک در فرآیند برش سنگ.....
۱۸	۷-۲- جمع بندی.....
۱۹	فصل سوم: پیشینه حفرپذیری توده سنگ درزه دار.....
۲۰	۱-۳- مقدمه.....
۲۰	۲-۳- عامل های موثر در حفرپذیری توده سنگ درزه دار.....
۲۰	۳-۲-۱- عامل های سنگ بکر.....
۲۱	۳-۲-۲- عامل های توده سنگ.....
۲۳	۳-۲-۳- عامل های عملیاتی ماشین حفاری مکانیزه تونل.....
۲۳	۳-۳- عامل های حفرپذیری سنگ در مدل های پیش بینی نرخ نفوذ ماشین های حفاری مکانیزه.....
۴۳	۳-۳-۱- مدل NTNU.....
۲۵	۴-۳- مدلسازی عددی خردایش سنگ بوسیله دیسک.....
۲۹	۵-۳- جمع بندی.....
۳۰	فصل چهارم: جمع آوری داده های میدانی.....
۳۱	۴-۱- مقدمه.....
۳۱	۴-۲- بانک داده.....
۳۱	۴-۳- مراحل تشکیل بانک داده.....
۳۲	۴-۳-۱- انتخاب داده های مورد نیاز.....
۳۲	۴-۳-۲- جمع آوری داده.....

۳۳	۴-۴- تونل انتقال آب کرمان.....
۳۵	۴-۴-۱- زمین شناسی.....
۳۶	۴-۵- تونل انتقال آب زاگرس (قطعه ۲).....
۳۸	۴-۵-۱- زمین شناسی.....
۳۸	۴-۶- تونل انتقال آب کویینز.....
۴۰	۴-۶-۱- زمین شناسی.....
۴۱	۴-۷- تونل انتقال آب ماروشی - واکولا.....
۴۲	۴-۷-۱- زمین شناسی.....
۴۳	۴-۸- تحلیل آماری بانک داده ها.....
۴۵	۴-۹- جمع بندی.....
۴۶	فصل پنجم: تأثیر مشخصات هندسی درزه در نرخ نفوذ و حفرپذیری.....
۴۷	۵-۱- مقدمه.....
۴۷	۵-۲- بررسی ارتباط مشخصات هندسی درزه با نرخ نفوذ در تونل انتقال آب کرمان.....
۴۷	۵-۲-۱- انتخاب مقاطع مورد بررسی.....
۴۸	۵-۲-۱-۲- آندزیت - بازالت.....
۴۹	۵-۲-۲-۲- آندزیت.....
۴۹	۵-۲-۲- خصوصیات هندسی درزه ها در مقاطع انتخابی.....
۵۰	۵-۳-۲- ارتباط خصوصیات هندسی درزه ها با نرخ نفوذ.....
۵۳	۵-۲-۴- تأثیر توأمان خصوصیات هندسی درزه بر نرخ نفوذ.....
۶۰	۵-۳-۳- بررسی تأثیر زوایه صفحه درزه و فاصله داری بر حفرپذیری توده سنگ.....
۶۰	۵-۳-۱- زاویه صفحه درزه.....
۶۴	۵-۳-۲- فاصله داری درزه.....
۶۶	۵-۴- بررسی تأثیر توأمان ویژگی های درزه داری توده سنگ در حفر پذیری.....
۶۷	۵-۴-۱- تعداد درزه در متر مکعب.....
۷۰	۵-۵- بررسی آماری تأثیر عامل های درزه داری بر حفرپذیری توده سنگ درزه دار.....
۷۴	۵-۶- جمع بندی.....
۷۶	فصل ششم: ارتباط شاخص شکنندگی با حفرپذیری توده سنگ درزه دار.....
۷۷	۶-۱- مقدمه.....
۷۷	۶-۲- انجام آزمایش نفوذ پانچ.....
۸۱	۶-۳- بررسی ارتباط بین عامل های نیرو و نفوذ با حفرپذیری.....
۸۳	۶-۴- ارزیابی شاخص های حفرپذیری.....
۸۵	۶-۵- بررسی ارتباط شاخص شکست با حفرپذیری توده سنگ درزه دار.....
۸۹	۶-۶- جمع بندی.....
۹۰	فصل هفتم: مدلسازی عددی تأثیر مشخصات هندسی درزه در حفرپذیری.....

۹۱	۱-۷-مقدمه.....
۹۱	۲-۷- معرفی نرم افزار المان محدود آباکوس.....
۹۲	۳-۷- مدلسازی عددی آزمایش برش خطی سنگ.....
۹۲	۱-۳-۷- مدلسازی بلوک سنگی.....
۹۴	۲-۳-۷- مدلسازی دیسک برش دهنده.....
۹۵	۳-۳-۷- شرایط مرزی مدل.....
۹۶	۴-۳-۷- مدلسازی تماس سنگ و برش دهنده.....
۹۶	۵-۳-۷- انتخاب روش حل مدل.....
۹۷	۶-۳-۷- مدل رفتاری سنگ.....
۹۸	۷-۳-۷- دریافت خروجی از مدل.....
۹۹	۸-۳-۷- ارزیابی مدل.....
۱۰۲	۴-۷- مدلسازی توده سنگ.....
۱۰۴	۱-۴-۷- بررسی تأثیر شیب درزه بر نیروی عمودی و غلتشی.....
۱۰۶	۲-۴-۷- بررسی تأثیر فاصله‌داری درزه بر نیروی عمودی و غلتشی.....
۱۰۸	۵-۷- جمع بندی.....
۱۰۹	فصل هشتم: نتیجه گیری و پیشنهادها.....
۱۱۳	مراجع.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۲-۱: تفاوت نحوه عملکرد ابزار خراشی با نفوذگر (یاگیز، ۲۰۰۲)..... ۱۰
- شکل ۲-۲: نمای شماتیک آزمایش نفوذ پانچ (یاگیز، ۲۰۰۹)..... ۱۲
- شکل ۲-۳: نمودار نیرو- نفوذ (یاگیز، ۲۰۱۵)..... ۱۴
- شکل ۲-۴: ارتباط نرخ نفوذ و شاخص حفرپذیری توده سنگ (بیلگین، ۲۰۱۶)..... ۱۶
- شکل ۲-۵: دستگاه آزمون برش خطی (سینگونگ، ۲۰۱۵)..... ۱۷
- شکل ۴-۱: تصویر کلی تونل انتقال آب کرمان (گزارش زمین شناسی مهندسی، ۱۳۹۵)..... ۳۴
- شکل ۴-۲: نیم رخ طولی زمینشناسی ۷ کیلومتر ابتدای قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان..... ۳۶
- شکل ۴-۳: تصویر کلی تونل انتقال آب زاگرس (گزارش زمین شناسی مهندسی، ۱۳۸۸)..... ۳۷
- شکل ۴-۴: نیم رخ طولی زمینشناسی تونل انتقال آب زاگرس (قطعه ۲)..... ۳۸
- شکل ۴-۵: طرح کلی تأمین سیستم آبرسانی شهر نیویورک (یاگیز، ۲۰۱۹)..... ۳۹
- شکل ۴-۶: تصویر کلی طرح تأمین آب بمبئی (پراسنا، ۲۰۱۴)..... ۴۱
- شکل ۴-۷: درصد وجود هر یک از سنگهای آذرین، رسوبی و دگرگونی در بانک داده..... ۴۳
- شکل ۴-۸: درصد هر یک از انواع سنگهای تشکیل دهنده بانک داده..... ۴۴
- شکل ۵-۱: تغییرات مشخصات هندسی درزهها با نرخ نفوذ برای گامهای شماره ۶۴۰ و ۸۸۱ تونل انتقال آب کرمان..... ۵۰
- شکل ۵-۲: تغییرات مشخصات هندسی درزهها با نرخ نفوذ برای گامهای شماره ۱۴۷۴ و ۱۶۱۷ تونل انتقال آب کرمان..... ۵۱
- شکل ۵-۳: تغییرات مشخصات هندسی درزهها با نرخ نفوذ برای گامهای شماره ۱۷۵۳ و ۱۹۷۹ تونل انتقال آب کرمان..... ۵۲
- شکل ۵-۴: نمودارهای تعیین K_s (مکیاس، ۲۰۱۶)..... ۵۴
- شکل ۵-۵: نمودار تغییرات ضریب K_s با نرخ نفوذ در تونل انتقال آب کرمان..... ۵۵
- شکل ۵-۶: نمودار تغییرات ضریب خردایش کل با نرخ نفوذ در تونل انتقال آب کرمان..... ۵۵
- شکل ۵-۷: نمودار تغییرات ضریب خردایش کل با نرخ نفوذ بر اساس ردهبندی تداوم درزه در تونل انتقال آب کرمان..... ۵۶
- شکل ۵-۸: رابطه RJI با نرخ نفوذ واقعی در تونل انتقال آب کرمان..... ۵۷
- شکل ۵-۹: مقایسه بین مقدار نرخ نفوذ واقعی و مقدار شاخص درزه سنگ در هر گام حفاری تونل انتقال آب کرمان..... ۵۸
- شکل ۵-۱۰: مقایسه نرخ نفوذ پیشبینی شده و نرخ نفوذ واقعی در وتل انتقال آب کرمان..... ۵۹
- شکل ۵-۱۱: نمودار استریوگرافیک و گل سرخی درزه های تونل انتقال آب کوبینز..... ۶۱
- شکل ۵-۱۲: نمودار استریوگرافیک و گل سرخی درزه های تونل انتقال آب کرمان..... ۶۱
- شکل ۵-۱۳: نمودار استریوگرافیک و گل سرخی درزه های تونل انتقال آب ماروشی-واکولا..... ۶۱
- شکل ۵-۱۴: ارتباط بین زاویه صفحه درزه با شاخص حفرپذیری و نرخ نفوذ در پروژه کوبینز..... ۶۲
- شکل ۵-۱۵: ارتباط بین زاویه صفحه درزه با شاخص حفرپذیری و نرخ نفوذ در پروژه کرمان..... ۶۳
- شکل ۵-۱۶: ارتباط بین زاویه صفحه درزه با شاخص حفرپذیری و نرخ نفوذ در پروژه ماروشی -واکولا..... ۶۳
- شکل ۵-۱۷: ارتباط بین فاصله‌داری درزه با شاخص حفر پذیری و نرخ نفوذ در پروژه کوبینز..... ۶۵

- شکل ۵- ۱۸: ارتباط بین فاصله‌داری درزه با شاخص حفرپذیری و نرخ نفوذ در پروژه کرمان ۶۵
- شکل ۵- ۱۹: ارتباط بین فاصله‌داری درزه با شاخص حفرپذیری و نرخ نفوذ در پروژه ماروشی-واکولا ۶۶
- شکل ۵- ۲۰: درصد وجود هر رده درزه‌داری در بانک داده ۶۸
- شکل ۵- ۲۱: مقایسه کلی حفرپذیری واقعی با حفرپذیری پیشبینی شده در تونل انتقال آب زاگرس (قطعه ۲) ۷۰
- شکل ۶- ۱: نمونه‌های سنگ قبل از برش برای انجام آزمایش در تونل انتقال آب کرمان ۷۸
- شکل ۶- ۲: قرار گرفتن نمونه‌ها در مرکز قالب ۷۸
- شکل ۶- ۳: قرارگیری پانچ بر روی سطح نمونه سنگ و ثبت تغییرات نیرو و نفوذ ۷۹
- شکل ۶- ۴: نمودار نیرو- جابجایی برای هر نمونه سنگ ۸۰
- شکل ۶- ۵: نوع رابطه بین FPI و نسبت نیرو به نفوذ ۸۲
- شکل ۶- ۶: میزان همبستگی بین FPI واقعی و دو شاخص جدید ۸۵
- شکل ۶- ۷: ارتباط شاخص‌شکست با ضریب خردایش کل ۸۶
- شکل ۶- ۸: ارتباط بین BI و BI_{IRM} ۸۷
- شکل ۶- ۹: همبستگی بین FPI و FPI_{IRM} ۸۸
- شکل ۷- ۱: ابعاد بلوک سنگی مدل شده برای آزمایش برش خطی ۹۳
- شکل ۷- ۲: مشبندی بلوک سنگی ۹۳
- شکل ۷- ۳: دیسک مدلسازی شده برای آزمایش برش خطی ۹۵
- شکل ۷- ۴: شرایط مرزی مدل آزمایش برش خطی ۹۶
- شکل ۷- ۵: چرخش دیسک روی سنگ و مسیر برش داده شده ۹۹
- شکل ۷- ۶: تغییرات نیروی عمودی وارد بر دیسک در عمق برش ۱/۹ میلیمتر ۱۰۰
- شکل ۷- ۷: تغییرات نیروی عمودی وارد بر دیسک در عمق برش ۱/۹ میلیمتر ۱۰۰
- شکل ۷- ۸: تغییرات زاویه درزه با تغییر نیروی عمودی در فاصله‌داری‌های مختلف ۱۰۵
- شکل ۷- ۹: تغییرات زاویه درزه با تغییر نیروی غلتشی در فاصله‌داری‌های مختلف ۱۰۶
- شکل ۷- ۱۰: تغییر نیروی عمودی با تغییر فاصله‌داری درزه در زاویه‌های مختلف درزه ۱۰۷
- شکل ۷- ۱۱: تغییر نیروی غلتشی با تغییر فاصله‌داری درزه در زاویه‌های مختلف درزه ۱۰۷

فهرست جداول

جدول ۴-۱: مشخصات کلی پروژهها موجود در بانک داده.....	۳۳
جدول ۴-۲: مشخصات ماشین حفار مکانیزه تمام مقطع تونل مربوط به قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان.....	۳۵
جدول ۴-۳: مشخصات کلی ماشین حفار مکانیزه تمام مقطع تونل (قطعه دوم).....	۳۷
جدول ۴-۴: مشخصات ماشین حفار تونل انتقال آب کوپینز.....	۴۰
جدول ۴-۵: مشخصات ماشینهای حفاری مکانیزه تونل انتقال آب ماروشی-واکولا.....	۴۲
جدول ۴-۶: مشخصات عاملهای تشکیل دهنده بانک داده.....	۴۴
جدول ۵-۱: مشخصات مقاطع انتخابی از مسیر تونل انتقال آب کرمان.....	۴۸
جدول ۵-۲: مقادیر عاملهای نرخ نفوذ، نیروی پیشران و گشتاور در تونل انتقال آب کرمان.....	۴۸
جدول ۵-۳: مقادیر عاملهای نرخ نفوذ، نیروی پیشران و گشتاور در تونل انتقال آب کرمان.....	۴۹
جدول ۵-۴: عاملهای نرخ نفوذ، نیروی پیشران و گشتاور در تونل انتقال آب کرمان.....	۴۹
جدول ۵-۵: ردهبندی میزان خردشدگی و درزهداری توده‌سنگ بر اساس فاصله‌داری درزه‌ها (مکیاس، ۲۰۱۶).....	۵۴
جدول ۵-۶: ردهبندی تداوم درز (بینیاوسکی، ۱۹۸۴).....	۵۶
جدول ۵-۷: عاملهای ژئومکانیکی مقاطع مختلف تونل انتقال آب کرمان.....	۵۸
جدول ۵-۸: رابطه بین نرخ نفوذ و شاخص حفرپذیری با خردشدگی کل.....	۶۷
جدول ۵-۹: سیستم ردهبندی درزهداری سنگ بر اساس تعداد درزه در واحد حجم (پالمستروم، ۱۹۸۲).....	۶۸
جدول ۵-۱۰: ردهبندی ضریب خردایش کل.....	۶۹
جدول ۵-۱۱: ردهبندی شاخص حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار بر اساس ضریب خردایش کل.....	۶۹
جدول ۵-۱۲: ضریب همبستگی اسپرمن بین عاملها.....	۷۲
جدول ۵-۱۳: ضرائب مربوط به هر عامل در تحلیل آماری.....	۷۳
جدول ۵-۱۴: ضرائب مربوط به تأثیر ضریب خردشدگی کل در شاخص حفرپذیری.....	۷۴
جدول ۶-۱: موقعیت نمونه‌برداری در طول مسیر تونل انتقال آب کرمان.....	۷۷
جدول ۶-۲: دامنه تغییرات داده ها.....	۸۱
جدول ۶-۳: ضریب همبستگی بین FPI و نیرو و نفوذ.....	۸۲
جدول ۶-۴: شاخصهای FPI_{ppt} شاخص های BIm و PLI برای هر نمونه سنگ در تونل انتقال آب کرمان.....	۸۴
جدول ۶-۵: رابطه بین شاخصشکست و عاملهای سنگ بکر و توده‌سنگ.....	۸۶

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

همگام با توسعه و پیشرفت صنعت، نیاز بشر به دسترسی به اعماق زمین برای استخراج مواد معدنی و همچنین احداث فضاهای زیرزمینی برای اهدافی همچون انتقال آب، حمل و نقل و بیشتر شده است. بدین منظور، احداث فضاهای زیرزمینی در محیط‌های سنگی یکی از مسائل پر مخاطره و چالشی برای بشر بود که با گذشت زمان و ساخت ماشین‌های حفاری مکانیزه توانست بر این مسأله فائق آید. ساخت ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل^۱ را می‌توان یکی از تحولات بزرگ در عرصه تونلسازی دانست. یکی از موضوعات کلیدی در استفاده از این ماشین‌ها، ارزیابی عملکرد آنها به منظور تحقق اهداف استاندارد مدیریت پروژه^۲ در یک پروژه تونلسازی می‌باشد. یکی از شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل، شاخص حفرپذیری توده‌سنگ می‌باشد. عوامل متعددی در این شاخص تأثیرگذار هستند که در توده‌سنگ‌ها، خصوصیات هندسی درزه‌ها نقش مؤثری در حفرپذیری دارند.

در این فصل، بیان مسئله، ضرورت انجام تحقیق و مراحل انجام آن توضیح داده شده است.

۱-۲- بیان مسئله

با توجه به روند افزایشی استفاده از ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل، یکی از موضوعات خیلی مهم برای کمک به برنامه‌ریزی برای اجرای یک پروژه تونلسازی در توده‌سنگ درزه‌دار، پیش‌بینی حفرپذیری است. با توجه به اینکه شاخص حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار به عنوان عامل جامعی که منعکس کننده تعامل بین توده‌سنگ و ابزار برشی می‌باشد، می‌تواند در پیش‌بینی حفرپذیری از اهمیت خاصی برخوردار باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شاخص حفرپذیری تابعی از عامل‌های سنگ بکر (مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و شاخص شکنندگی) و توده‌سنگ (فاصله‌داری و جهت‌داری درزه) می‌باشد. با توجه به گسترده بودن موضوع و اهمیت بالای استفاده از داده‌های اجرایی حفاری تونل در توده‌سنگ درزه‌دار با ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع

¹ Tunnel Boring Machine

² Project Management Body of Knowledge

تونل، لزوم وجود تحقیقی در خصوص تأثیر هر کدام از عامل‌های توده‌سنگ در شاخص حفریذیری وجود دارد. برای بررسی این مسئله لازم است بانک داده جامعی از عامل‌های سنگ بکر، توده‌سنگ و عامل‌های عملیاتی ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل در پروژه‌های مختلف تشکیل و با استفاده از روش‌های آماری و مدلسازی عددی به بررسی موضوع پرداخته شود.

۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

از شاخص حفریذیری توده‌سنگ درزه‌دار می‌توان برای پیش‌بینی حفریذیری و در واقع ارزیابی عملکرد ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل استفاده کرد. در مدل‌هایی که تا اکنون برای ارزیابی عملکرد این ماشین‌ها ارائه شده، به دلیل عدم لحاظ کردن تأثیر توأمان عامل‌های توده‌سنگ درزه‌دار مؤثر در حفریذیری لذا دارای محدودیت‌هایی می‌باشند. برای بهبود این مدل‌ها لازم است مدلی جدید با تلفیق مناسب عامل‌های مؤثر بر حفریذیری توده‌سنگ درزه‌دار و عملیاتی ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل ارائه گردد.

۴-۱- فرضیات تحقیق

هر تحقیقی با توجه به شرایط و امکانات در دسترس با محدودیت‌هایی مواجه است که این مسئله شامل این تحقیق نیز می‌شود. برای برطرف کردن این محدودیت فرضیاتی لحاظ شده است. مهمترین این فرضیات به شرح ذیل می‌باشند:

- ۱- نوع ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل، ماشین حفاری در سنگ سخت^۱ می‌باشد.
- ۲- از اثر تغییرات تنش، آب زیرزمینی، تخلخل و ... در فرآیند خردایش توده‌سنگ درزه‌دار صرف‌نظر شده است.
- ۳- اثر فرسایش ابزار برشی در فرآیند خردایش توده‌سنگ درزه‌دار لحاظ نشده است.

¹ Hard rock TBM

۱-۵- مراحل انجام تحقیق

در این تحقیق برای بررسی موضوع مراحل ذیل طی شده است:

۱- مطالعات کتابخانه‌ای

در گام اول مطالعات و تحقیقات انجام شده مرتبط با موضوع مورد بررسی قرار گرفته تا از نتایج حاصله در راستای این تحقیق استفاده گردد.

۲- جمع‌آوری داده‌های زمین‌شناسی و ماشین حفار

در این مرحله به منظور درک عوامل مؤثر بر حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار، داده‌های واقعی ثبت شده در پروژه‌های تونل انتقال آب کرمان (قطعه شمالی) و تونل انتقال آب زاگرس (قطعه ۲) در ایران، تونل کویینز در آمریکا و تونل ماروشی _ واکولا در هند جمع‌آوری شده و به گروه‌هایی شامل عامل‌های سنگ بکر، توده‌سنگ و عملیاتی ماشین تقسیم‌بندی شده‌اند.

۳- تحلیل کیفی و کمی داده‌ها

برای بررسی تجربی تأثیر عامل‌های سنگ بکر و توده‌سنگ در حفرپذیری ابتدا به تحلیل کیفی و کمی داده‌ها با استفاده از نرم افزار تحلیل آماری IBM SPSS 25 پرداخته شده است.

۴- انجام آزمایش نفوذ پانچ

برای تکمیل بانک داده و بررسی ارتباط شاخص حفرپذیری با شاخص شکست، آزمایش نفوذ پانچ¹ (PPT) بر روی ۱۰ نمونه سنگ از مقاطع مختلف تونل انتقال آب کرمان انجام شده است.

¹ Punch Penetration Test

۵-مدلسازی عددی

برای بررسی تأثیر زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری در حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از مدلسازی عددی، آزمایش برش خطی (LCT^1) با کمک نرم افزار آباکوس^۲، مدلسازی گردیده است. برای صحت-سنجی نتایج حاصل از مدلسازی عددی، نتایج آزمایشات برش خطی بر روی یک نمونه سنگ با نتایج مدلسازی عددی مقایسه شده است. در ادامه به منظور بررسی موضوع، زاویه و فاصله‌داری درزه به مدل اضافه شده است.

۶-جمع بندی

در مرحله آخر نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در مراحل قبل، ارائه گردیده است.

۱-۶-ساختار رساله

این تحقیق شامل هشت فصل می‌باشد که در فصل اول ضرورت مساله، هدف انجام پژوهش، فرضیات در نظر گرفته شده و روش تحقیق بیان گردیده است. در فصل دوم به تعاریف مفاهیم و مبانی مرتبط با خردایش سنگ با ابزار برشی و حفرپذیری پرداخته می‌شود. در فصل سوم با هدف اطلاع و استفاده از آخرین یافته‌های تحقیقات سایر پژوهشگران در خصوص ارزیابی عملکرد ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل و حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار به مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی تحقیقات انجام شده در این خصوص پرداخته شده است. فصل چهارم این تحقیق شامل جمع‌آوری داده‌ها از پروژه‌های مختلف تونلسازی، نحوه گروه‌بندی و تشکیل بانک داده و سپس تحلیل کیفی آن می‌باشد. در فصل پنجم در ابتدا، ارتباط بین نرخ نفوذ با چهار خصوصیت درزه شامل زاویه صفحه درزه، فاصله‌داری، بازشدگی و تداوم درزه در مقاطعی از تونل انتقال آب کرمان که دارای شرایط یکسان از نظر ژئومکانیکی و عملیاتی ماشین حفار می‌باشند بررسی شده سپس به تأثیر زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری در شاخص

¹ Linear Cutting Test

² Abaqus

حفرپذیری در سه پروژه دیگر پرداخته شده است. در فصل ششم نیز برای بررسی ارتباط شاخص شکنندگی با شاخص حفرپذیری در توده سنگ درزه دار به انجام آزمایش نفوذ پانچ بر روی نمونه های سنگی موجود و سپس تحلیل نتایج حاصل از آزمایش اقدام شده است. در فصل هفتم با استفاده از مدلسازی عددی به مدلسازی آزمایش برش خطی به منظور بررسی تأثیر مشخصات هندسی درزه شامل زاویه صفحه درزه و فاصله داری بر شاخص حفرپذیری پرداخته شده که در مرحله اول سنگ بکر مدلسازی سپس درزه هایی با زاویه و فاصله داری مختلف به آن اضافه گردیده است. در فصل هشتم نیز جمع بندی و پیشنهادها ارائه شده است.

فصل دوم

مبانی نظری برش سنگ

۲-۱- مقدمه

حفاری مکانیزه فضاهاى زیرزمینی در محیط‌های سنگی بر مبنای ایجاد و گسترش ترک و در نهایت خردایش سنگ به صورت پیوسته صورت می‌پذیرد. بنابراین، مطالعه نحوه ایجاد، گسترش و بهم پیوستن ترک‌ها در پیش‌بینی فرآیند شکست و خردایش سنگ نقش مهمی را ایفا می‌کند. در ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل برای این منظور از ابزار برشی استفاده می‌شود که مهمترین این ابزارها، دیسک‌ها می‌باشند. ارزیابی عملکرد دیسک‌ها در فرآیند شکست و خردایش سنگ مسأله مهمی برای پیش‌بینی حفرپذیری می‌باشد. در این فصل پس از بیان تعاریف و نحوه ایجاد و گسترش ترک در سنگ، به نحوه ارزیابی عملکرد دیسک در فرآیند برش سنگ پرداخته می‌شود.

۲-۲- تعاریف

شکنندگی سنگ^۱: تمایل سنگ به توسعه ترک، شکنندگی تعریف شده است (یاگیز^۲، ۲۰۰۲).

سختی سنگ^۳: مقاومت سنگ یا کانی، در برابر ابزار برنده، یا هر جسم دیگری که در آن نفوذ می‌کند را سختی می‌گویند (رابیا^۴، ۱۹۷۸).

نرخ نفوذ^۵: میزان عمق نفوذ آنی ابزار برشی در هر دور چرخش کله حفار را نرخ نفوذ می‌گویند (ازدمیر^۶، ۱۹۹۸).

شاخص نفوذ صحرایی^۷ (FPI): این شاخص نسبت نیروی پیشران در کله حفار به نفوذ در چرخش کله حفار می‌باشد.

¹ Brittleness Rock

² Yagiz

³ Hardness Rock

⁴ Rabia

⁵ Rate of Penetration

⁶ Ozdemir

⁷ Field Penetration Index

شاخص حفرپذیری: با توجه به تعاریف مختلف در خصوص حفرپذیری لذا در این تحقیق بر اساس داده‌های در دسترس از تعریف شاخص نفوذ صحرایی (FPI) برای توصیف حفرپذیری توده‌سنگ استفاده شده است.

آزمون برش خطی^۱: آزمونی که برای ارزیابی عملکرد دیسک برشی (برآورد نیروهای وارد بر دیسک در یک عمق برش مشخص) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نیروی عمودی^۲: این نیرو، متوسط نیرویی است که به صورت عمود بر جهت سطح برشی وارد شده و سبب نفوذ دیسک برشی در سنگ می‌شود. نیروی عمودی تعیین کننده نیروی پیشران^۳ ماشین حفاری می‌باشد که آن را با F_n نشان می‌دهند (سیونگ^۴، ۲۰۱۳).

نیروی غلتشی^۵: نیروی که به موازات سطح برش اثر می‌کند و برای غلبه بر نیروی مقاوم در مقابل غلتش دیسک برشی می‌باشد. این نیرو تعیین کننده قدرت و گشتاور^۶ ماشین حفاری است. همچنین از این نیرو برای محاسبه انرژی^۷ ویژه نیز استفاده می‌شود. نیروی غلتشی را با F_r نشان می‌دهند (سیونگ^۸، ۲۰۱۳).

نیروی جانبی^۹: این نیرو در اثر بارگذاری غیر متقارن بر روی دیسک به علت آزاد شدن فشار در یک طرف دیسک در اثر تشکیل تراشه بوجود می‌آید. این نیرو نیز با F_s نشان داده می‌شود (سیونگ^{۱۰}، ۲۰۱۳).

زاویه آلفا^{۱۱}: زاویه بین صفحه درزه با محور تونل را زاویه آلفا می‌گویند (مکیاس^{۱۲}، ۲۰۱۶).

¹ Linear cutting test

² Normal Force

³ Thrust

⁴ Seung

⁵ Rolling Force

⁶ Torque

⁷ Specific energy

⁸ Seung

⁹ Side forces

¹⁰ Seung

¹¹ Alpha angle

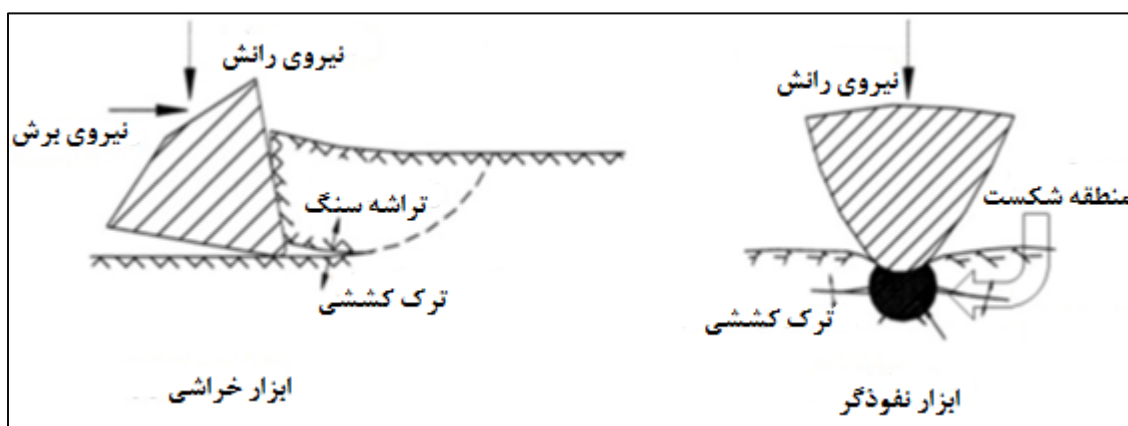
¹² Macias

ضریب همبستگی^۱: ابزاری آماری برای تعیین شدت رابطه بین متغیرهایی از نوع کمی می‌باشد.

^۲ Sig: سطح معنی داری بیانگر میزان خطا در تعمیم رابطه بین دو متغیر به سایر متغیرها در بانک اطلاعاتی می‌باشد.

۲-۳- ایجاد و گسترش ترک در سنگ با ابزار برش

یکی از روش‌های ایجاد و گسترش ترک در سنگ‌ها، ابزار برشی می‌باشد که از این ابزار در ماشین‌های حفاری مکانیزه و نیمه‌مکانیزه تونل‌ها، چاه‌ها و معدنکاری پیوسته استفاده می‌شود. بطور کلی دو نوع ابزار برای برش در سنگ‌های سخت و نرم استفاده می‌شود. با توجه به نحوه شکست و خردایش سنگ، این ابزار به دو نوع، ابزار نفوذگر^۳ (که به داخل سنگ نفوذ می‌کند) و ابزار خراشی^۴ (که بر روی سنگ کشیده می‌شود) تقسیم می‌شوند. همانطور که در شکل (۱-۲) ملاحظه می‌شود در ابزار نفوذگر، خردایش و شکست سنگ با اعمال نیروی عمود بر سطح سنگ انجام می‌شود که این نیرو باید بر مقاومت فشاری سنگ غلبه کند. در ابزار خراشی نیروی اعمالی تقریباً موازی سطح سنگ است که برای شکست و خردایش سنگ باید بر نیروی مقاومت کششی سنگ فائق آید.



شکل ۲-۱: تفاوت نحوه عملکرد ابزار خراشی با نفوذگر (یاگیز، ۲۰۰۲)

^۱ Correlation Coefficient

^۲ Significance

^۳ Indenter

^۴ Drag

ابزار خراشی بطور مستقیم باعث ایجاد ترک کششی و شکست و خردایش سنگ می‌شود در حالی که ابزار نفوذگر با خرد کردن بخشی از توده سنگ واقع شده در زیر این ابزار، باعث ایجاد تنش کششی می‌شوند. مواد خرد شده اتساع پیدا کرده و در نهایت تنش‌های کششی منجر به توسعه یک سری شکستگی در اطراف سنگ بکر خواهد شد. با توجه به اینکه مقاومت کششی سنگ‌ها کمتر از مقاومت فشاری آنها است لذا به نظر می‌رسد برش سنگ با ابزار خراشی به نیرو و انرژی کمتری نیاز دارد (رمضان‌زاده، ۲۰۱۰). ابزار نفوذگر برای شکست و خردایش سنگ تحت فشار قرار گرفته و در این حالت به حداکثر مقاومت خود می‌رسند. بنابراین این ابزار به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. تا اکنون انواع مختلفی از ابزار برش ساخته شده که عمده ابزار مورد استفاده از ابزار گوه‌ای، ابزار نوک قلمی، ابزار دیسکی، ابزار غلتشی و ابزار دکمه‌ای می‌باشند (بریدس^۱، ۱۹۹۲). ابزار گوه‌ای و نوک قلمی از نوع خراشی و مابقی از نوع نفوذگر می‌باشند. از ابزارهای فوق، ابزار دیسکی در دهه‌های اخیر بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و لذا در انواع مختلف نیز ساخته شده است.

۲-۴- شکنندگی سنگ

یکی از مسائل مهم که تا اکنون مورد توجه محققان بوده، تأثیر شکنندگی سنگ بر قابلیت حفاری آن می‌باشد. تحقیقات انجام شده بیانگر این است که یک رابطه قوی بین نرخ نفوذ ماشین حفار و شاخص شکنندگی سنگ وجود دارد. یاگیز (۲۰۰۲) یک رابطه‌ای را بین نرخ نفوذ و شاخص شکنندگی در ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل و مته‌های چرخشی به‌دست آورد که بیانگر نسبت معکوس این دو عامل هست (یاگیز، ۲۰۰۲). علاوه بر شکنندگی، خصوصیات دیگر سنگ نیز ممکن است بر نرخ نفوذ تأثیرگذار باشند، که این موضوع منجر به عدم اطمینان شده و گرایش معکوسی را در نتایج گونگ و ژائو (۲۰۰۷) و برولند (۲۰۰۰) نشان می‌دهد. خاندوال^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۶ به ارائه رابطه جدید برای شاخص شکنندگی سنگ با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و رگرسیون چندگانه غیرخطی بر پایه مجموعه داده‌های مورد استفاده یاگیز در سال ۲۰۰۹ پرداختند

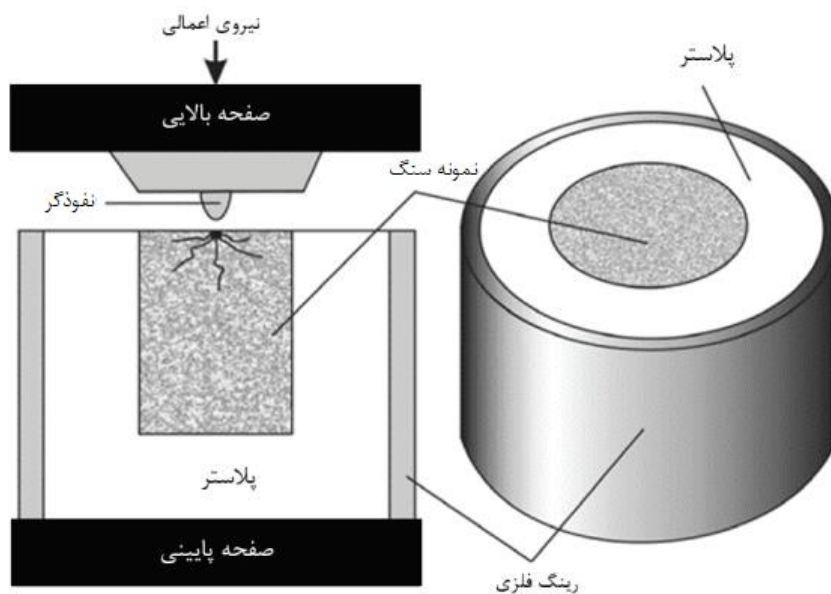
¹ Breeds

² Khandewal atl.

(خاندوال، ۲۰۱۶). شکنندگی سنگ را می‌توان با استفاده از آزمایشات خاص تعیین نمود، که این آزمایشات، نحوه خردایش در طول حفاری با ابزارهای برشی یا نفوذ را نشان می‌دهند.

۲-۴-۱- آزمایش شاخص نفوذ پانچ

آزمایش شاخص نفوذ پانچ، انعکاس دهنده فرآیند شکست سنگ در بارگذاری مانند دیسک و همچنین الگوی شکست یا تشکیل تراشه می‌باشد. در این آزمایش، یک ابزار استاندارد مخروطی شکل با زاویه رأس ۱۲۰ درجه بر روی سطح سنگی که در قالب فلزی ثابت شده است، فشرده شده و بار اعمالی و مقدار نفوذ توسط یک سیستم به طور خودکار ثبت می‌گردد (شکل ۲-۲). آزمایش شاخص نفوذ پانچ بیشتر در آمریکای شمالی برای به‌دست آوردن شکنندگی و قابلیت حفاری سنگ مورد استفاده قرار گرفته است (ویلفینگ^۱، ۲۰۱۶).



شکل ۲-۲: نمای شماتیک آزمایش نفوذ پانچ (یاگیز، ۲۰۰۹)

¹ Wilfing

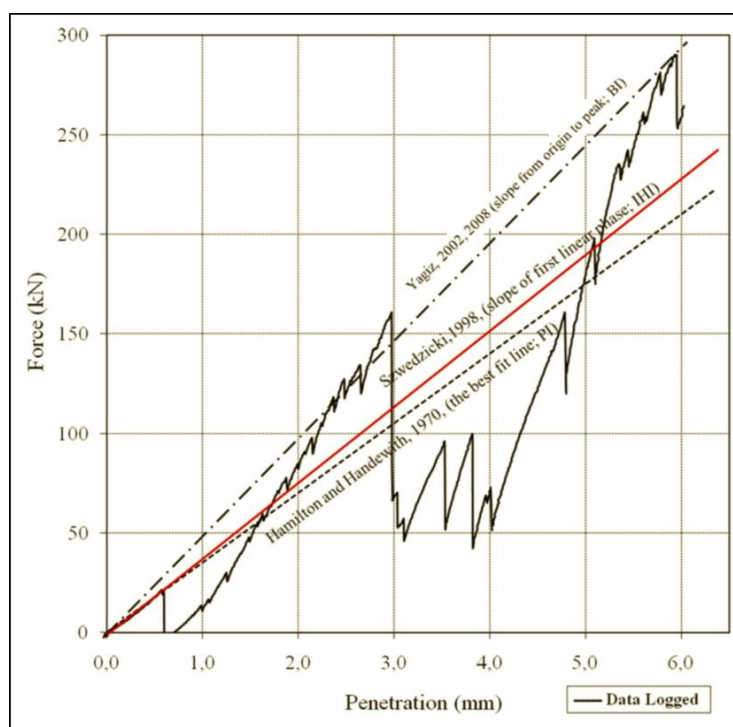
در این آزمایش، شکل و شیب منحنی بار- نفوذ نشان دهنده انرژی مورد نیاز برای تشکیل تراشه می‌باشد. یکی از نتایج اصلی این آزمایش به دست آوردن شاخص شکنندگی سنگ می‌باشد که با حداکثر نیروی اعمال شده برای نفوذ در سنگ، متناسب هست (یاگیز، ۲۰۰۷) (رابطه (۱-۲)).

$$BI_m = \frac{F_{max}}{p} \quad (1-2)$$

در این رابطه: BI_m شاخص شکست (کیلو نیوتن بر میلی‌متر)، F_{max} حداکثر نیرو (کیلو نیوتن) و p مقدار نفوذ (میلی‌متر) می‌باشد. مشکل موجود در این شاخص این است که فقط نیروی حداکثر در نظر گرفته شده و به رفتار منحنی نیرو - نفوذ توجه نمی‌گردد. از آنجایی که تعداد تراشه ایجاد شده موجب افت نیروی ناگهانی می‌گردد، سنگ‌های شکننده منحنی نوسان‌داری را نشان داده و سنگ‌های سخت یک منحنی یکنواخت‌تری را بدون افت نیرو نشان می‌دهند (یاگیز، ۲۰۱۵). یاگیز (۲۰۰۹) برای غلبه بر این مشکل یک فرمول را بر مبنای آنالیزهای استاتیکی پیشنهاد داد که در آن شاخص شکنندگی را می‌توان با عامل‌های استاندارد آزمایشگاهی چون مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلی و چگالی تخمین زد (یاگیز، ۲۰۰۹).

$$BI_p = 0.198 \sigma_u - 2.174 \sigma_t + 0.193 \rho - 3.807 \quad (2-2)$$

در این رابطه BI_p شکنندگی پیش‌بینی شده، σ_u مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)، σ_t مقاومت کششی سنگ (مگاپاسکال) و ρ چگالی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد. این آزمایش بهترین فرآیند خرد شدن سنگ تحت فشار را نشان می‌دهد. از این آزمایش برای پیش‌بینی نیروی عمودی لازم برای انتخاب کله حفار مناسب برای رسیدن به نرخ نفوذ مدنظر و همچنین تحلیل کارایی ابزار برشی در ماشین‌های حفاری تونل استفاده می‌شود. با استفاده از آزمایش نفوذ، سه مرحله مجزا در منحنی نیرو- نفوذ قابل مشاهده است. در مرحله اول، تغییر شکل الاستیک و در مرحله دوم، تشکیل ترک و گسترش آن و در مرحله سوم تراشه سنگ شکل می‌گیرد. تغییر شکل الاستیک و خردایش یک رابطه خطی دارند. مراحل خردایش در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: نمودار نیرو- نفوذ (یاگیز، ۲۰۱۵)

جونگ و همکاران^۱ آزمایش نفوذ بر روی شش نوع سنگ مختلف انجام داده و نتایج را با آزمایش برش خطی (LCT) مقایسه نمودند. آنها بر اساس نقاط حداکثری نمودار بار- نفوذ در آزمایش نفوذ پانچ، شاخص بار حداکثر (PLI^۲) برای پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل در سنگ محاسبه کردند. شاخص PLI با محاسبه میانگین شیب خط اتصال نقطه مبدا تا چندین نقطه حداکثر نیرو بر اساس رابطه (۲-۳) حاصل می‌شود:

$$PLI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i}{P_i} \right) \quad (۲-۳)$$

^۱ Jeong et al.

^۲ Peak Load Index

در این رابطه n تعداد نقاط حداکثر P_i ، عمق نفوذ نقاط حداکثر (میلی متر) نیرو F_i و نیروی عمودی (کیلو نیوتن) در هر P_i متناظر می باشد (جونگ، ۲۰۱۵).

۲-۵- شاخص حفرپذیری توده سنگ

شاخص حفرپذیر توده سنگ، عامل جامعی است که منعکس کننده تعامل بین توده سنگ و ابزار برش می باشد. کمیسیون فنی و مهندسی سیستم های ایالات متحده آمریکا (۱۹۸۴) حفرپذیری سنگ را یک مقداری که بیانگر خصوصیات حفرپذیری سنگ از نظر ضریب نفوذ با تعداد و نوعی مشخصی از دیسک و تحت اعمال مقدار معینی نیرو، تعریف کرده است (یان و همکاران^۱، ۲۰۱۴). همیلتون و دالینجر^۲ در سال ۱۹۷۹ از شاخص نفوذ صحرایی برای توصیف حفرپذیری توده سنگ استفاده کردند که این شاخص، نسبت نیروی پیشران در کله حفار به نفوذ در چرخش کله حفار می باشد. از این شاخص می توان برای محاسبه نرخ نفوذ ماشین حفار مکانیزه تمام مقطع تونل استفاده کرد (یان و همکاران، ۲۰۱۴). گانگ در سال ۲۰۰۵ پیشنهاد استفاده از شاخص ویژه حفرپذیری توده سنگ (SRMBAI)^۳ برای ارزیابی ویژگی حفرپذیری توده سنگ را داد. شاخص ویژه حفرپذیری توده سنگ عبارت از نیروی نرمال وارد بر کله حفاری برای نفوذ به مقدار یک میلی متر در هر دور چرخش کله حفاری می باشد (گانگ، ۲۰۰۵). گانگ و ژائو^۴ در سال ۲۰۰۹ بر اساس مکانیزم خردایش سنگ بوسیله ابزار برشی ماشین حفار و با تشکیل بانک داده از دو پروژه تونلسازی در سنگاپور، رابطه ذیل را برای به دست آوردن شاخص ویژه حفرپذیری توده سنگ ارائه دادند (گانگ و ژائو، ۲۰۰۹).

$$BAI_1 = 37.06 \times UCS^{0.26} \times Bi^{-0.1} (0.84e^{-0.05J_v} + e^{-0.09\sin(\alpha+30)}) \quad (2-4)$$

در این رابطه UCS مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)، Bi شاخص شکنندگی سنگ، J_v حجم درزه داری

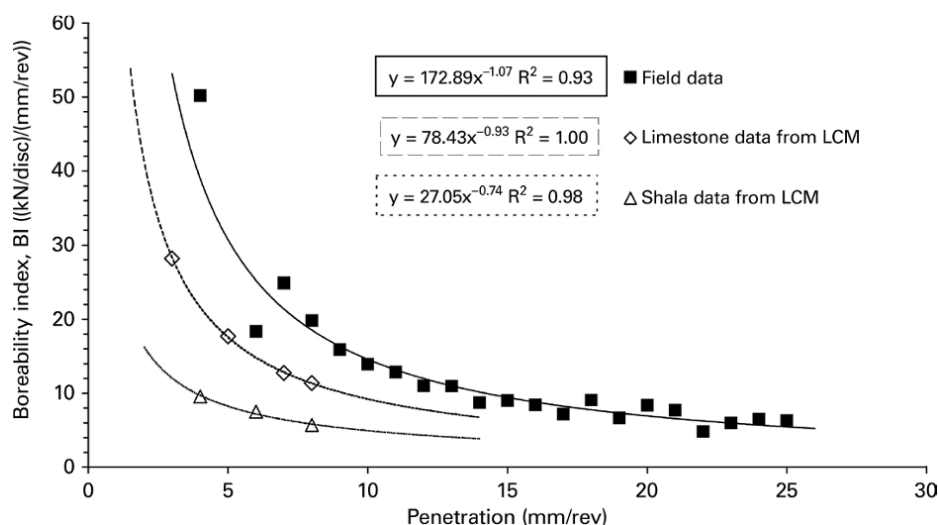
¹ Yin et al.

² Hamilton and Dollinger

³ Specific Rock Mass Boreability Index

⁴ Gong and Zhao

و α زاویه بین محور تونل با صفحه درزه می‌باشد. تحقیقات انجام شده در خصوص ارتباط شاخص حفرپذیری توده سنگ به دست آمده از داده‌های میدانی و آزمایشگاهی (بوسیله آزمایش برش خطی) با نرخ نفوذ در تونل کوزیاتگی-کادکوی^۱ در ترکیه نشان دهنده افزایش نرخ نفوذ با کاهش شاخص حفرپذیری توده سنگ می‌باشد (شکل ۲-۴). همچنین این بررسی بیانگر رابطه شاخص حفرپذیری توده سنگ با نرخ نفوذ می‌باشد (بیلگین^۲، ۲۰۱۶).



شکل ۲-۴: ارتباط نرخ نفوذ و شاخص حفرپذیری توده سنگ (بیلگین، ۲۰۱۶)

۲-۶- ارزیابی عملکرد دیسک در فرآیند برش سنگ

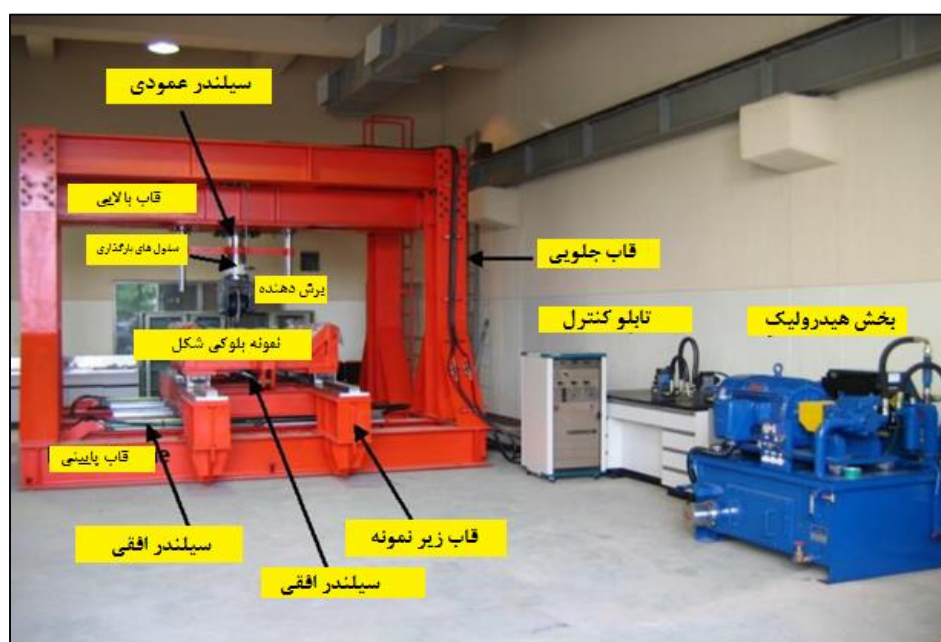
برای ارزیابی عملکرد دیسک در فرآیند برش سنگ از نیروی عمودی، نیروی غلتشی و همچنین انرژی ویژه استفاده می‌شود. تنها روش آزمایشگاهی تعیین نیروهای عمودی و غلتشی برای ارزیابی عملکرد دیسک در برش سنگ، استفاده از آزمایش برش خطی می‌باشد. آزمایش برش خطی بوسیله دستگاه برش خطی (LCM^۳) انجام می‌شود که این دستگاه می‌تواند 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

^۱ Kozyatagi-Kadikoy

^۲ Bilgin

^۳ Linear Cutting Machine

بر روی آن نصب شده و یک دستگاه اندازه‌گیری نیروی سه محوری (که بین دیسک 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 و یک جک هیدرولیکی با کنترل دقیق، نمونه را به سمت دیسک حرکت می‌دهد تا دیسک 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 عمودی، غلتشی و جانبی را که بر روی دیسک اعمال می‌شود، اندازه‌گیری می‌کند. بعد از هر مرحله، قاب نمونه به اندازه فاصله مشخصی که از قبل تعیین شده، حرکت داده تا اثر حرکت دیسک مجاور نیز مد نظر قرار بگیرد (سینگونگ^۱، ۲۰۱۵). در شکل (۲-۵) دستگاه برش خطی نشان داده شده است.



شکل ۲-۵: دستگاه آزمایش برش خطی (سینگونگ، ۲۰۱۵)

بزرگترین مزیت دستگاه برش خطی، انجام آزمایش در مقیاس واقعی با ابزار برش است (یاگیز، ۲۰۱۲). این دستگاه امکان مطالعه کامل خردایش سنگ با ابزار برش مکانیکی، اثر متقابل بین سنگ و دیسک و تأثیر عامل‌های مختلف

¹ Sungong

بر نیروهای برش را فراهم می‌سازد. هزینه بالای ساخت و نگهداری دستگاه منجر به بالارفتن هزینه‌های انجام آزمایش و محدود شدن تعداد دستگاه به برخی از مراکز تحقیقاتی دنیا شده است.

۲-۷- جمع‌بندی

فرآیند برش سنگ توسط ابزار دیسکی که بیشتر در ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر مبنای شکست سنگ استوار است. در فرآیند شکست سنگ، خصوصیات از سنگ از جمله چقرمگی، شکنندگی، سختی و شاخص حفرپذیری توده سنگ نقش مهمی دارند. نتایج مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس واقعی با آزمایش برش خطی نشان می‌دهد شاخص بار حداکثر و متوسط در این آزمایش از همبستگی خوبی با شاخص بار حداکثر و متوسط در آزمایش نفوذ پانچ (شاخص شکنندگی) برخوردار است. می‌توان انتظار داشت این شاخص بتواند ویژگی‌های سنگ در ارتباط با خردایش با ابزار برش مکانیکی را به خوبی معرفی نماید. شاخص حفرپذیری توده سنگ نیز با میزان خردایش و نفوذ دیسک در سنگ، ارتباط دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این شاخص تابعی از مقاومت فشاری تک محوری، فاصله‌داری و جهت داری درزه‌ها می‌باشد. شاخص حفرپذیری توده سنگ می‌تواند به عنوان یک عامل جامع، در پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری مکانیزه تونل مورد استفاده قرار بگیرد.

فصل سوم

پیشینه مطالعات حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار

حفرپذیری سنگ که تابعی از عامل‌های مکانیک سنگی است به نوعی بیانگر میزان مقاومت سنگ در برابر نفوذ دیسک می‌باشد. از عوامل مؤثر در پیش‌بینی نرخ نفوذ، عامل‌های سنگ بکر (مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و شاخص شکنندگی) و توده سنگ (فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها) می‌باشند که مجموعه این عامل‌ها در میزان حفرپذیری توده سنگ مؤثر هستند. در مدل‌هایی که برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه شده است، این عامل‌ها به صورت مستقیم یا غیر مستقیم لحاظ شده‌اند. در این فصل پس از بیان تأثیر عامل‌های سنگ بکر، توده سنگ و عملیاتی ماشین حفار در حفرپذیری و نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل، با توجه به اینکه خردایش سنگ در حفرپذیری آن تأثیر دارد، به مدلسازی عددی خردایش سنگ بوسیله دیسک پرداخته می‌شود.

۳-۲- عامل‌های مؤثر در حفرپذیری توده سنگ درزه دار و نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری مکانیزه

در یک پروژه، عامل‌های زیادی وجود دارند که بر حفرپذیری و نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری مکانیزه تأثیر می‌گذارند. مهمترین و کلیدی‌ترین این عامل‌ها را می‌توان به سه گروه اصلی، عامل‌های توده سنگ، عامل‌های سنگ بکر و عامل‌های عملیاتی ماشین حفاری مکانیزه تونل تقسیم‌بندی نمود.

۳-۲-۱- عامل‌های سنگ بکر

مهمترین عامل‌هایی از سنگ بکر که بر حفرپذیری تأثیر دارند شامل مقاومت فشاری تک محوری سنگ، مقاومت کششی، شکنندگی و سختی سنگ می‌باشند. مقاومت فشاری تک محوری سنگ به عنوان شاخصی برای ارزیابی مقاومت سنگ در برابر نفوذ ابزار برشی اندازه‌گیری می‌شود. در بسیاری از مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل، مقاومت فشاری تک محوری سنگ یکی از عامل‌های ورودی مدل می‌باشد. فاوست^۱ (۱۹۹۳) با بررسی رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و نرخ نفوذ ماشین حفار در سنگ‌هایی

¹ Fawcett

از جنس شیل و ماسه سنگ، کاهش نرخ نفوذ با افزایش مقاومت فشاری تک محوری را بیان کرده است (فاوست، ۱۹۹۳). برای دستیابی به رابطه واقعی بین میزان خردایش سنگ و مقاومت فشاری تک محوری بایستی توجه خاصی به نحوه شکست نمونه در زمان انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری شود. پیش‌بینی برش مکانیکی سنگ با تکیه بر مقاومت فشاری سنگ، ممکن است نتایج نادرستی را ارائه نماید (یاگیز، ۲۰۰۶). مقاومت کششی برزیلی یکی دیگر از خواص سنگ بکر می‌باشد که در کنار مقاومت فشاری تک محوری برای پیش‌بینی حفرپذیری سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاومت کششی، شاخصی است که نشان دهنده مقاومت کششی سنگ در نقطه شروع گسترش ترک در بین مسیرهای برش می‌باشد. چقرمگی و شکنندگی سنگ نیز عامل‌هایی هستند که بر روی حفرپذیری سنگ تأثیر می‌گذارند. به طور معمول با افزایش شکنندگی سنگ، کارایی ابزار برش سنگ نیز افزایش می‌یابد. بنابراین شکنندگی سنگ یک خصوصیت بسیار مناسب برای بررسی قابلیت حفرپذیری سنگ می‌باشد. یاگیز (۲۰۰۶) در مطالعات خود در تونل کوبینز در نیویورک به بررسی ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و شاخص شکنندگی با نرخ نفوذ واقعی ماشین حفار پرداخته است. نتایج بیانگر این است که بیشترین ضریب همبستگی مربوط به ارتباط بین نرخ نفوذ واقعی با شاخص شکنندگی سنگ می‌باشد (یاگیز، ۲۰۰۶). این آزمایش بهترین فرآیند خرد شدن سنگ تحت فشار را نشان می‌دهد لذا از این آزمایش برای پیش‌بینی نیروی عمودی لازم برای انتخاب کله حفار مناسب برای رسیدن به نرخ نفوذ مدنظر و همچنین تحلیل کارایی ابزار برشی در ماشین‌های حفاری استفاده می‌شود.

۳-۲-۲- عامل‌های توده سنگ

علاوه بر ویژگی‌های سنگ بکر، عامل‌های توده سنگ نیز در حفرپذیری آن مؤثر می‌باشند که مهمترین این عامل‌ها مربوط به عامل‌های درزه‌داری است. تحقیقات انجام شده بیانگر این است که در بین عامل‌های درزه‌داری، فاصله‌داری و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها بیشترین تأثیر را بر حفرپذیری توده‌سنگ دارند. در توده‌سنگ‌های بلوکی با دو یا سه دسته درزه مشابه، اثر جهت‌داری درزه‌ها را می‌توان بسیار ناچیز فرض کرد. جهت‌داری ناپیوستگی‌ها فقط

در مواردی که یک دسته ناپیوستگی غالب با ویژگیهای منحصر به فرد در توده سنگ وجود دارد، مانند توده سنگ‌های شدیداً متورق و شیبستوز می‌تواند عاملی مؤثر بر حفرپذیری محسوب شود (پالترینیری^۱، ۲۰۱۵). اثر جهت‌داری درزه‌ها به عنوان یک عامل مؤثر در نرخ نفوذ توسط محققان بیشتر با استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این موضوع به علت ساده‌تر بودن این روش‌ها نسبت به روش‌های آزمایشگاهی می‌باشد (هیانگ و همکاران^۲، ۲۰۱۳). گانگ و ژائو در سال ۲۰۰۵ به بررسی اثر جهت درزه‌های یک دسته درزه بر نرخ نفوذ پرداختند که با توجه به نتایج مدل‌سازی، افزایش زاویه‌ی بین جهت درزه‌ها و محور تونل تا ۶۰ درجه سبب افزایش نرخ نفوذ دیسک و پس از آن باعث کاهش نرخ نفوذ می‌شود. بنابراین بیشترین نرخ نفوذ در زاویه ۶۰ درجه رخ می‌دهد (گانگ و ژائو، ۲۰۰۵). پالترینیری (۲۰۱۵) بیان داشته است که درزه‌های موازی با محور تونل حداقل تأثیر را در عملکرد ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل دارند. همچنین یک جهت‌گیری حدود ۶۰ درجه با محور تونل، بیشترین افزایش را در نرخ نفوذ خواهد داشت. خصوصیت دیگر درزه‌ها که بر نرخ نفوذ دیسک تأثیر دارد، فاصله‌داری می‌باشد. گانگ و ژائو در سال ۲۰۰۶ به بررسی اثر فاصله درزه‌ها از ۱۰ تا ۵۰۰ میلیمتر بر نرخ نفوذ پرداختند که با توجه به نتایج مدل‌سازی، با افزایش فاصله درزه‌ها نرخ نفوذ کاهش می‌یابد (گانگ و ژائو، ۲۰۰۶). شریف‌زاده و همکاران در سال ۲۰۰۹ اثر فاصله‌داری و شیب دسته درزه بر عملکرد ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که زاویه بحرانی شیب دسته درزه که در آن احتمال حداکثر پیشروی وجود دارد بین ۴۵ تا ۶۰ درجه است (شریف‌زاده و همکاران، ۲۰۰۹). بجاری و همکاران در سال ۲۰۱۱ به مطالعه اثرات همزمان فاصله‌داری و جهت‌گیری درزه در نرخ نفوذ تک دیسک برشی با استفاده از روش اجزا محدود پرداخته‌اند. نتایج حاصله نشان داد که با افزایش فاصله‌داری درزه‌ها باعث کاهش نرخ نفوذ می‌شود (بجاری و همکاران، ۲۰۱۱). بجاری و خادمی در سال ۲۰۱۳ به مطالعه تأثیر همزمان فاصله درزه‌ها و جهت‌داری آنها در بهره‌وری ماشین حفار

¹ Paltrinieri

² Huang et al

در توده سنگ درزه‌دار با استفاده از مدل‌سازی المان مجزا بر روی دو دیسک برشی پرداختند. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد با افزایش فاصله درزه‌ها در یک جهت مشخص، بهره‌وری کاهش می‌یابد (بجاری و خادمی، ۲۰۱۳).

۳-۲-۳- عامل‌های عملیاتی ماشین حفاری مکانیزه تونل

مهمترین عامل‌های ماشین که بر حفرپذیری و نرخ نفوذ تأثیر دارد، شامل نوع دیسک، شکل و قطر دیسک، تعداد و فاصله دیسک‌ها و قطر کله حفار و همچنین عامل‌های عملیاتی ماشین مانند نیروی پیشران^۱ و گشتاور^۲ می‌باشند. نیروی پیشران ماشین، نیروی لازم برای نفوذ ابزار برشی در سنگ را تأمین می‌کند. رابینز (۱۹۷۰) نمودارهایی را برای سنگ‌های مختلف ارائه کرده است که این نمودارها تخمین نسبتاً خوبی از نرخ نفوذ بر اساس نیروی پیشران و مقاومت فشاری تک محوری سنگ می‌دهند (رابینز، ۱۹۷۰). نیروی گشتاور نیز نیروی لازم برای چرخش دیسک بر روی سطح سنگ را فراهم می‌کند. برای بررسی تأثیر نوع و اندازه دیسک در نرخ نفوذ ماشین می‌توان از مبانی توزیع تنش در محدوده بین دیسک و سطح سنگ استفاده کرد (ویلفینگ، ۲۰۱۶).

۳-۳- عامل‌های حفرپذیری سنگ در مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری مکانیزه

یکی از مسائل مهم در ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل با توجه به هزینه‌های بالای تأمین آنها، پیش‌بینی نرخ نفوذ برای برنامه‌ریزی اجرای یک پروژه می‌باشد. با توجه به اینکه نرخ نفوذ با حفرپذیری توده‌سنگ در ارتباط می‌باشد لذا لحاظ کردن عامل‌های مؤثر در حفرپذیری در مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ اهمیت خاصی دارد. با توجه به اهمیت موضوع، محققان از سال ۱۹۶۰ تلاش کرده‌اند تا با بررسی تأثیر عامل‌های مختلف حفرپذیری سنگ و ماشین در نرخ نفوذ، مدل‌هایی را برای پیش‌بینی این موضوع ارائه کنند. مدل‌های ارائه شده تا اکنون به روش تجربی یا تئوری می‌باشند که همه مدل‌ها براساس رفتار سنگ و نیرو- نفوذ هستند (راکسبورو^۳، ۱۹۷۵).

¹ Thrust

² Torque

³ Roxborough

ازدمیر (۱۹۷۷)، کوک^۱ و همکاران (۱۹۸۴)، سانئو^۲ (۱۹۸۵)، سنودن^۳ و همکاران (۱۹۸۳) پنگ^۴ و همکاران (۱۹۸۹)). مدل‌های تجربی، بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از عملکرد ماشین‌های حفاری مکانیزه تونل در پروژه‌های مختلف می‌باشند. این مدل‌ها از همبستگی بین خصوصیات سنگ، عامل‌های ماشین و نرخ نفوذ واقعی حاصل شده‌اند. این در واقع بدان معنی است که همه اثرات شرایط زمین، خواص سنگ، عامل‌های ماشین‌آلات و محدودیت‌های اجرایی به طور مستقیم یا غیر مستقیم در نظر گرفته شده‌اند. استفاده از مدل‌های تجربی محدود به شرایط مشابه با شرایط بانک اطلاعات اولیه مدل می‌باشد. در غیر این صورت پاسخ حاصل از مدل‌ها از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد. در میان مدل‌های تجربی، مدل توسعه یافته در دانشگاه علوم و تکنولوژی نروژ^۵ (NTNU) (برولند و همکاران (۱۹۹۵)، برولند و نیلسن^۶ (۱۹۹۵)، پالمستروم^۷ (۱۹۹۵)، برولند (۱۹۹۸)) یکی از شناخته‌ترین مدل‌های تجربی است. مدل‌های تئوری نیز بر مبنای تجزیه و تحلیل نیروها و انرژی ویژه در حین خردایش سنگ می‌باشند. در بین مدل‌های تجربی، مدل توسعه داده شده توسط مدرسه معدن کلرادو (CSM^۸) (نیلسن و ازدمیر (۱۹۹۳)، رستمی و ازدمیر (۱۹۹۳)، رستمی و همکاران (۱۹۹۶)، رستمی (۱۹۹۷)) بهترین تخمین را از نرخ پیشروی با ترکیب روابط نیروی پیشران، گشتار و نفوذ با هدف بهبود طراحی کله‌حفار می‌دهد. علاوه بر این مدل‌ها، مدل‌های مهم دیگری نیز وجود دارند که بر اساس سیستم طبقه‌بندی توده سنگ مانند مدل Q_{TBM} (بارتن^۹، ۲۰۰۰) و یا مدل RME^{۱۰} (بینیائوسکی^{۱۱} (۲۰۰۶)، بینیائوسکی و همکاران (۲۰۰۷، ۲۰۰۸)) می‌باشند. همچنین

¹ Cook

² Sanio

³ Snowdon

⁴ Peng

⁵ Norwegian University of Science and Technology

⁶ Nilsen

⁷ Palmström

⁸ Colorado School of Mines

⁹ Barton

¹⁰ Rock Mass Excavability

¹¹ Bieniawski

مدل‌های دیگری مانند مدل ساپینی^۱ و همکاران (۲۰۰۲)، مدل گانگ و ژائو^۲ (۲۰۰۹)، مدل حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۱)، زارع و رمضان‌زاده (۲۰۱۶)، آلپین مدل^۳ (۲۰۱۶)، توسعه مدل NTNU (۲۰۱۷) و مدل ملکی (۲۰۱۸) که بر اساس روابط بین عامل‌های توده سنگ، سنگ بکر، ماشین و نرخ نفوذ ارائه گردیده‌اند. در هر کدام از مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی نرخ نفوذ، عامل‌های مختلفی از سنگ بکر و توده سنگ لحاظ شده که این عامل‌ها در حفرپذیری سنگ تأثیر دارند.

۳-۴- مدلسازی عددی خردایش سنگ بوسیله دیسک

یکی از تحقیقات مهمی که امروزه بطور گسترده در حال انجام می‌باشد، تحقیق در خصوص بهبود طراحی و کارایی ماشین‌های حفار می‌باشد که بدین منظور توجه خاصی بر روی مدلسازی عددی خردایش سنگ بوسیله دیسک با استفاده از تحلیل دینامیکی المان محدود شده است. از روش‌های عددی برای تخمین نیروی لازم برای برش سنگ استفاده می‌شود که این روش‌ها قادرند با مدلسازی فرآیند خردایش سنگ، شرایط پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل را تسهیل کنند. کوک^۴ و همکاران در سال ۱۹۸۴ مقایسه‌ای بین نتایج خردایش سنگ ناشی از گوه به روش مدلسازی دوبعدی به روش تفاضل محدود با نتایج تجربی داشتند (کوک، ۱۹۸۴). بیلگین^۵ و همکاران نیز در سال ۲۰۰۰ با بکارگیری نرم افزار فرنس دو بعدی^۶ (نرم افزار تحلیل دوبعدی الاستیک خطی به روش تفاضل محدود) به بررسی تأثیر تنش‌های موضعی بر بهره‌وری برش دو نوع مواد (گچ و بتن) با استفاده از ابزار برش قلمی پرداخته‌اند (بیلگین و همکاران، ۲۰۰۰). لیو^۷ و همکاران در سال ۲۰۰۲ و کو^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۴ با استفاد از تأثیر متقابل ابزار-سنگ با کد R-T2D، مدل‌سازی خردایش سنگ با ابزاری

¹ Sapigni

² Gong and Zhao

³ Alpine model

⁴ Cook

⁵ Bilgin

⁶ Franc2D

⁷ Liu

⁸ Kou

گوه‌ای تکی و دوتایی انجام داده‌اند (کو و همکاران، ۲۰۰۴). گانگ^۱ و همکاران در سال های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶، اثر فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها بر فرآیند برش سنگ با تیغه‌های دیسکی مورد بررسی قرار دادند. ایشان همچنین در سال ۲۰۰۶ روند خردایش سنگ با دو دیسک و نیز فاصله بهینه بین آنها را با استفاده از روش دو بعدی المان مجزا با استفاده از نرم افزار یودک^۲ بررسی کردند (گانگ، ۲۰۰۶). روژک^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۰، مدل‌سازی روند برش سنگ به روش المان مجزا را انجام داد که در این مدل‌سازی دو ابزار نوک قلمی و دیسک مقطع ثابت به صورت سه بعدی مدل شده است. المان‌های سنگ از نوع المان مجزای کروی انتخاب و مدل سنگ ساخته شده با استفاده از مقاومت فشاری تک محوری و آزمون برزیلی کالیبره شده است. در این مدل‌سازی، نیروهای برش حاصل شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است (روژک و همکاران، ۲۰۱۰). مابارا^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۱ به مطالعه عددی اثر تنش محصور کننده در خردایش سنگ به وسیله دیسک‌های ماشین حفار به روش تفاضل محدود پرداختند. در این مطالعه در مرحله اول، بر اساس ویژگی‌های منحنی نیرو- عمق نفوذ، شرایط تنش محصور کننده برای حفاری تونل با استفاده از ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل، بر اساس شاخصی با تعریف نسبت تنش محصور کننده به مقاومت فشاری تک محوری به سه دسته تقسیم گردیده است. در ادامه فرآیند خردایش سنگ به وسیله برش دهنده دیسکی با تنش‌های محصور کننده مختلف با استفاده از کد RFPA2D که بر اساس آنالیز المان محدود می‌باشد، مدل‌سازی شده است (مابارا و همکاران، ۲۰۱۱). لی و شی^۵ در سال ۲۰۱۲ به مدل‌سازی عددی نیروهای مؤثر بر ابزار دیسکی با در نظر گرفتن فشار محصور کنندگی و آسیب در سنگ با استفاده از نرم افزار انسیس^۶ و ال‌اس‌داین^۷ پرداخته‌اند. نتایج این مدل‌سازی نشان دهنده افزایش نیروهای عمودی و غلتشی با افزایش عمق نفوذ و همچنین افزایش بیشتر نیروی عمودی نسبت به نیروی غلتشی با افزایش فشار محصور کننده می‌باشد

¹ Gong and Zhao

² UDEC

³ Rojek

⁴ Mabara

⁵ Li and Shi

⁶ ANSYS

⁷ LS-DYNA

(لی و شی، ۲۰۱۲). لابرا^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲ تحقیقی را در خصوص پیشرفت در توسعه کاربرد روش‌های المان مجزا برای فرآیند حفاری انجام دادند. آنها آزمایش برش خطی را با استفاده از روش المان مجزا مدلسازی کردند. در این مدلسازی سنگ گرانیت گنیس به ابعاد ۱ متر در ۰/۷ متر و به ضخامت ۰/۷ متر و همچنین دیسک برشی مقطع ثابت با قطر ۱۷ و ۱۹ اینچ استفاده شده است. در این تحقیق به مقایسه نیروهای برشی نرمال و غلتشی حاصل شده از مدلسازی با محاسبه شده از مدل CSM پرداخته شده است. مدل - مورالز و بوتل ریوندا^۲ در سال ۲۰۱۳ به طراحی و بهینه‌سازی ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل به کمک مدلسازی فرآیند برش سنگ با دیسک مقطع ثابت با روش المان مجزا پرداختند. با استفاده از مدل ساخته شده به اندازه‌گیری اثر متقابل بین نیرو و سنگ برای طراحی ماشین‌های حفار مکانیزه تمام مقطع تونل پرداخته شده است. برای این منظور آزمایش برش خطی مدلسازی، که در این مدلسازی قطعه سنگ (گرانیت) به ابعاد ۴۰×۲۰ سانتی‌متر و ضخامت ۵ سانتی‌متر و دیسکی ۱۷ اینچ لحاظ گردیده است. در این بررسی با توجه به اینکه هیچگونه آزمایش برش خطی واقعی انجام نشده است لذا انرژی ویژه حاصل از مدلسازی عددی با انرژی ویژه محاسبه شده با استفاده از مدل CSM برای نرخ نفوذهای ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر مقایسه گردیده است. این مقایسه بیانگر تقریب خوب تخمین نیرو و انرژی ویژه می‌باشد (مدل - مورالز، ۲۰۱۳). هیویان لی و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۶ به مدلسازی آزمایش برش خطی با نرم افزار ال‌اس‌داین‌ا پرده‌ای برشی حاصل از مدلسازی را با نتایج تجربی آزمایش برش خطی مقایسه کردند. در مدلسازی در ابتدا یک دیسک ۱۷ اینچ مدل و نمونه سنگ گرانیتی قرمز کلرادو با مقاومت فشاری تک محوری ۱۵۸ مگاپاسکال و به ابعاد ۹۰۰×۱۸۰×۱۷۰ میلی‌متر لحاظ شد (هیویان و همکاران، ۲۰۱۶). نتایج نشان می‌دهد که نیروی عمودی به‌دست آمده از دو روش با یکدیگر مطابقت داشته و نیروی غلتشی تقریباً ۱۰ درصد اختلاف دارد. ایکسیا^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۷ نتایج بررسی خود را در خصوص تأثیر فاصله دیسک کاتر با سطح آزاد

¹ Labra

² Medel-Morales and Botello-Rionda

³ Huiyun Li et al.

⁴ Xia

سنگ در خردایش سنگ را منتشر کردند. آنها برای این بررسی در ابتدا مدل‌های عددی از خردایش سنگ توسط یک دیسک ساخته شده سپس اثر فاصله بین برش با سطح آزاد توده سنگ مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه آزمایش برشی خطی با فواصل مختلف از سطح آزاد سنگ انجام شده و در نهایت نتایج حاصل از آزمایش با نتایج مدل‌سازی عددی مقایسه شده است. در این مدل‌سازی سه بعدی (به روش تفاضل محدود) یک دیسک ۱۷ اینچ با مقطع ثابت به قطر خارجی ۴۳۲ میلی‌متر، قطر داخلی ۳۸۴ میلی‌متر و عرض ۷۶ میلی‌متر مدل شده است. نمونه سنگ به شکل مکعب به ابعاد ۳۰۰ میلی‌متر و المان‌های مدل‌سازی نیز به شکل مکعب و همچنین عمق نفوذ دیسک کاتر به صورت ثابت ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. فاصله بین دیسک و یک طرف نمونه در جهت X به مقدار ۱۰۰ میلی‌متر و حرکت دیسک در جهت Z با سرعت ۴ متر بر ثانیه برای رسیدن به برش خطی می‌باشد (ایکسا، ۲۰۱۷). ژانگ و همکاران^۱ در سال ۲۰۲۰ به بررسی فرآیند خردایش سنگ توسط دیسک کاتر در زمین‌های ترکیبی پرداختند. آنها برای این بررسی از نرم افزار PFC3D استفاده کردند. نتایج این بررسی بیانگر تغییر نیروی عمودی و نیروی چرخشی دیسک هنگام حرکت از سنگ سخت به سنگ نرم می‌باشد (ژانگ، ۲۰۲۰). فرجی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به مدل‌سازی عددی برش سنگ با تیغه دیسکی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداختند. آنها نتایج حاصل از مدل‌سازی را با نتایج آزمایش برش خطی مقایسه که در این مقایسه نیروی عمودی ۱۵ درصد و نیروی غلتشی ۲۱ درصد نسبت به نتایج آزمون اختلاف داشتند (فرجی، ۱۳۹۵). محمدی و همکاران در سال ۱۳۹۶ برای تعیین نیروهای خردایش سنگ آهک ایندیانا از مدل‌سازی آزمون برش خطی استفاده کردند. این مدل‌سازی که با نرم‌افزار آباکوس انجام شده است میزان انحراف نیروی عمودی و غلتشی حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمون گزارش شده توسط رستمی در سال ۱۹۹۷ به ترتیب ۱/۱ و ۵/۶ درصد انحراف داشته‌اند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۶).

¹ Zhiqiang Zhang

۳-۵- جمع‌بندی

تاکنون مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل ارائه شده است. در مقایسه این مدل‌ها آنچه که موجب برتری و افزایش دقت یک مدل نسبت به سایر مدل‌ها است لحاظ شدن عامل‌هایی از سنگ بکر و توده‌سنگ (که تأثیر در حفرپذیری سنگ دارند) در مدل می‌باشد. در مدل‌های ارائه شده، عموماً از عامل‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی سنگ استفاده شده است. علت این امر در دسترس بودن این عامل‌ها می‌باشد. بعضاً از شاخص شکنندگی و درزه‌داری توده‌سنگ نیز استفاده کرده‌اند اما این عامل‌ها به تنهایی نمی‌تواند بیانگر حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار باشند.

فصل چهارم

جمع آوری داده‌های میدانی

۴-۱- مقدمه

به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های درزه‌داری توده‌سنگ درزه‌دار در حفاری با ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل لزوم جمع‌آوری داده‌های میدانی شامل عامل‌های ژئومکانیکی زمین و عامل‌های عملیاتی ماشین در پروژه‌های تونلسازی متعدد وجود دارد. برای تحقق این هدف، بانک داده‌ای از عامل‌های سنگ بکر، توده‌سنگ و عملیاتی ماشین حفار از پروژه‌های تونل‌های انتقال آب کرمان و زاگرس در ایران، تونل انتقال آب کویینز در نیویورک و تونل ماروشی-واکولا در هند تشکیل شده است. در این فصل پس از بیان مشخصات کلی پروژه‌های تشکیل دهنده بانک داده از جمله موقعیت جغرافیایی، مشخصات تونل و... به تحلیل کیفی و کمی این بانک با استفاده از نرم افزار SPSS پرداخته شده است.

۴-۲- بانک داده

یکی از مراحل مهم در پروژه‌های تونلسازی، ثبت و جمع‌آوری داده‌ها در زمان حفاری تونل می‌باشد. این داده‌ها معمولاً شامل عامل‌های زمین‌شناسی مهندسی، عامل‌های عملیاتی ماشین حفار (نیروی پیشران، گشتاور، سرعت دوران کله حفار) می‌باشد که معمولاً به دو روش جمع‌آوری و ثبت می‌گردد. روش اول، ثبت داده در فرم‌های خاص اپراتور که بطور منظم و پیوسته توسط اپراتور ماشین حفار و مسئول شیفت تونل انجام می‌گیرد. روش دوم، ثبت داده توسط سیستم ثبت داده^۱ ماشین که در حافظه ماشین ذخیره و بصورت دوره‌ای تخلیه و تفسیر می‌شوند. لازم به توضیح است که اطلاعات ثبت شده در فرم‌های اپراتور و سیستم ثبت داده به صورت داده خام می‌باشند که برای استفاده لازم است این داده‌ها مرتب و در طول مسیر تونل و در دوره‌های زمانی مشخص مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرند. برای تجزیه و تحلیل این داده‌ها معمولاً از نرم افزارهایی دارای ابزارهای تحلیل آماری مانند نرم افزارهای اکسل^۲، SPSS و متلب^۳ استفاده می‌شود.

^۱ Programmable logic controller (PLC)

^۲ Excel

^۳ Matlab

۴-۳- مراحل تشکیل بانک داده

در این تحقیق برای تشکیل بانک داده سه مرحله اصلی به شرح ذیل طی شده است.

۴-۳-۱- مشخص کردن داده‌های مورد نیاز

با توجه به موضوع تحقیق که تأکید بر حفری توده سنگ درزه دار دارد، داده‌های مورد نیاز به سه گروه اصلی تقسیم شده است. گروه اول داده‌هایی که بیانگر خصوصیات ژئومکانیکی سنگ بکر که شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و شاخص شکست سنگ می‌باشد. گروه دوم اطلاعات مربوط به درزه‌داری توده سنگ که این اطلاعات شامل مشخصات هندسی درزه‌ها از جمله زاویه درزه‌ها، فاصله‌داری، تداوم و بازشدگی درزه‌ها است. عامل‌های عملیاتی ماشین حفار که شامل نیروی پیشران، گشتاور کله حفار، سرعت چرخش کله حفار و نرخ پیشروی ماشین در گروه سوم داده‌های مورد نیاز برای تشکیل بانک داده قرار دارند.

۴-۳-۲- جمع آوری داده

یکی از مراحل مهم در این تحقیق، جمع‌آوری داده است چرا که جمع آوری داده به طور معمول در پروژه‌های تونلسازی با محدودیت و مشکلات زیادی همراه می‌باشد. دسترسی به داده‌های مورد نیاز بسیار سخت هست زیرا مشکلاتی همانند عدم ثبت و بایگانی داده‌ها و ناقص بودن داده‌ها وجود دارد. در این تحقیق برای جمع‌آوری این داده‌ها از گزارش‌های زمین‌شناسی مهندسی در حین اجرای تونل، داده‌های ثبت شده در فرم‌های اپراتورهای حفاری، داده‌های ثبت شده در سیستم ثبت داده، گزارش‌های مربوط به اطلاعات برداشت‌های صحرایی و آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده، نقشه‌های چون‌ساخت^۱ و انجام آزمایش بر روی نمونه سنگ‌های موجود از مقاطع تونل، استفاده شده است. نام و مشخصات کلی پروژه‌های تشکیل دهنده بانک داده در جدول (۴-۱) بیان شده است. در این تحقیق برای تشکیل بانک داده از نرم افزار اکسل استفاده شده است.

¹ As Built

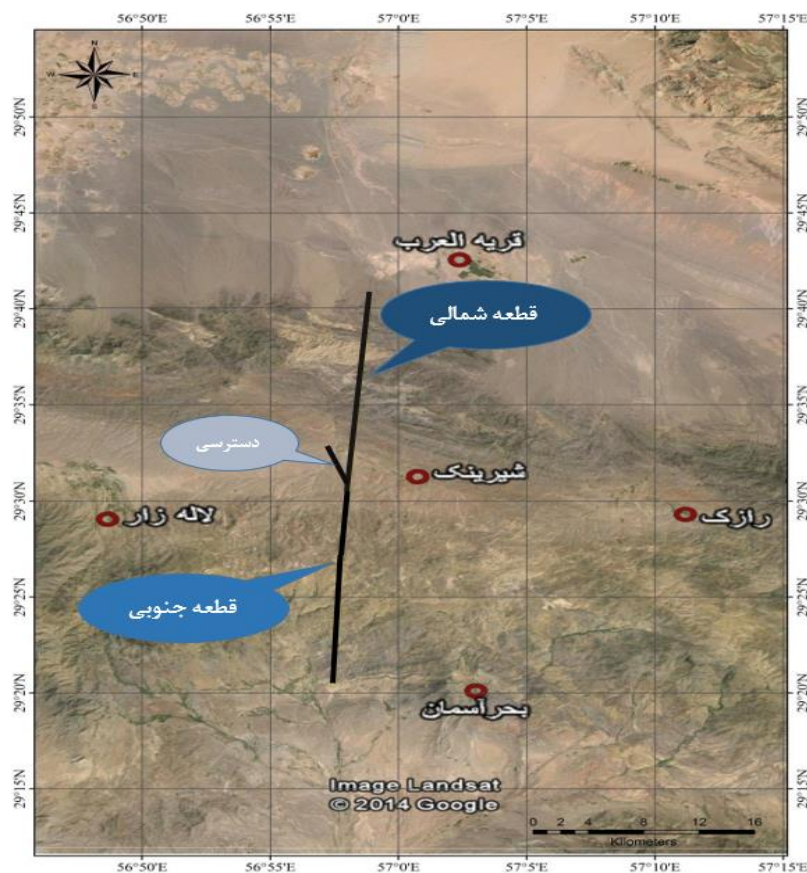
جدول ۴-۱: مشخصات کلی پروژه‌ها موجود در بانک داده

شماره	نام پروژه	کشور	طول کل تونل (کیلومتر)	قطر (متر)
۱	تونل انتقال آب کرمان	ایران	۲۸	۴/۶۶
۲	تونل زاگرس (قطعه ۲)	ایران	۲۶	۶/۷۳
۳	تونل کویینز	آمریکا	۳	۷/۰۵
۴	تونل ماروشی واکولا	هند	۵/۸	۳/۶

با توجه به محدودیت در جمع‌آوری داده‌ها (به ویژه داده‌های مربوط درزه‌داری سنگ) سعی گردیده است فقط داده‌های مربوط به مقاطعی از تونل‌ها در بانک داده وارد گردد که آن داده‌ها از نظر صحت، از درجه اطمینان بالایی برخوردار باشند. در ادامه این فصل توضیحات تکمیلی مربوط به هر یک از پروژه‌های تشکیل دهنده بانک داده آورده شده است.

۴-۴- تونل انتقال آب کرمان

شهر کرمان، مرکز استان کرمان در جنوب شرقی ایران در حاشیه کویر لوت در طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۷ دقیقه قرار دارد. ارتفاع متوسط مرکز شهر کرمان از سطح دریا ۱۷۶۰ متر می‌باشد. این شهر در قسمت شمال شرقی دشت کرمان واقع شده و در قسمت‌های جنوب و غرب آن ارتفاعات جوپار، پلوار و جفتان با حدود ۴۰۰۰ متر ارتفاع قرار دارد. محدوده مطالعه طرح انتقال آب کرمان در شمال غربی حوزه آبریز جازموریان به مساحت تقریبی ۱۰ هزار کیلومترمربع می‌باشد. تونل انتقال آب کرمان از دو قطعه به نام‌های قطعه شمالی و قطعه جنوبی و یک تونل دسترسی تشکیل شده است. قطعه شمالی با قطر تمام شده ۳/۹ متر و با شیب ۰/۱۳۶- درصد از موقعیت حدود ۱۹+۲۰۰ متر شروع که وظیفه آن انتقال آب با جریان آزاد از تراز ۲۳۹۰/۶۶ به دهانه خروجی (تراز ۲۳۶۵/۳۹) می‌باشد. قطعه جنوبی با قطر تمام شده ۴/۵ متر و با طول حدود ۱۹/۲ کیلومتر و شیب ۰/۰۶ درصد از دهانه ورودی (تراز ۲۳۷۸/۷۳ متر از سطح دریا) تا روستای سرزه ادامه دارد (شکل (۴-۱)).



شکل ۴- ۱: تصویر کلی تونل انتقال آب کرمان (گزارش زمین شناسی مهندسی، ۱۳۹۵)

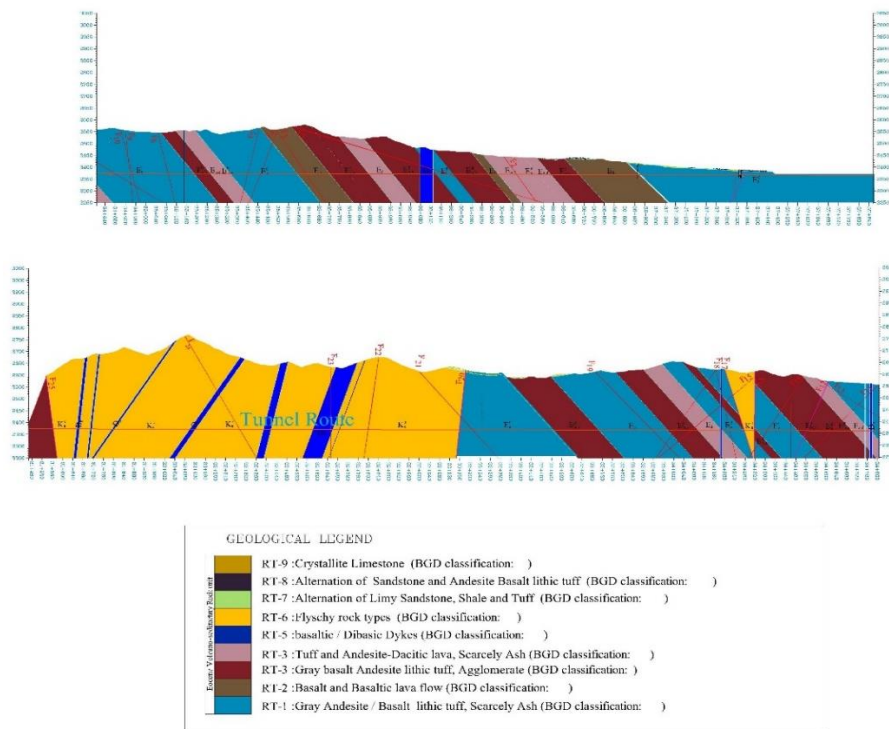
حفاری دو قطعه تونل با دو ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل انجام می‌شود. برای دمونتاز و خروج دو ماشین و همچنین، رفع محدودیت‌های هیدرولیکی در قطعه تحت فشار، یک تونل دسترسی پیش‌بینی شده است. قطعات هر ماشین بعد از دمونتاز از تونل دسترسی خارج می‌شود. این تونل به شکل نعل اسبی و با عرض تمام شده ۵/۴ و با شیب منفی ۱۱/۴ درصد، طولی در حدود ۲۶۱۲ متر خواهد داشت و به صورت سنتی حفر خواهد شد. مشخصات ماشین حفار قطعه شمالی به شرح جدول (۲-۴) می‌باشد.

جدول ۴-۲: مشخصات ماشین حفار مکانیزه تمام مقطع تونل مربوط به قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان (گزارش زمین شناسی مهندسی، ۱۳۹۵)

توضیحات	عامل
سنگ سخت - دوسپره - بسته	نوع
هرنکشت	شرکت سازنده
۴/۶۵	قطر حفاری (متر)
۳/۹	قطر تمام شده (متر)
۲۷	تعداد دیسک
۴۳۲	قطر دیسک (میلی متر)
۶۲	فاصله دیسک ها (سانتی متر)
۱۶۹۱۳	حداکثر نیروی پیشران (کیلو نیوتن)
۱۷۲۵	حداکثر نیروی گشتاور (کیلو نیوتن متر)
۱۴	حداکثر گشتاور (دور بر دقیقه)

۴-۴-۱- زمین شناسی

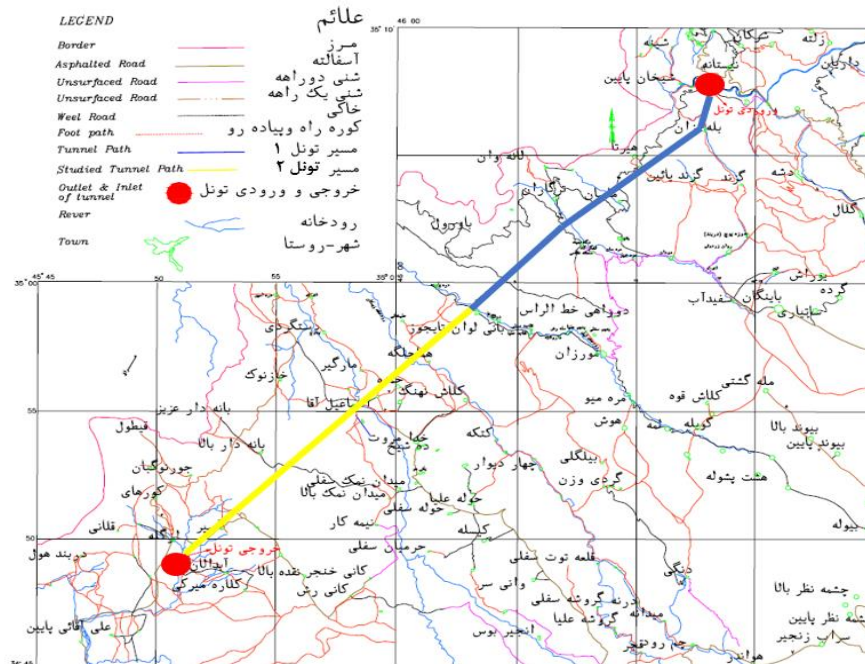
زمین شناسی محدوده مورد بررسی طرح و منطقه کرمان از نظر چینه شناسی و ساختاری پیچیده است. توده های سنگی از نظر سنی احتمالاً به پرکامبرین تا عهد حاضر تعلق دارند. همچنین بررسی ناحیه ای سنگ های ائوسن در زیر پهنه های کمان ماگمایی ارومیه بزمان، شمال باختر ایران مرکزی، پهنه لوت، زون سنندج سیرجان، و کوه های خاور ایران، می تواند بیانگر ویژگی های عمومی این سنگ ها باشد. در شمال باختری ایران مرکزی، برون زده های ائوسن با اندکی تغییر، ویژگی هایی نزدیک به ائوسن البرز دارند به گونه ای که گاه واژه های فجین، زیارت و کرج، همچنان در این نواحی کاربرد دارد. در جنوب باختری کرمان، سنگ های ائوسن به طور عمده خاستگاه آتشفشانی دارند که نشانگر نهشت زیاد مواد آتشفشانی و ستبر شدن سریع لایه ها در فاصله زمانی کوتاه می باشد. در مجموع ۱۰ واحد زمین شناسی مهندسی در بخش شمالی و ۱۳ واحد نیز در بخش جنوبی تونل شناسایی و از یکدیگر تفکیک گردیده اند. کل مسیر تونل تناوبی از واحدهای آهکی، ماسه سنگ، شیل، ماسه سنگ توفی، آندزیت بازالت، توف، لیتیک توف، گدازه های آندزیت بازالتی، سیلستون، دایک آندزیت بازالت، ماسه سنگ می باشد. در شکل (۴-۲) نیم رخ طولی زمین شناسی ۷ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: نیم رخ طولی زمین‌شناسی ۷ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان (گزارش زمین‌شناسی مهندسی، ۱۳۹۵)

۴-۵- تونل انتقال آب زاگرس (قطعه ۲)

پروژه تونل انتقال آب زاگرس بخشی از طرح تأمین آب دشتهای گرمسیری غرب کشور می‌باشد. در طرح گرمسیری، آب رودخانه سیروان در پایین دست ایستگاه دوآب پس از ذخیره سازی توسط یک سد، از طریق تونل ۵۰ کیلومتری زاگرس به دشت ذهاب و سایر دشتهای گرمسیری غرب کشور انتقال می‌یابد. ورودی تونل در منطقه زاگرس پاوه و نزدیکی روستای هیروی و خروجی آن در شمال سرپل ذهاب در نزدیکی روستای ازگله می‌باشد. امتداد تونل در جهت شمال شرق به جنوب غرب و در مسیر خود، رودخانه‌های مره خیل، ليله، زیمکان و کردی قاسمان را قطع می‌کند. این تونل از دو قطعه اصلی، قطعه یک از رودخانه سیروان تا روستای بانیلوان و قطعه دو از روستای بانیلوان تا روستای ازگله تشکیل شده است (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۳: تصویر کلی تونل انتقال آب زاگرس (گزارش زمین شناسی مهندسی، ۱۳۸۸)

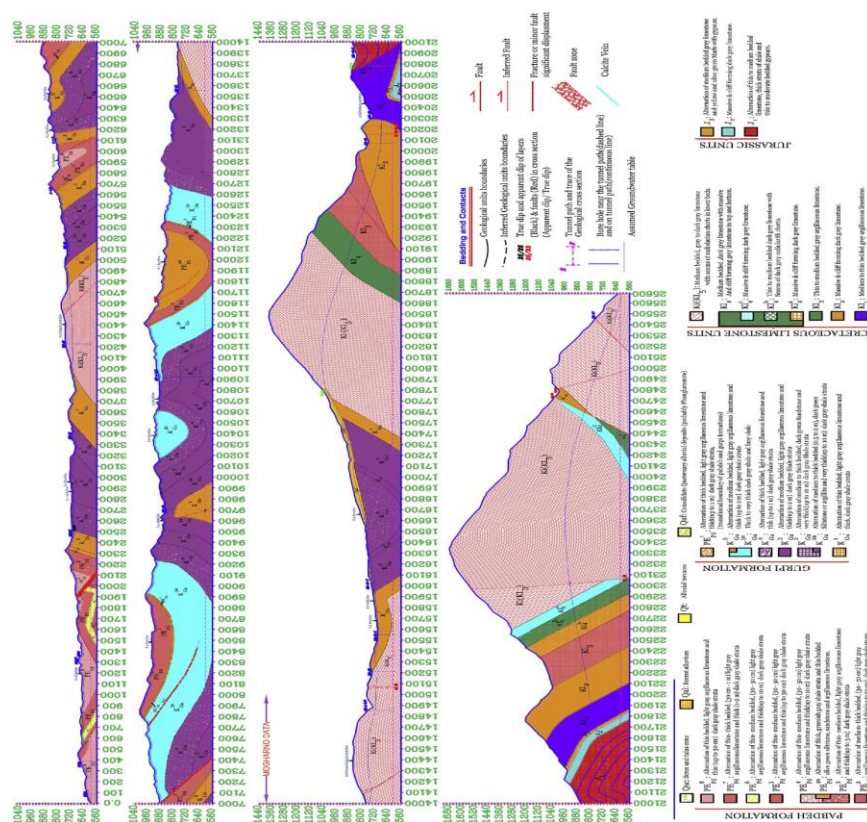
قطعه دوم تونل انتقال آب زاگرس به طول ۲۶ کیلومتر و قطر ۶ متر توسط یک ماشین حفار مکانیزه تمام مقطع تونل حفاری شده است. شیب این تونل ۰/۰۸۳ می باشد. در جدول (۴-۳) مشخصات کلی ماشین حفار قطعه دوم تونل انتقال آب آورده شده است.

جدول ۴-۳: مشخصات کلی ماشین حفار مکانیزه تمام مقطع تونل (قطعه دوم) (گزارش زمین شناسی مهندسی، ۱۳۸۸)

عامل	توضیحات
نوع	سنگ سخت- دوسپره- بسته
شرکت سازنده	هرنگشت
قطر حفاری (متر)	۶/۷۳
قطر تمام شده (متر)	۶
تعداد دیسک	۴۴
قطر دیسک (میلی متر)	۴۳۲
فاصله دیسک ها (سانتی متر)	۹۰
حداکثر نیروی پیشران (کیلو نیوتن)	۲۹۰۵۰
حداکثر نیروی گشتاور (کیلو نیوتن متر)	۴۷۴۷
حداکثر گشتاور (دور بر دقیقه)	۹

۴-۵-۱- زمین‌شناسی

قطعه دوم تونل انتقال آب زاگرس از نظر زمین‌شناسی در کمربند چین خورده-رانده زاگرس قرار گرفته است. کمربند چین خورده-رانده زاگرس با روند شمال باختری- جنوب خاوری از کوه‌های تاروس در ۳۰۰ کیلومتری جنوب خاور گسل آناتولی خاوری در شمال خاور ترکیه شروع شده و حدود ۱۸۰۰ کیلومتر طول دارد. واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در برش زمین‌شناسی مهندسی این تونل شامل سنگ آهک (LI)، شیل (SH)، سنگ آهک مارنی (ML) و شیل آهکی (LS) می‌باشد. در شکل (۴-۴) نیم‌رخ زمین‌شناسی مسیر تونل قابل ملاحظه است.

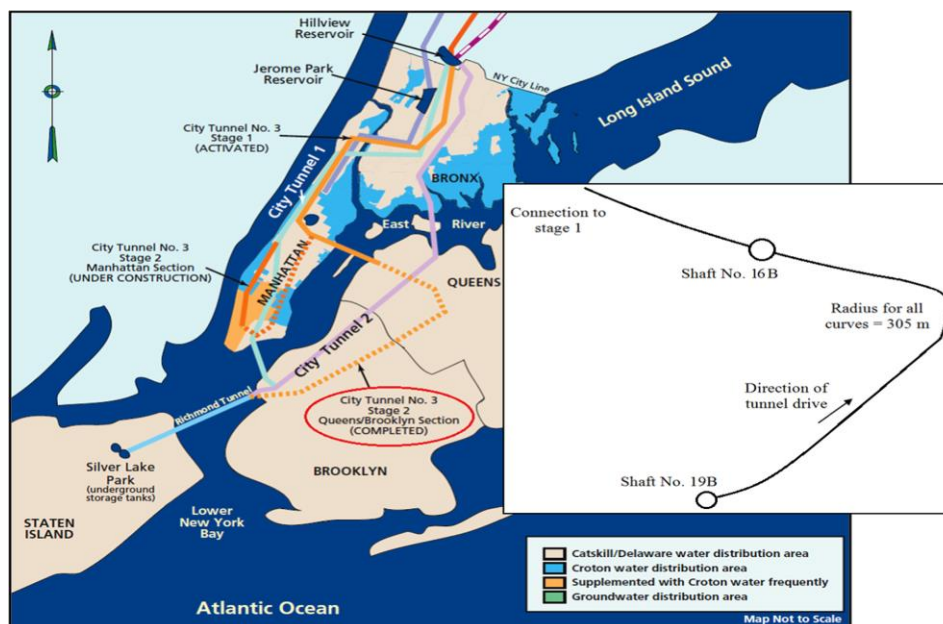


شکل ۴-۴: نیم رخ طولی زمین‌شناسی تونل انتقال آب زاگرس (قطعه ۲) (گزارش زمین‌شناسی مهندسی، ۱۳۸۸)

۴-۶- تونل انتقال آب کوبینز

تونل انتقال کوبینز بخشی از طرح تأمین سیستم آبرسانی شهر نیویورک می‌باشد که توسط اداره حفاظت از محیط زیست آن شهر ساخته شده است. طول این تونل در حدود ۹۷ کیلومتر است که در بخشهایی از مسیر تا

عمق ۱۵۰ متری در زیر سطح خیابان حفاری می‌شود. این تونل شامل چهار قطعه است که قطعه اول آن به طول ۲۱ کیلومتر و قطر ۷/۳ متر می‌باشد که از نیویورک آغاز و سپس از زیر پارک مرکزی در منهتن عبور و به زیر رودخانه شرقی و جزیره روزولت و در ادامه وارد کویینز می‌شود. ساخت این تونل از سال ۱۹۷۰ آغاز و در سال ۱۹۹۳ پایان یافته که به روش حفاری و انفجار ساخته شده است. قطعه دوم این تونل به طول ۱۶ کیلومتر که از رد هوک، بروکلین آغاز و به ماسپت، کویینز می‌رسد. قطر این تونل در بخش برکلین ۴/۹ متر و در بخش کویینز ۶/۵ متر می‌باشد. این تونل توسط دو ماشین حفار مکانیزه تمام مقطع، حفاری شده است. ساخت این تونل در سال ۲۰۰۸ اتمام و پس از تکمیل چاه‌های عمودی در سال ۲۰۱۳ به بهره برداری رسیده است. قطعه سوم به طول ۲۵/۷ کیلومتر و قطر ۷/۱ متر و همچنین بخش چهارم این تونل به طول ۲۲/۵ کیلومتر می‌باشد (شکل (۴-۵)).



شکل ۴-۵: طرح کلی تأمین سیستم آبرسانی شهر نیویورک (یاگیز، ۲۰۱۹)

مشخصات ماشین حفار قطعه سوم تونل انتقال آب کویینز در جدول (۴-۴) آورده شده است.

جدول ۴-۴: مشخصات ماشین حفار قطعه سوم تونل انتقال آب کویینز (یاگیز، ۲۰۰۲)

عامل	توضیحات
نوع	سنگ سخت- تک سپره- باز
شرکت سازنده	هرنکشت
قطر حفاری (متر)	۷/۰۵
قطر تمام شده (متر)	۶/۵
تعداد دیسک	۵۰
قطر دیسک (میلی متر)	۴۸۲
فاصله دیسک ها (سانتی متر)	۶۲
حداکثر نیروی پیشران (کیلو نیوتن)	۱۵۵۰
حداکثر نیروی گشتاور (کیلو نیوتن متر)	۳۶۲۴
حداکثر گشتاور (دور بر دقیقه)	۸/۳

۴-۶-۱- زمین شناسی

زمین شناسی مسیر تونل انتقال آب کویینز شامل پنج سازند اصلی می باشد که عبارتند از سازند شیست مانهاتن^۱ که متشکل از دانه های متوسط تا درشت از لایه های شیست و گنایس می باشد. سازند دوم سازند اینود^۲ است که این سازند از تیپ های مختلفی از تکه های مرمر دانه های درشت و سفید رنگ و مرمر کلسیت-دولومی تشکیل شده است. سازند هارتلند^۳ یکی دیگر از سازندهای مسیر تونل است که متشکل از دانه های هوازده و نازک و لایه های کوارتز و مسکویت شیست و کمی گارنت می باشد. سازند چهارم، سازند فوردهام^۴ است که از واحدهای بسیار پیچیده شامل هورنبلند، بیوتیت، کوارتز سفید و پلاژیوکلاز تشکیل شده است. همچنین مسیر تونل از سازند کامرون^۵ که متشکل از زون های برشی می باشد عبور می کند.

¹ Manhatan

² Inwood

³ Hartland

⁴ Fordham

⁵ Cameron

۴-۷- تونل انتقال آب ماروشی - واکولا

تأمین آب بمبئی یکی از بزرگترین طرح‌های تأمین آب در آسیا و هفتمین طرح در جهان می‌باشد. آب بمبئی از شش دریاچه بزرگ تأمین می‌شود که آب این دریاچه‌ها از طریق خط لوله‌های سطحی به مخازنی برای تصفیه انتقال پیدا می‌کند. با توجه به قدمت ۷۰ ساله لوله‌ها و پوسیدگی آنها و بالا بودن هزینه تعمیر و نگهداری لذا شهرداری بمبئی تصمیم به استفاده از تونل برای انتقال آب گرفته است. این طرح در حدود ۵۰ کیلومتر تونل می‌باشد که ۳۳ کیلومتر آن در دست ساخت می‌باشد (شکل ۴-۶).



شکل ۴-۶: تصویر کلی طرح تأمین آب بمبئی (پراسنا، ۲۰۱۴)

تونل ماروشی - واکولا به طول ۵۸۳۴ و قطر ۳ متر است که از طریق دو چاه عمودی به نام‌های چاه ماروشی به عمق ۸۰ متر و چاه واکولا به عمق ۶۳/۵ متر ساخته شده است. این تونل در تراز ارتفاعی ۳۵/۵ از سطح دریا واقع شده است. برای حفاری این تونل از دو ماشین حفار مکانیزه تمام مقطع استفاده شده است. مشخصات کلی این ماشین‌ها در جدول (۴-۵) بیان شده است.

جدول ۴-۵: مشخصات ماشین‌های حفاری مکانیزه تونل انتقال آب ماروشی-واکولا (پراسنا، ۲۰۱۴)

عامل	از چاه عمودی ماروشی تا چاه عمودی تهویه	از چاه عمودی واکولا تا چاه عمودی تهویه
نوع	سنگ سخت- باز	سنگ سخت- باز
شرکت سازنده	ویرث	ویرث
قطر حفاری (متر)	۳/۶	۳/۶
قطر تمام شده (متر)	۳	۳
تعداد دیسک	۳۱	۳۱
قطر دیسک (میلی متر)	۴۳۲	۴۳۲
فاصله دیسک‌ها (سانتی متر)	۶۲	۶۲
حداکثر نیروی پیشران (کیلو نیوتن)	۳۸۲۸	۳۸۲۸
حداکثر نیروی گشتاور (کیلو نیوتن متر)	۲۲۵	۱۸۵
حداکثر گشتاور (دور بر دقیقه)	۱۴	۱۲

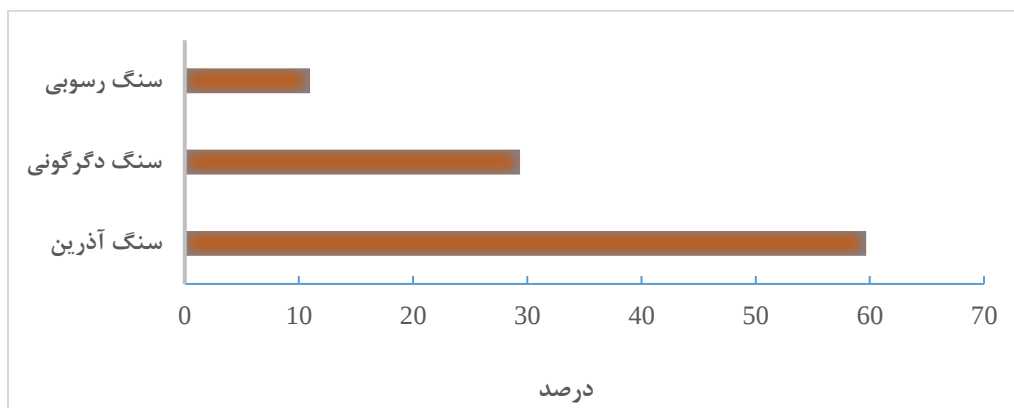
۴-۷-۱- زمین‌شناسی

از نظر زمین‌شناسی، کل ناحیه بمبئی متشکل از سنگ‌های بازالت دکن^۱ و آذرآواری مربوط به دوران کرتاسه تا پالئوژن می‌باشد. به طور کلی زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی شامل جریان‌های گدازه‌ای می‌باشد که در بین آنها ستون‌هایی از دایک با دانه‌بندی متوسط وجود دارند. جریان‌های گدازه‌ای بوجود آورنده انواع بازالت‌ها می‌باشند. نوع دیگر از سنگ‌های آتشفشانی موجود در منطقه، سنگ‌های پیروکلاستیک هستند که از قطعات مختلفی از ابعاد میلی‌متر تا سانتی‌متر تشکیل شده‌اند. سنگ‌های پیروکلاستیک شامل توف، توف بریکا، بریکا، آگلومرا می‌باشند. در مسیر تونل سه گروه اصلی سنگ شامل بازالت‌ها (بازالت فشرده، بازالت پورفیری، بازالت آمیگدالوئیدی)، پیروکلاستیک‌ها (توف و توف بریکا) و مصالح شیلی وجود دارد. در حدود ۳۵۶۹ متر از طول تونل در سنگ بازالت و ۱۲۵۷ متر از طول تونل در سنگ توف-بریکا و ۳۶۰ متر در سنگ توف حفاری شده است.

¹ Deccan basalt

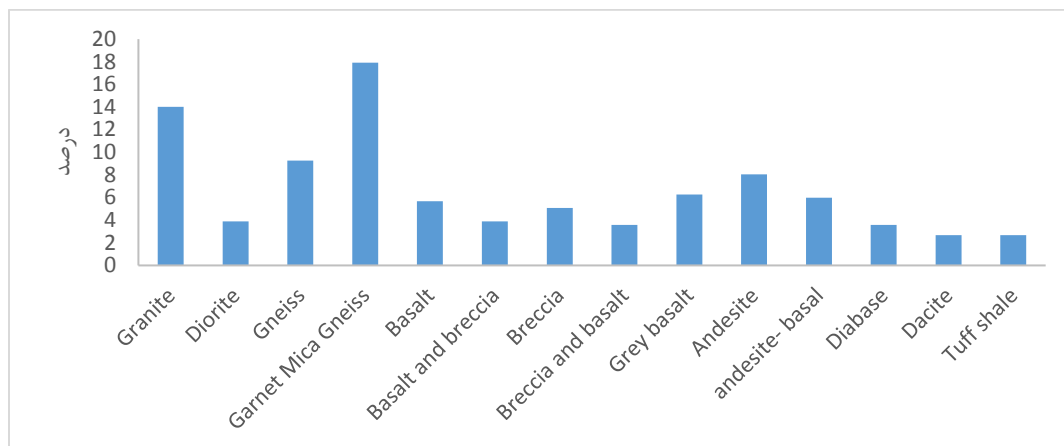
۴-۸- تحلیل آماری بانک داده

به منظور استفاده از بانک‌های اطلاعاتی برای اهداف مختلف، لزوم بررسی کارایی بانک داده وجود دارد. بدین منظور محققان به تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها می‌پردازند. در این تحقیق در مجموع عامل‌های سنگ بکر، درزه-داری توده‌سنگ و عملیاتی ماشین ۳۳۵ مقطع از تونل‌ها در بانک داده ثبت و مورد تحلیل قرار گرفته است. در این بخش درصد وجود انواع سنگ‌های مختلف و محدوده تغییرات داده‌ها از نظر آماری بررسی گردیده است. نوع سنگ‌ها و دامنه تغییرات عامل‌ها می‌تواند در مشخص نمودن محدوده کاربرد نتایج حاصل از این تحقیق مفید باشد. با توجه به اینکه خصوصیات بافتی و میکروسکپی سنگ‌ها در مقاومت و حفرپذیری آنها تأثیرگذار هست لذا بانک داده از نظر منشاء زمین‌شناسی و نوع سنگ تحلیل شده است. از نظر منشاء زمین‌شناسی، بانک داده از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی تشکیل که در شکل (۴-۷) میزان درصد هر کدام از سنگ‌ها نشان داده شده است.



شکل ۴-۷: درصد وجود هر یک از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی در بانک داده

از نظر نوع سنگ (که بر اساس کانی‌های تشکیل دهنده سنگ تفکیک و نام گذاری می‌شوند) در این بانک داده ۱۹ نوع سنگ مختلف وجود دارد که در شکل (۴-۸) میزان درصد وجود هر کدام از انواع سنگ‌ها آورده شده است.



شکل ۴-۸: درصد هر یک از انواع سنگ‌های تشکیل دهنده بانک داده

در جدول (۴-۶) داده‌های آماری محاسبه شده توسط نرم افزار SPSS مربوط به ۳۳۵ مقطع از تونل‌های موجود در بانک داده ارائه شده است.

جدول ۴-۶: مشخصات عامل‌های تشکیل دهنده بانک داده

پارامتر	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	زاویه صفحه درزه (درجه)	فاصله داری درزه (سانتی متر)	نیروی پیشران (کیلو نیوتن)	گشتاور (کیلو نیوتن- متر)	نرخ نفوذ (میلی متر بر دور)	شاخص حفر پذیری (کیلو نیوتن/ کاتر/ میلی متر/ دور)
تعداد داده	۳۳۵	۳۳۵	۳۳۵	۳۳۵	۳۳۵	۳۳۵	۳۳۵	۳۳۵
مقدار حداقل	۱۵	۲	۰	۵	۷۶۱	۸۸	۳	۵
مقدار حداکثر	۲۰۰	۳۰	۸۹	۳۰۰	۱۹۱۶۱	۱۸۸۹	۱۳	۱۵۸
متوسط	۱۲۱/۸۴	۹/۲	۴۱/۵۳	۱۰۹۴۳	۱۰۹۴۴	۹۳۰	۵/۵۳	۵۰/۱۲
انحراف معیار	۴۶/۳۵۳	۳/۲۸۷	۲۲/۴۷۹	۲۰/۳۳	۵۷۳۹	۴۸۰/۸۸۷	۲/۱۶	۳۱/۹۱
دامنه تغییرات	۱۸۵	۱۹	۸۹	۲۹۵	۱۸۳۹۹	۱۸۰۱	۱۰	۱۵۳
چارک‌ها	۲۵	۸	۲۲	۴۰	۴۴۳۰	۶۹۷	۲۵	۴
	۵۰	۹	۴۰	۸۰	۱۳۰۰۰	۸۲۸	۳۹	۵
	۷۵	۱۰	۶۱	۱۳۰	۱۶۰۸۷	۱۳۶۱	۷۷	۶

همانطور که در جدول (۴-۶) ملاحظه می‌شود عامل‌های موجود در بانک داده دارای دامنه تغییرات نسبتاً خوبی می‌باشند. به عنوان مثال دامنه تغییرات مقاومت فشاری تک محوری از ۱۵ تا ۲۰۰ مگاپاسکال می‌باشد که این بدان معنی است، بانک داده از سنگ‌های ضعیف تا سنگ‌های مقاوم را پوشش می‌دهد. همچنین دامنه تغییرات

فاصله‌داری درزه از ۵ تا ۳۰۰ سانتی‌متر است که نشان دهنده این است در بانک داده از توده‌سنگ با درزه‌داری کم تا توده‌سنگ خرد شده وجود دارد.

۴-۹- جمع بندی

یکی از مسائل مهم در تحقیقاتی که بر مبنای داده‌های میدانی انجام می‌شوند، تشکیل بانک داده دقیق و کامل می‌باشد. در این تحقیق برای بررسی موضوع، بانک داده‌ای از عامل‌های سنگ بکر، توده‌سنگ و عملیاتی ماشین حفار تشکیل شده است. این عامل‌ها از پروژه‌های تونل‌های انتقال آب کرمان و زاگرس در ایران، تونل انتقال آب کویینز در نیویورک و تونل ماروشی-واکولا در هند جمع‌آوری شده است. در این بانک، داده‌های ۳۳۵ مقطع تونل که در ساختارهای زمین‌شناسی گوناگون با ماشین‌های حفاری با مشخصات مختلف وجود دارد. تحلیل آماری داده‌های ژئومکانیکی نشان می‌دهد که در این بانک داده از توده سنگ‌های خصوصیات مختلف (درزه‌داری کم تا درزه‌داری زیاد، مقاومت کم تا مقاومت زیاد) هست.

فصل پنجم

تأثیر مشخصات هندسی درزه در نرخ نفوذ و حفرپذیری

۵-۱- مقدمه

یکی از مسائل مهم در حفاری با ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل با توجه به هزینه‌های بالای تأمین آنها، پیش‌بینی نرخ نفوذ برای برنامه‌ریزی اجرای یک پروژه می‌باشد. با توجه به اینکه نرخ نفوذ با حفارپذیری توده‌سنگ در ارتباط می‌باشد لذا با بررسی تأثیر عامل‌های مختلف در نرخ نفوذ می‌توان به تأثیر آن عامل‌ها در حفارپذیری نیز پی‌برد. مهمترین عامل‌های توده‌سنگ، مشخصات هندسی درزه‌ها شامل زاویه، فاصله‌داری، بازشدگی و تداوم‌درز می‌باشد. در این تحقیق در دو سطح به موضوع حفارپذیری توده‌سنگ درزه‌دار پرداخته می‌شود. در سطح اول به تأثیر مشخصات هندسی درزه‌ها در نرخ نفوذ پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه در بانک داده برای تونل انتقال آب کرمان چهار مشخصه هندسی درزه (زاویه صفحه درزه، فاصله‌داری، بازشدگی و تداوم‌درزه) در دسترس می‌باشد لذا در این سطح، موضوع در پروژه تونل انتقال آب کرمان مورد بررسی قرار گرفته است. در سطح دوم به بررسی تأثیر دو مشخصه هندسی درزه‌ها یعنی زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری (که بیشتر در دسترس می‌باشند) بر حفارپذیری پرداخته شده است. این دو مشخصه برای تمام پروژه‌های تشکیل دهنده بانک داده وجود دارد.

۵-۲- بررسی ارتباط مشخصات هندسی درزه با نرخ نفوذ در تونل انتقال آب کرمان

برای بررسی تأثیر مشخصات مهندسی درزه شامل زاویه صفحه درزه، فاصله‌داری، بازشدگی و تداوم درزه در نرخ نفوذ از داده‌های ثبت شده توسط سیستم ثبت داده در پروژه تونل انتقال آب کرمان استفاده شده است.

۵-۲-۱- انتخاب مقاطع مورد بررسی

برای افزایش دقت در بررسی موضوع، یک نوع سنگ از مسیر تونل که عامل‌های ژئومکانیکی آن در دو مقطع مختلف تونل، اپراتور حفار و وضعیت دیسک‌ها یکسان و همچنین اختلاف روباره کمتر از ۲۵ متر و فقط عامل‌های شیب، فاصله‌داری، بازشدگی و تداوم درزه‌ها تغییر کرده، انتخاب شده است. همچنین در مقاطع انتخابی دامنه تغییرات نیروی پیشران و گشتاور تا حدودی یکسان می‌باشد. مقاطع انتخاب شده در جدول (۵-۱) آورده شده است.

جدول ۵- ۱: مشخصات مقاطع انتخابی از مسیر تونل انتقال آب کرمان

ردیف	موقعیت در تونل (متر)	شماره گام حفاری	نوع چینه‌شناسی	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
۱	۳۶۶۳۴	۶۴۰	RT3 (آندزیت-بازالت)	۱۸۰	۲۰
۲	۳۶۶۳۲	۸۸۱		۱۱۰	۱۷
۳	۳۵۲۴۰	۱۷۵۳		۱۶۰	۱۷
۴	۳۴۷۶۰	۱۹۷۹		۱۲۰	۱۹
۵	۳۵۳۶۴	۱۶۱۷	RT1 (آندزیت)	۱۶۰	۱۵
۶	۳۵۵۵۰	۱۴۷۴		۱۰۰	۱۱

۵-۲-۱-۲-آندزیت - بازالت

در محدوده مورد مطالعه از طول ۳۶۶۳۴ تا ۳۶۶۳۲ متر نوع سنگ آندزیت-بازالت که بصورت بلوکی تا توده‌ای می‌باشد. با توجه به اینکه عرض هر گام حفاری ۱/۳ متر است لذا در این محدوده‌ها با لحاظ کردن شرایط مدنظر، گام‌های شماره ۶۴۰ و ۸۸۱ انتخاب شده‌اند. در سیستم ثبت داده ماشین حفار به ازاء هر ۱۰ ثانیه حفاری، عامل‌های نرخ نفوذ، نیروی پیشران و گشتاور ثبت شده است. در جدول (۵-۲) مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط نرخ نفوذ، نیروی پیشران و گشتاور برای هر دو گام حفاری آورده شده است.

جدول ۵- ۲: مقادیر عامل‌های نرخ نفوذ، نیروی پیشران و گشتاور در تونل انتقال آب کرمان

شماره گام حفاری	نرخ نفوذ (میلی متر بر دور)			نیروی پیشران (کیلونیوتن)			گشتاور (کیلونیوتن متر)		
	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط
۶۴۰	۹/۵	۳/۶	۷/۰۹	۴۴۶۱	۳۲۱۷	۳۹۷۵/۷	۱۰۷۶/۲۱	۳۶۲/۱۹	۷۵۰/۸۵۱
۸۸۱	۱۲/۴	۷	۹	۴۲۹۷	۳۴۳۸	۳۹۰۱/۳۲	۱۰۶۹/۳۱	۴۶۹/۱۲	۷۵۳/۰۳۵

در ادامه علاوه بر دو گام فوق، گام‌های شماره ۱۷۵۳ و ۱۹۷۹ نیز برای بررسی موضوع با لحاظ کردن شرایط پیش گفته انتخاب شده‌اند. در جدول (۳-۵) مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط عامل‌های عملیاتی ماشین برای هر دو گام آورده شده است.

جدول ۵-۳: مقادیر عامل‌های نرخ نفوذ، نیروی پیشران و گشتاور در تونل انتقال آب کرمان

شماره گام حفاری	نرخ نفوذ (میلی متر بر دور)			نیروی پیشران (کیلونیوتن)			گشتاور (کیلونیوتن متر)		
	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط
۱۷۵۳	۹/۹	۵/۶	۷/۷۸	۵۵۷۲	۴۴۹۳	۵۰۷۰/۱۰۲	۹۴۱/۶۹	۳۳۱/۱۴	۹۲۳/۲۳۷
۱۹۷۹	۱۳/۸	۷/۷	۹/۵۳	۵۴۰۹	۴۱۷۹	۴۷۶۹/۲۲۵	۱۰۰۳/۸	۴۶۶/۶۷	۶۵۸/۹۴۱

۵-۲-۲-۲-۵- آندزیت

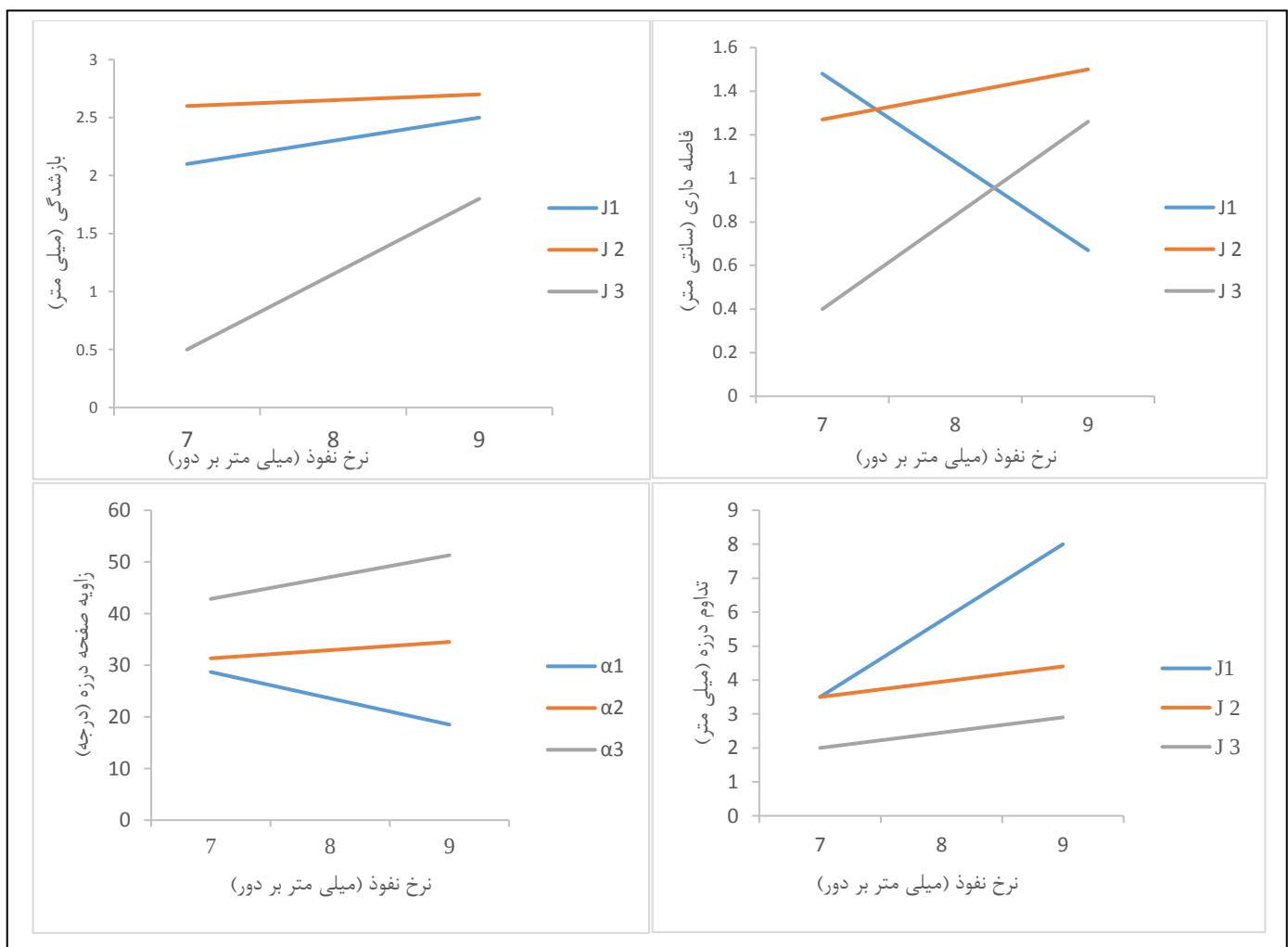
در محدوده مورد بررسی از طول ۱۸۴۸/۷۶ تا ۲۱۰۹/۹۶ متر نوع سنگ آندزیت و بصورت بلوکی تا توده‌ای و در گروه سنگی RT1 قرار دارد. در جدول (۴-۵) مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط نرخ نفوذ، نیروی پیشران و گشتاور در هر گام حفاری آورده شده است.

جدول ۵-۴: عامل‌های نرخ نفوذ، نیروی پیشران و گشتاور در تونل انتقال آب کرمان

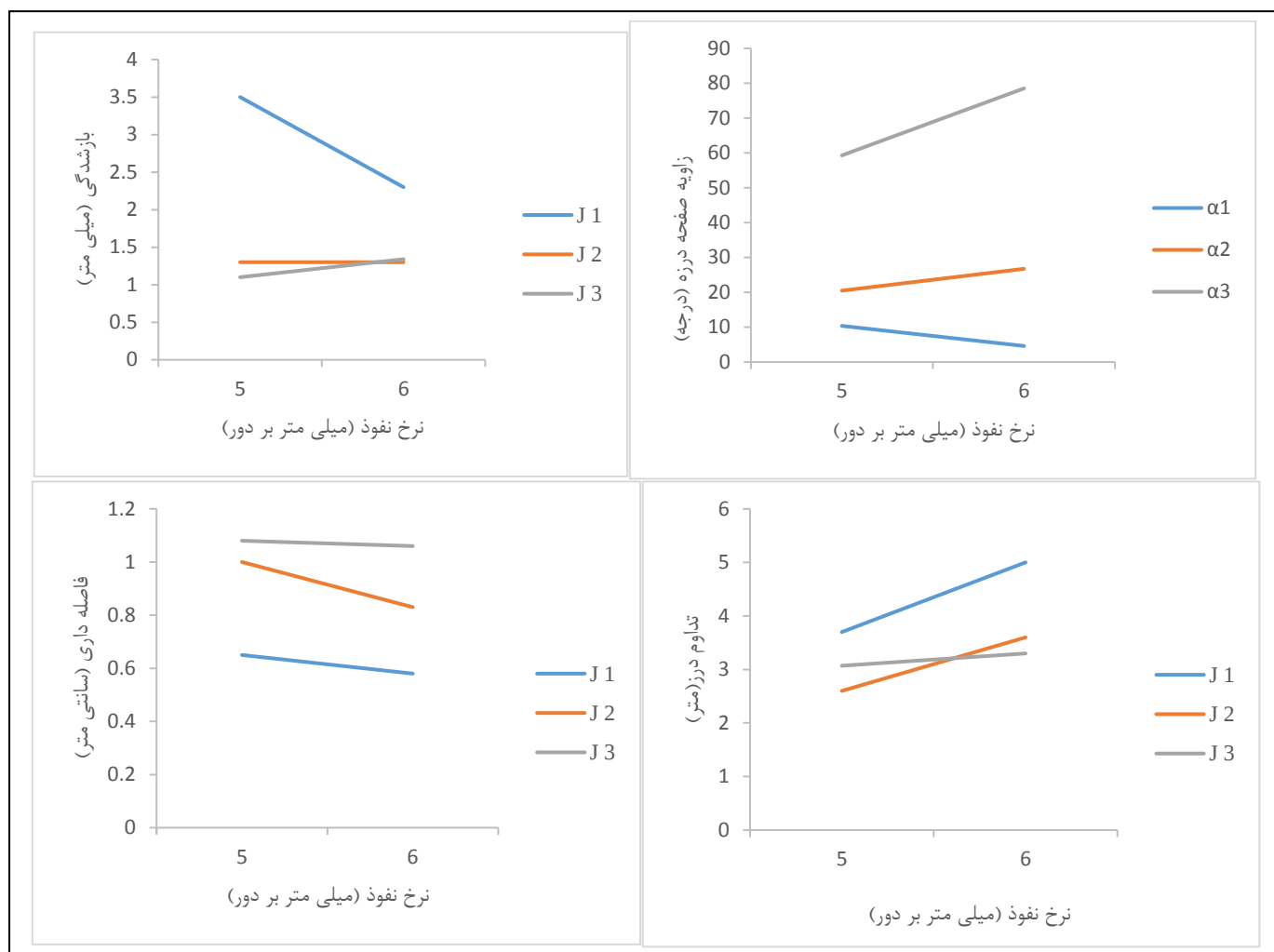
شماره گام حفاری	نرخ نفوذ (میلی متر بر دور)			نیروی پیشران (کیلونیوتن)			گشتاور (کیلونیوتن متر)		
	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط
۱۴۷۴	۹/۱	۵/۱	۶/۴۹	۵۲۲۵	۴۱۹۸	۴۷۶۰/۶۹	۷۲۴/۳۷	۳۶۹/۰۹	۵۳۶/۵۷
۱۶۱۷	۷/۵	۴/۵	۵/۸۴	۵۲۷۷	۴۱۷۸	۴۸۰۰/۵۶	۷۳۱/۲۷	۲۵۸/۷	۴۸۸/۵۹

۵-۲-۳- ارتباط خصوصیات هندسی درزه با نرخ نفوذ

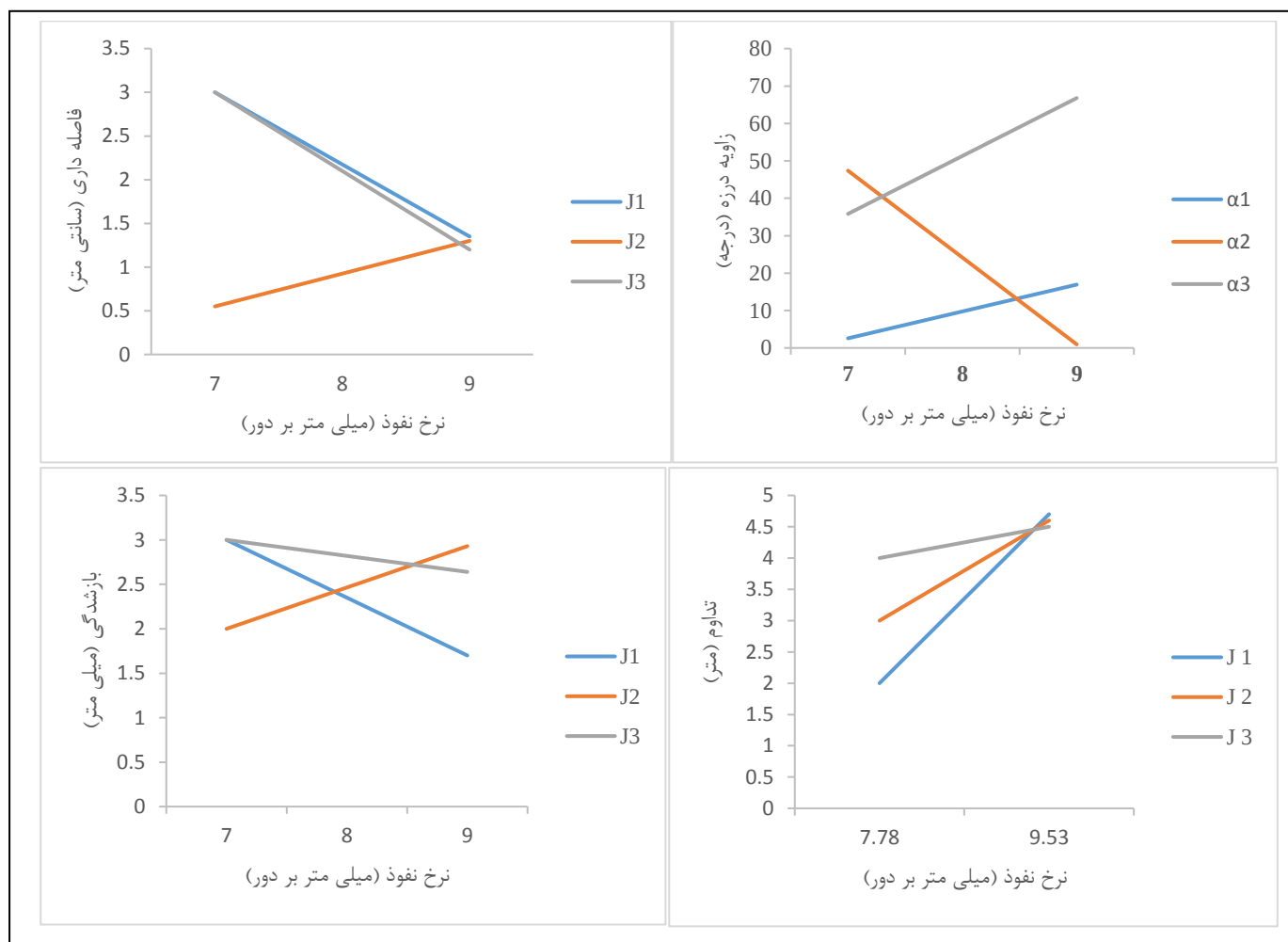
به منظور بررسی ارتباط هر یک از خصوصیات هندسی درزه با نرخ نفوذ، تغییرات مقدار زاویه صفحه درزه، بازشدگی، فاصله‌داری و تداوم درزه در هر دو گام با تغییرات نرخ نفوذ مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه تغییرات خصوصیات هندسی درزه با نرخ نفوذ برای هر دو گام با شرایط یکسان در شکل‌های (۵-۱)، (۵-۲) و (۵-۳) رسم شده است.



شکل ۵-۱: تغییرات مشخصات هندسی درزه‌ها با نرخ نفوذ برای گام‌های شماره ۶۴۰ و ۸۸۱ تونل انتقال آب کرمان



شکل ۵-۲: تغییرات مشخصات هندسی درزه‌ها با نرخ نفوذ برای گام‌های شماره ۱۴۷۴ و ۱۶۱۷ تونل انتقال آب کرمان



شکل ۵-۳: تغییرات مشخصات هندسی درزه‌ها با نرخ نفوذ برای گام‌های شماره ۱۷۵۳ و ۱۹۷۹ تونل انتقال آب کرمان

در مقایسه نمودارهای تغییرات هر یک از خصوصیات هندسی درزه‌ها با نرخ نفوذ موارد ذیل ملاحظه می‌شود:

- ۱- زاویه صفحه درزه: در بعضی موارد با افزایش زاویه صفحه درزه با محور تونل، نرخ نفوذ افزایش یافته و در بعضی موارد نیز با کاهش این زاویه، همچنان نرخ نفوذ افزایش می‌یابد لذا نمی‌توان ارتباط مشخصی بین زاویه صفحه درزه و نرخ نفوذ مشخص کرد. همچنین با توجه به متفاوت بودن دامنه تغییرات زاویه‌ها نمی‌توان دامنه‌هایی از زاویه مشخص کرد که در محدوده این دامنه‌ها، تغییرات زاویه با نرخ نفوذ ارتباط مشخصی داشته باشد.

۲- فاصله‌داری درزه: در گام‌های ۱۴۷۴ و ۱۶۱۷ مشاهده می‌شود که در هر سه دسته درزه با افزایش فاصله‌داری نرخ نفوذ کاهش می‌یابد. در گام‌های ۶۴۰ و ۸۸۱ و همچنین ۱۷۵۳ و ۱۹۷۹ در دو دسته درزه با افزایش فاصله‌داری نرخ نفوذ کاهش و در یک دسته درزه با افزایش فاصله‌داری، نرخ نفوذ افزایش یافته است. در پیشینه تحقیقات انجام شده، مشاهده می‌کنیم که با افزایش فاصله‌داری، نرخ نفوذ کاهش یافته اما در این بررسی، در یک دسته درزه نتیجه مخالف این موضوع می‌باشد. در تحلیل بیشتر در دو دسته درزه‌ای که نتیجه متفاوت شده است، تغییر زاویه درزه نسبت به سایر دسته درزه‌ها بیشتر می‌باشد. این بدان معنی است که لزوم بررسی فاصله‌داری همراه با لحاظ کردن اثر زاویه صفحه‌درزه در نرخ نفوذ وجود دارد.

۳- بازشدگی درزه: مشاهده می‌شود که در گام‌های ۶۴۰ و ۸۸۱ با افزایش بازشدگی نرخ نفوذ نیز افزایش می‌یابد اما در گام‌های ۱۷۵۳ و ۱۹۸۹ با کاهش بازشدگی، نرخ نفوذ افزایش یافته است. با بررسی تغییرات بازشدگی با نرخ نفوذ نمی‌توان ارتباط مشخصی بین میزان بازشدگی و نرخ نفوذ مشخص کرد.

۴- تداوم درزه: نتایج حاصل از مقایسه تغییرات عامل تداوم درزه با نرخ نفوذ بیانگر این است که با افزایش تداوم نرخ نفوذ نیز افزایش می‌یابد. این مسئله بیانگر این است که هر چه طول درزه‌ها در روی سطح جبهه کار بیشتر باشد در نتیجه نقاط تماس دیسک‌های کله حفار با درزه افزایش یافته که این موضوع موجب افزایش نرخ نفوذ ماشین می‌شود.

۵-۲-۴- تأثیر توأمان خصوصیات هندسی درزه بر نرخ نفوذ

به منظور بررسی تأثیر توأمان خصوصیات هندسی درزه بر نرخ نفوذ در ابتدا با استفاده از سیستم رده‌بندی نیروژی تأثیر زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری توأم با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. در سیستم رده‌بندی نیروژی، عامل‌های رده ناپیوستگی‌ها و ضریب خردشدگی کل^۱ (K_{s_total}) دو عامل مهم برای رده‌بندی توده‌سنگ

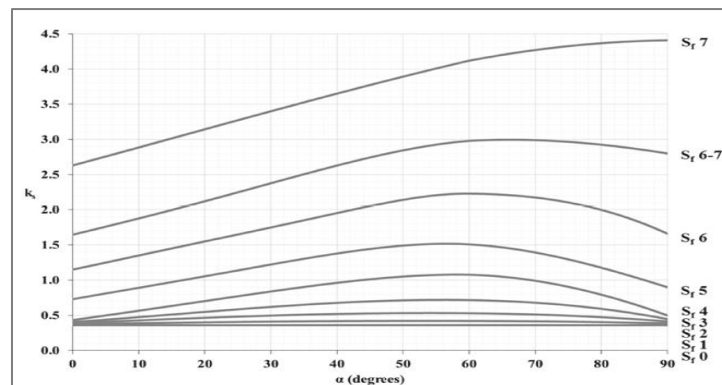
¹ Total fracturing factor

به منظور تخمین ویژگی‌های حفرپذیری توده سنگ می‌باشد. این رده‌بندی اولین بار توسط بلیندهایم^۱ در سال ۱۹۷۹ در دانشگاه تکنولوژی نروژ ارائه و سپس توسط برولند در سال ۱۹۹۸ و در سال ۲۰۱۶ توسط مک‌کاس تکمیل و توسعه یافت. در این رده‌بندی درجه خردشدگی و درزه‌داری توده سنگ بر اساس فاصله‌داری درزه‌ها (جدول ۵-۵) مشخص می‌شود.

جدول ۵-۵: رده‌بندی میزان خردشدگی و درزه‌داری توده سنگ بر اساس فاصله‌داری درزه‌ها (مک‌کاس، ۲۰۱۶)

رده درزه (SF)	فاصله داری درزه (سانتی متر)	دامنه رده (سانتی متر)	میزان خردایش
۰	بینهایت	۴۸۰-∞	بدون خردایش
۱	۳۲۰	۲۴۰-۴۸۰	خیلی کم
۲	۱۶۰	۱۲۰-۲۴۰	کم
۳	۸۰	۶۰-۱۲۰	ضعیف
۴	۴۰	۳۰-۶۰	متوسط
۵	۲۰	۱۵-۳۰	زیاد
۶	۱۰	۷/۵-۱۵	خیلی زیاد
۷	۵	۴-۷/۵	فوق العاده زیاد

پس از مشخص شدن رده شکستگی، با استفاده از زاویه صفحه درزه و رده درزه مطابق شکل (۴-۵)، ضریب خردشدگی (K_s) برای هر درزه به دست آمده است.



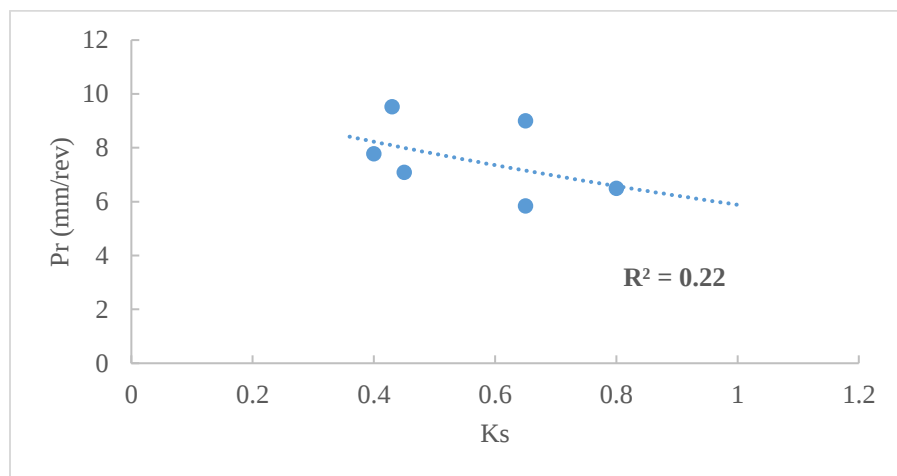
شکل ۴-۵: نمودارهای تعیین K_s (مک‌کاس، ۲۰۱۶)

¹ Blindham

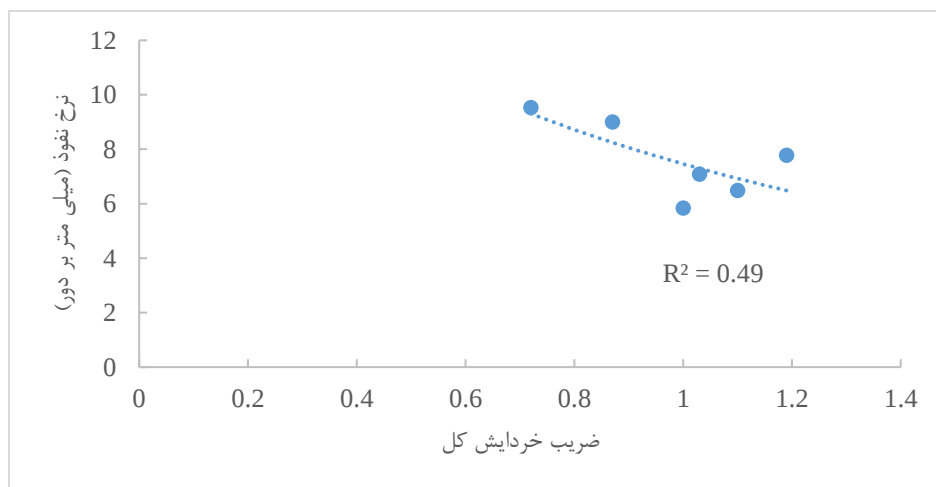
در نهایت مطابق رابطه (۱-۵) ضریب خردشدگی کل به دست آمده است.

$$K_{s-total} = \sum_{i=1}^n K_{si} - (n-1)0.36 \quad (۱-۵)$$

در ادامه برای بررسی موضوع، نمودار تغییرات ضریب K_s و ضریب خردایش کل با نرخ نفوذ رسم شده است (شکل- های (۵-۵) و (۵-۶)).



شکل ۵-۵: نمودار تغییرات ضریب K_s با نرخ نفوذ در تونل انتقال آب کرمان



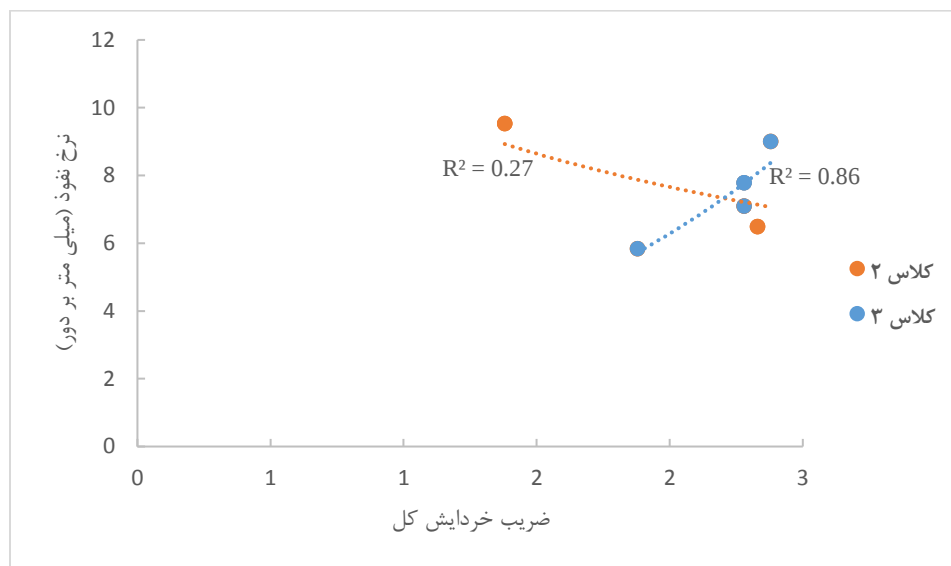
شکل ۵-۶: نمودار تغییرات ضریب خردایش کل با نرخ نفوذ در تونل انتقال آب کرمان

ضریب خردشدگی که تلفیقی از دو عامل زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری می‌باشد با نرخ نفوذ رابطه معکوس دارد. در مرحله بعد برای لحاظ کردن تأثیر تداوم درزه علاوه بر زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری از رده‌بندی ارائه شده توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای تداوم درزه استفاده شده است (جدول (۵-۶)).

جدول ۵-۶: رده‌بندی تداوم درز (بینیاوسکی^۱، ۱۹۸۴)

رده	تداوم درزه (متر)
۱	کمتر از یک متر
۲	بین ۱ تا ۳ متر
۳	بیشتر از ۳ متر

بر اساس جدول فوق نمودار تغییرات نرخ نفوذ و ضریب خردایش کل رسم شده است (شکل (۵-۷)).



شکل ۵-۷: نمودار تغییرات ضریب خردایش کل با نرخ نفوذ بر اساس رده‌بندی تداوم درزه در تونل انتقال آب کرمان

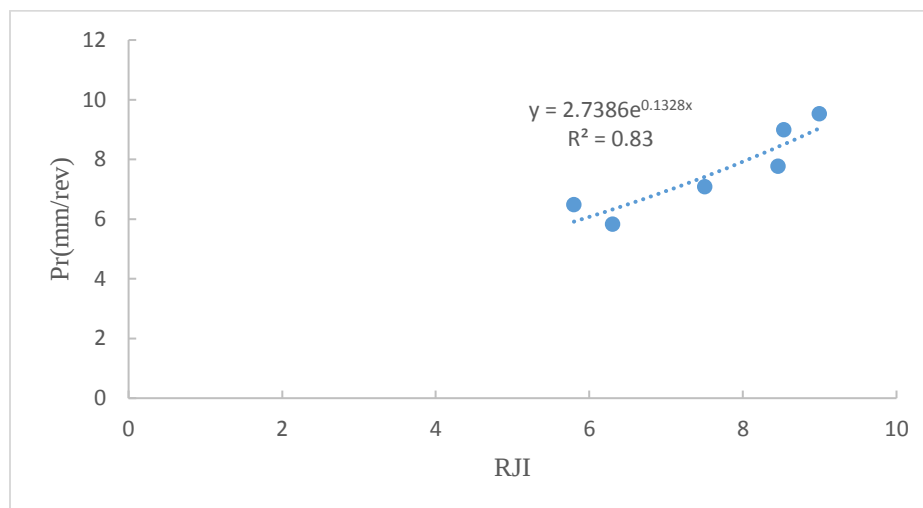
با لحاظ کردن تداوم درزه در شکل (۵-۷) ملاحظه می‌شود که با افزایش تداوم درزه، ضریب همبستگی رابطه بین تغییرات نرخ نفوذ با ضریب خردشدگی کل افزایش می‌یابد. در مدل‌هایی که تا کنون ارائه گردیده، به اثر تلفیقی

¹ Bieniawski

تداوم درزه و سایر عامل‌ها بر نرخ نفوذ پرداخته نشده است. در این تحقیق با تلفیق عامل‌های درزه و ارتباط آنها با نرخ نفوذ نسبت به تعریف شاخص درزه سنگ (Rock Joint Index) اقدام که رابطه (۵-۲) می‌باشد. این رابطه با استفاده از روش برازش آماری غیر خطی در نرم افزار SPSS به دست آمده است. ضریب همبستگی این رابطه ۰/۸۳ می‌باشد.

$$RJI = \left| 7.33(\alpha) - 8.17 \ln\left(\frac{30.93J_v + 43.75Per}{14.7sp}\right) \right| \quad (۵-۲)$$

در این رابطه RJI شاخص درزه سنگ، α زاویه صفحه درزه، J_v تعداد حجمی درزه، Per، تداوم درزه (متر) و Sp فاصله‌داری درزه (سانتی‌متر) می‌باشد. در شکل (۵-۸) نمودار مربوط به ارتباط RJI و نرخ نفوذ واقعی نشان داده شده است.



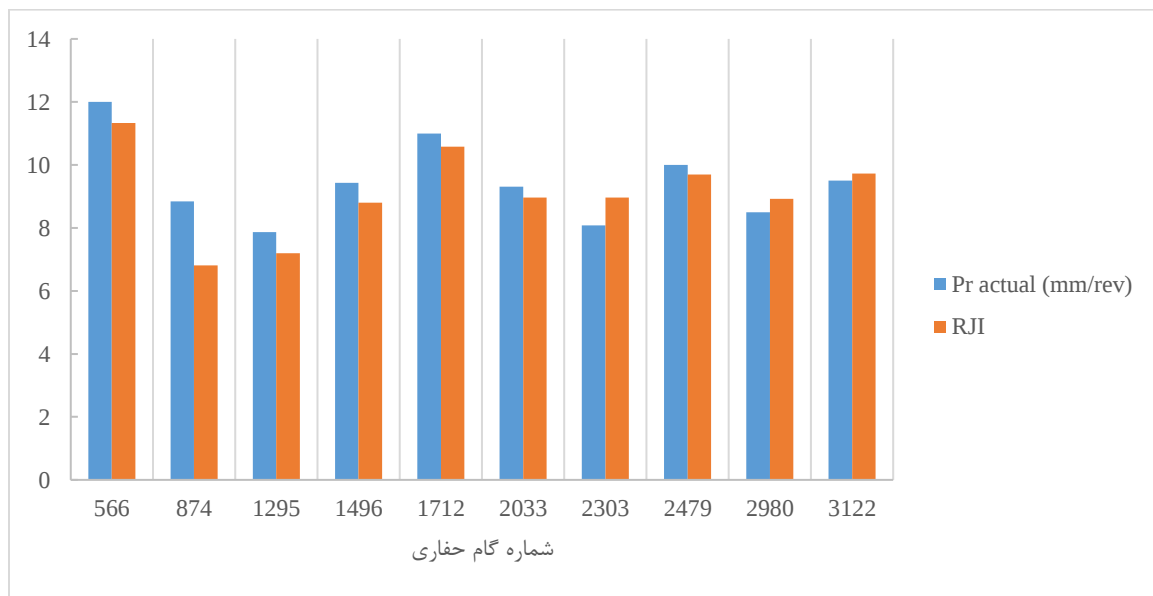
شکل ۵-۸: رابطه RJI با نرخ نفوذ واقعی در تونل انتقال آب کرمان

برای بررسی دقت رابطه RJI، در ۱۰ گام در طول‌های مختلف از تونل به مقایسه نتیجه حاصل از این رابطه با نرخ نفوذ واقعی پرداخته شده است. عامل‌های ژئومکانیکی و عملیاتی ماشین حفار در این مقاطع از تونل در جدول (۵-۶) آورده شده است.

جدول ۵- ۷: عامل های ژئومکانیکی مقاطع مختلف تونل انتقال آب کرمان

سلسله مراتبی	شماره گام حفاری	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	نرخ نفوذ (میلی متر بر دور)	نیروی پیشران (کیلو نیوتن)	نیروی گشتاور (کیلو نیوتن متر)	تداوم درزه (متر)	فاصله داری (سانتی متر)	زاویه صفحه درزه (درجه)
RT3 (آندزیت - بازالت)	۵۶۶	۱۰۵	۱۲	۳۵۰۰	۸۵۰	۴	۱۵۰	۸
	۸۷۴	۸۰	۸/۸۴	۴۲۰۰	۶۵۰	۳	۱۵۰	۳۰
	۱۲۹۵	۱۶۰	۷/۸۷	۴۴۰۰	۶۵۰	۴	۱۰۰	۲۷
	۱۷۱۲	۱۸۵	۱۱	۴۳۰۰	۷۵۰	۴	۳۰	۴۷
	۳۱۲۲	۱۸۰	۹/۵	۴۸۵۰	۸۶۰	۴	۸۰	۵۱
RT1 (آندزیت)	۱۴۹۶	۱۶۵	۹/۴۳	۵۸۰۰	۸۰۰	۳	۷۰	۲۷
	۲۰۳۳	۱۷۰	۹/۳۱	۴۲۵۰	۸۰۰	۱/۵	۳۰	۰/۹
	۲۳۰۳	۲۰۰	۸/۰۸	۴۵۰۰	۷۵۰	۴	۸۰	۰/۹
	۲۴۷۹	۱۷۵	۱۰	۳۹۰۰	۸۵۹	۳	۹۰	۲
	۲۹۸۰	۱۸۰	۸/۵	۴۴۵۰	۸۷۵	۴	۱۱۰	۰/۴

در شکل (۵-۹) مقایسه بین نرخ نفوذ واقعی و RJI در هر گام نشان داده شده است.

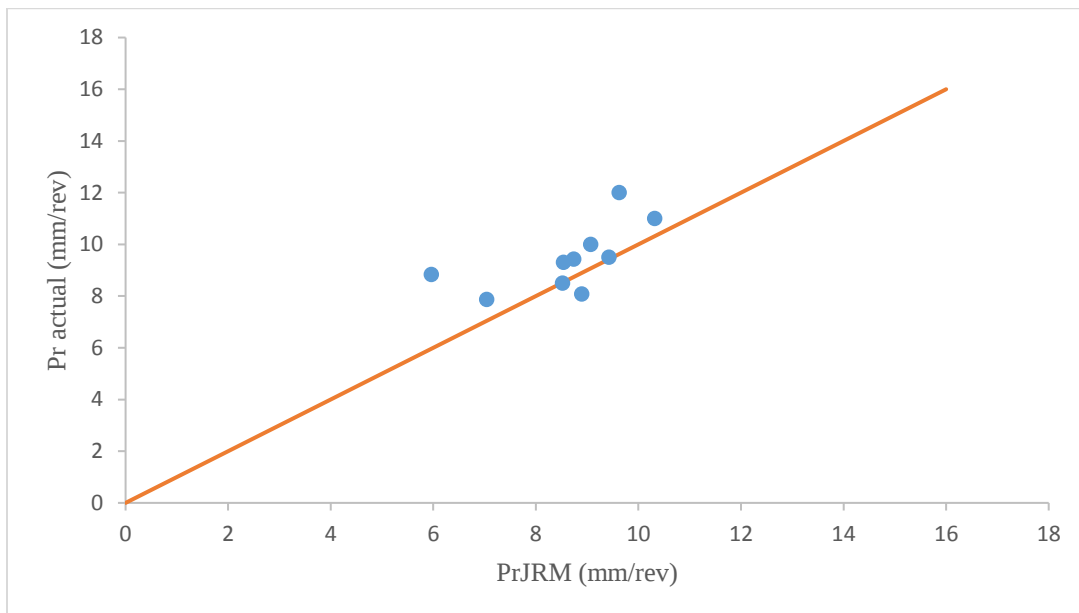


شکل ۵- ۹: مقایسه بین مقدار نرخ نفوذ واقعی و مقدار شاخص درزه سنگ در هر گام حفاری تونل انتقال آب کرمان

در ادامه برای به دست آوردن مدلی برای پیش بینی نرخ نفوذ در توده سنگ درزه دار، علاوه بر RJI تأثیر عامل مقاومت فشاری تک محوری و دو عامل نیروی پیشران و گشتاور لحاظ شده است.

$$Pr_{RJM} = 0.14RJI * Ln\left(\frac{Th}{To} * UCS\right) \quad (۵-۳)$$

در این رابطه Pr_{RJM} نرخ نفوذ توده سنگ درزه دار (میلی متر بر دور)، نیروی پیشران (Th) بر حسب کیلونیوتن، گشتاور (To) بر حسب کیلونیوتن متر و مقاومت فشاری تک محوری (UCS) بر حسب مگاپاسکال می باشد. ضریب همبستگی در این مدل ۰/۸۰ است. برای بررسی دقت مدل ارائه شده به منظور پیش بینی نرخ نفوذ در توده سنگ درزه دار، در ۱۰ گام در طول های مختلف از تونل جدول (۵-۸) به مقایسه نتیجه حاصل از این مدل با نرخ نفوذ واقعی پرداخته شده است. در شکل (۵-۱۰) مقایسه نرخ نفوذ حاصل از مدل جدید با نرخ نفوذ واقعی نشان داده شده است. در این شکل (۵-۱۰) ملاحظه می شود که پراکندگی نقاط در اطراف خط مطلوب، بسیار کم می باشد.



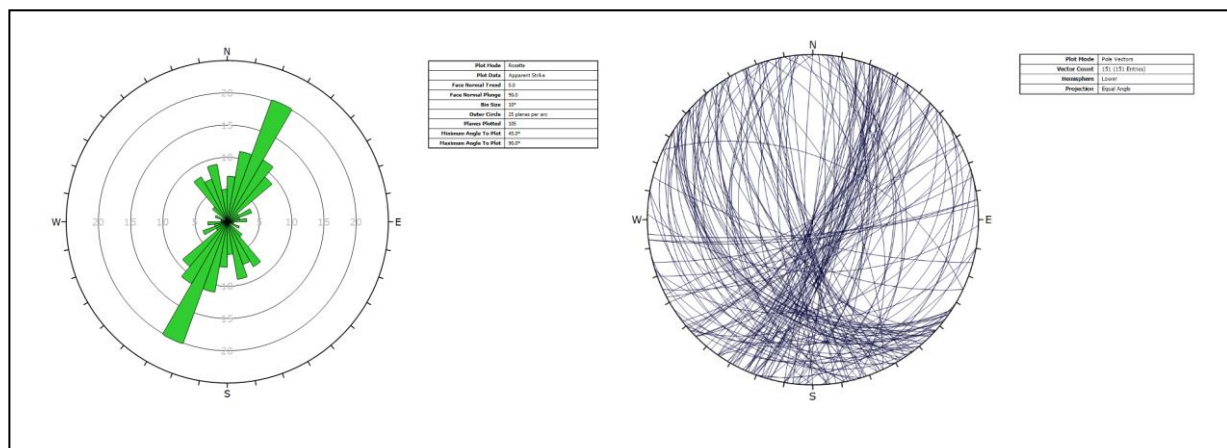
شکل ۵-۱۰: مقایسه نرخ نفوذ پیش بینی شده و نرخ نفوذ واقعی در تونل انتقال آب کرمان

۵-۳- بررسی تأثیر زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری بر حفرپذیری توده‌سنگ

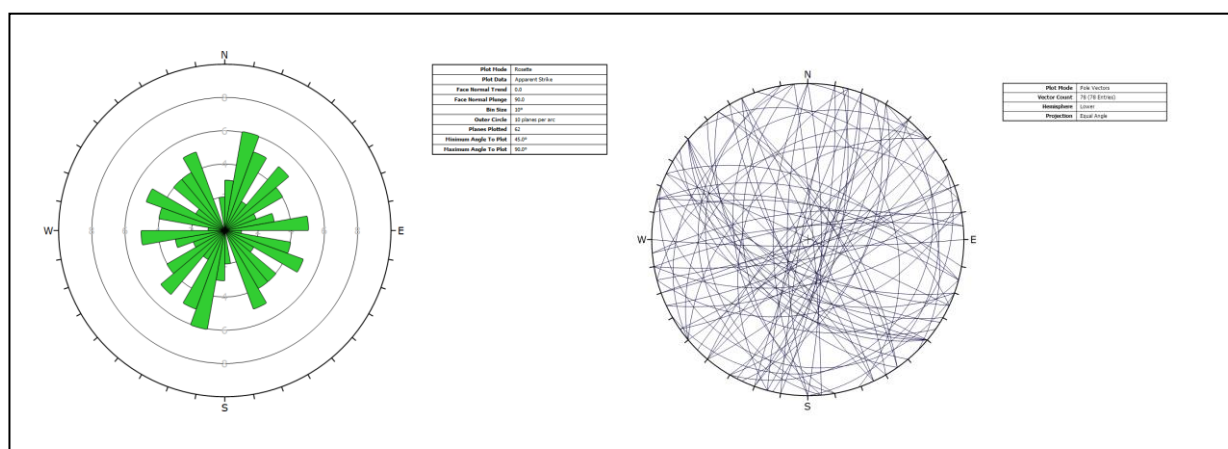
تحقیقات انجام شده بیانگر این است که در بین خصوصیات هندسی درزه‌ها، زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری بیشتر از سایر خصوصیات درزه در دسترس و به همین علت بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. تأثیر زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری بر حفرپذیری توده‌سنگ تا اکنون با استفاده از روش‌های عددی، آزمایشگاهی و مطالعات میدانی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه داده‌های موجود در بانک داده به بررسی ارتباط این دو مشخصه با نرخ نفوذ و همچنین شاخص حفرپذیری در هر پروژه پرداخته شده است.

۵-۳-۱- زاویه صفحه درزه

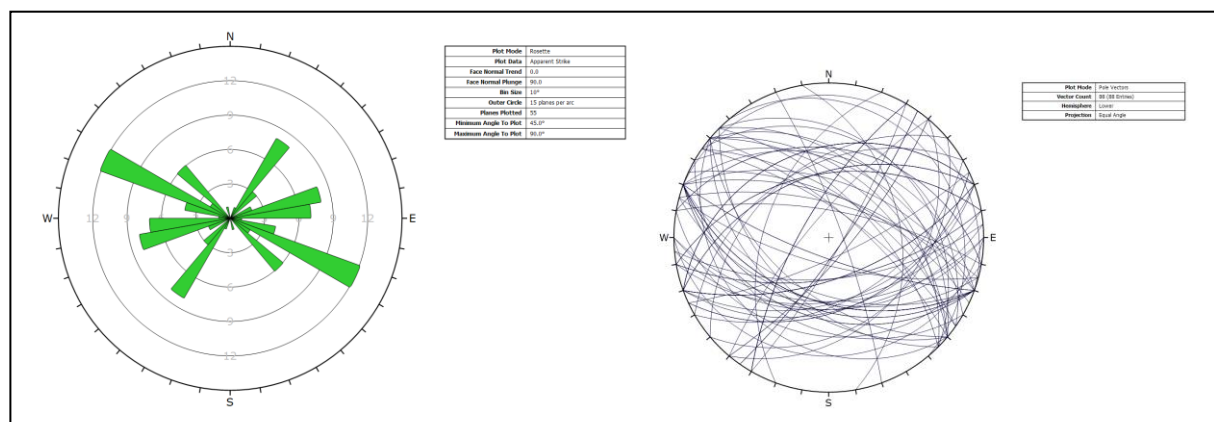
مطالعات محققین نشان می‌دهد که تأثیر شیب و امتداد درزه در نرخ نفوذ از سایر مشخصات درزه بیشتر می‌باشد. در شکل‌های (۵-۱۱) تا (۵-۱۳) نمودارهای استریوگرافیک و گل سرخی مربوط به شیب و امتداد دسته درزه برای هر پروژه نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۱: نمودار استریوگرافیک و گل سرخی درزه‌های تونل انتقال آب کویینز



شکل ۵-۱۲: نمودار استریوگرافیک و گل سرخی درزه‌های تونل انتقال آب کرمان

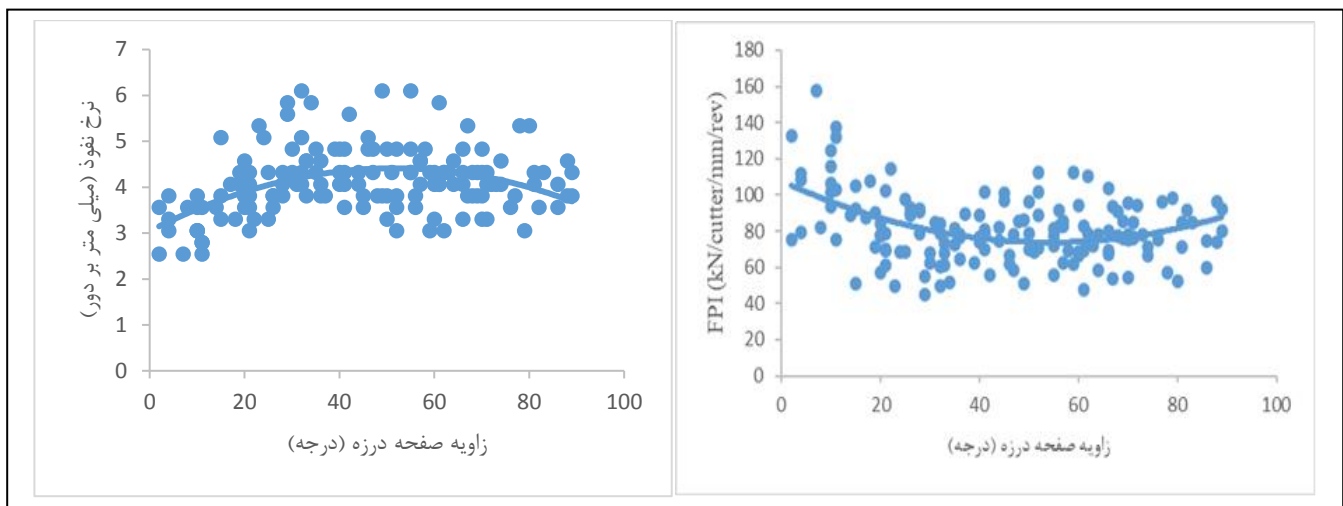


شکل ۵-۱۳: نمودار استریوگرافیک و گل سرخی درزه‌های تونل انتقال آب ماروشی-واکولا

برای بررسی تأثیر مشخصات درزه بر نرخ نفوذ و حفرپذیری زاویه بین صفحه درزه با محور تونل از رابطه (۴-۵) محاسبه شده است.

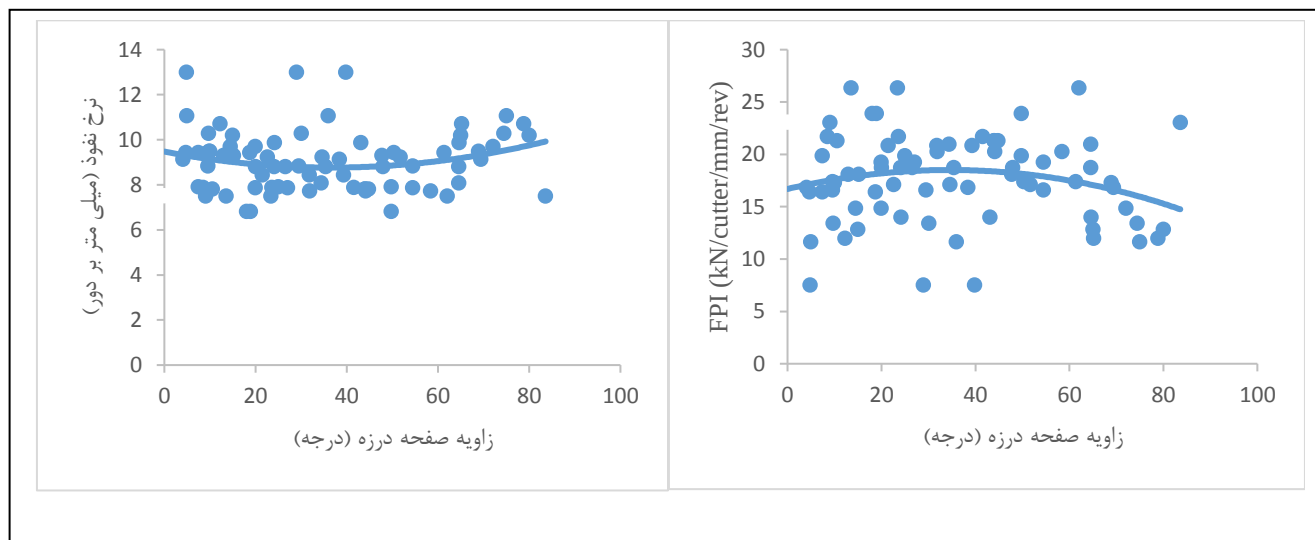
$$\alpha = |\arcsin(\sin \alpha_f * \sin(\alpha_t - \alpha_s))| \quad (۴-۵)$$

در رابطه (۴-۵) α زاویه صفحه درزه، α_f زاویه شیب درزه، α_t زاویه محور تونل و α_s زاویه امتداد درزه می‌باشد. در شکل‌های (۱۴-۵) تا (۱۶-۵) ارتباط بین تغییرات زاویه صفحه درزه با تغییرات نرخ نفوذ و شاخص حفرپذیری محاسبه شده، برای هر پروژه نشان داده شده است.

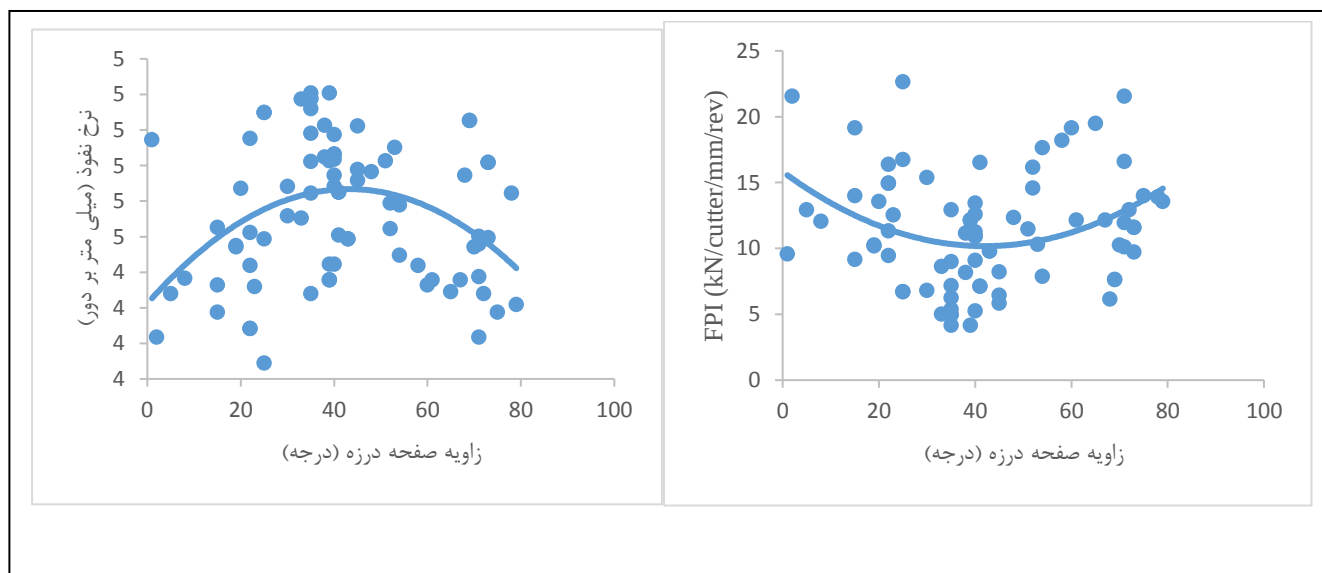


شکل ۵-۱۴: ارتباط بین زاویه صفحه درزه با شاخص حفرپذیری و نرخ نفوذ در پروژه کویینز

همانطور که در شکل (۵-۱۴) ملاحظه می‌شود در زاویه صفحه درزه بین ۴۵ تا ۶۰ درجه بیشترین نرخ نفوذ و کمترین شاخص حفرپذیری وجود دارد.



شکل ۵-۱۵: ارتباط بین زاویه صفحه درزه با شاخص حفرپذیری و نرخ نفوذ در پروژه کرمان

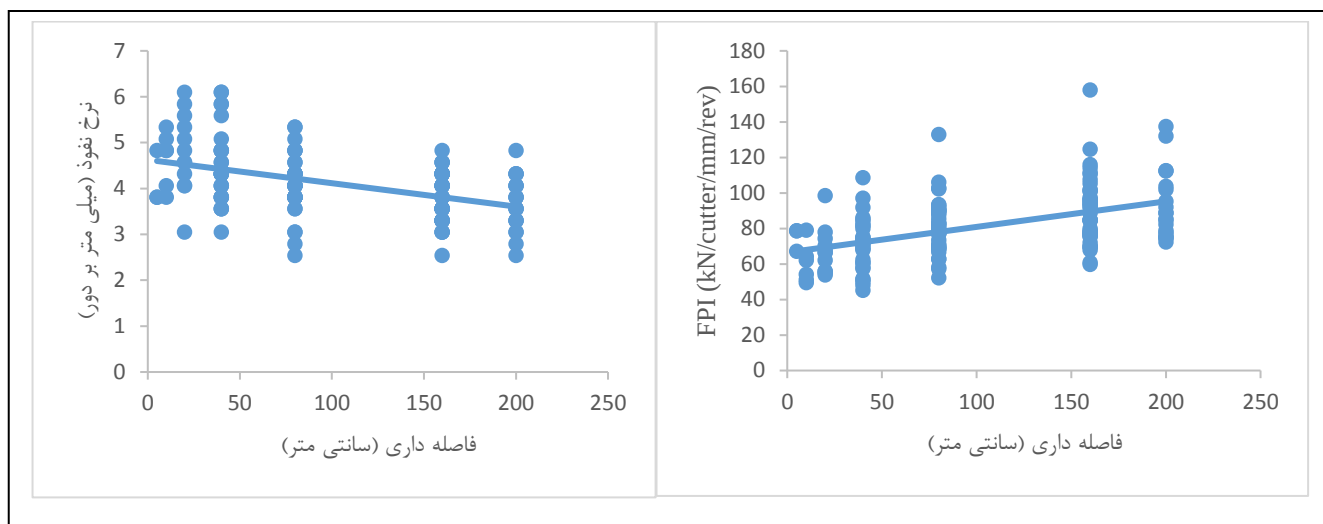


شکل ۵-۱۶: ارتباط بین زاویه صفحه درزه با شاخص حفرپذیری و نرخ نفوذ در پروژه ماروشی-واکولا

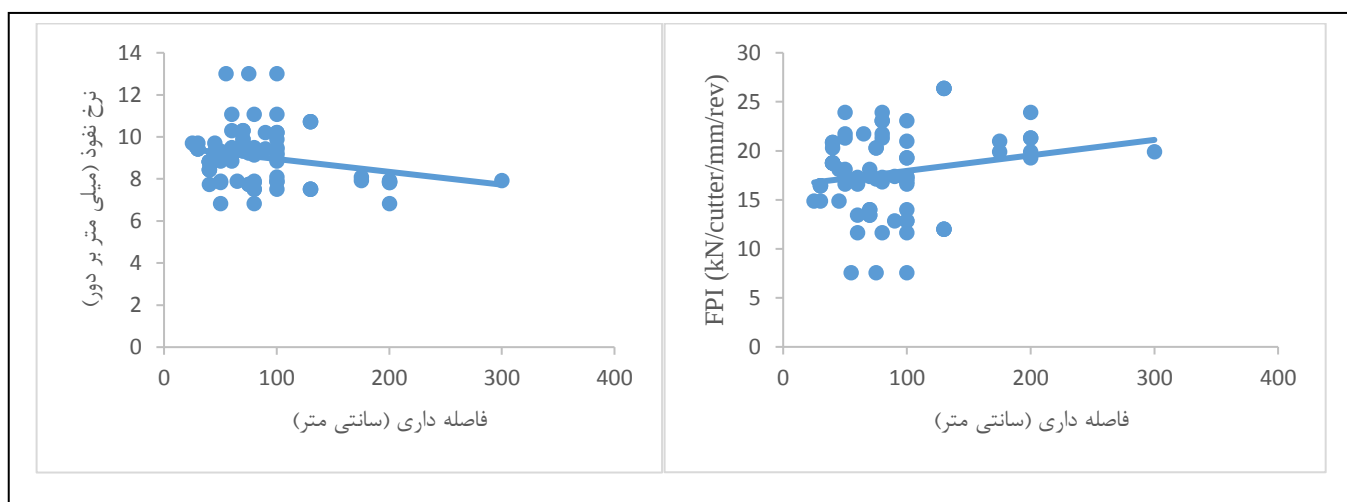
در شکل (۵-۱۵) مشاهده می‌شود که کمترین نرخ نفوذ در زاویه صفحه درزه بین ۴۰ تا ۵۰ درجه و بیشترین شاخص حفرپذیری در زاویه صفحه درزه بین ۳۵ تا ۴۵ درجه اتفاق می‌افتد. همچنین در شکل‌های (۵-۱۶) مشاهده می‌شود که در زاویه صفحه درزه بین ۴۵ تا ۳۵ درجه بیشترین نرخ نفوذ و کمترین شاخص حفرپذیری اتفاق می‌افتد. مقایسه کلی بیانگر این است که در زاویه‌های بین ۴۰ تا ۵۰ درجه، نرخ نفوذ دارای افزایش و کاهش می‌باشد لذا نمی‌توان به طور کلی در خصوص تأثیر زاویه صفحه درزه بر نرخ نفوذ صحبت کرد. قطعاً عوامل دیگری هم در نحوه تأثیر زاویه صفحه درزه بر نرخ نفوذ مؤثر می‌باشند. در بررسی ارتباط بین زاویه صفحه درزه با FPI نیز در پروژه‌های تونل انتقال آب کویینز و ماروشی-واکولا در زاویه‌های حداقل ۳۵ و حداکثر ۶۰ درجه، کمترین FPI (بر خلاف نرخ نفوذ) و در یک پروژه در زاویه‌های بین ۳۵ تا ۴۵ درجه، بیشترین FPI وجود دارد. در حالت کلی مشاهده می‌شود که در زاویه‌های بین ۳۵ تا ۴۵ درجه، بیشترین و کمترین FPI وجود دارد که این مسئله بیانگر تأثیر عوامل دیگری در ارتباط بین زاویه صفحه درزه و شاخص حفرپذیری می‌باشد.

۵-۳-۲- فاصله‌داری درزه

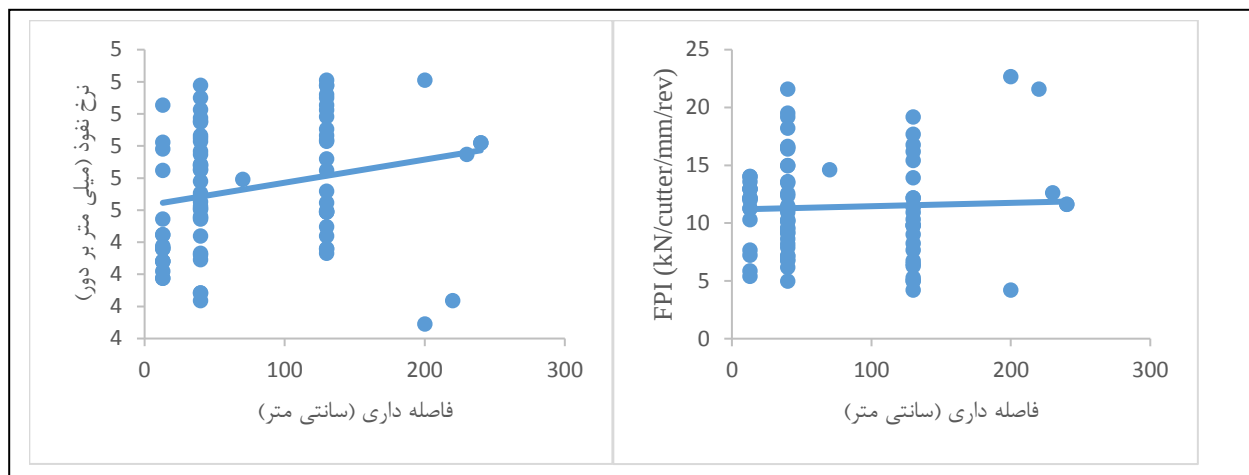
یکی دیگر از عامل‌های مؤثر در حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار، فاصله‌داری درزه‌ها می‌باشد. در ادامه به منظور بررسی تأثیر فاصله‌داری درزه بر حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار، نمودار ارتباط بین تغییرات فاصله‌داری درزه با تغییرات نرخ نفوذ و شاخص حفرپذیری اندازه‌گیری، برای هر پروژه رسم گردیده است (شکل‌های (۵-۱۷) تا (۵-۱۹)).



شکل ۵- ۱۷: ارتباط بین فاصله‌داری درزه با شاخص حفرپذیری و نرخ نفوذ در پروژه کویینز



شکل ۵- ۱۸: ارتباط بین فاصله‌داری درزه با شاخص حفرپذیری و نرخ نفوذ در پروژه کرمان



شکل ۵-۱۹: ارتباط بین فاصله‌داری درزه با شاخص حفرپذیری و نرخ نفوذ در پروژه ماروشی-واکولا

در خصوص ارتباط بین فاصله‌داری با نرخ نفوذ نیز در پروژه‌های تونل انتقال آب کوبینز و کرمان، با افزایش فاصله‌داری نرخ نفوذ کاهش می‌یابد و در پروژه تونل انتقال آب ماروشی-واکولا با افزایش فاصله‌داری، نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. همچنین در تأثیر فاصله‌داری بر FPI مشاهده می‌شود که در هر سه پروژه با افزایش فاصله‌داری، FPI نیز افزایش می‌یابد.

۵-۴- بررسی تأثیر توأمان ویژگی‌های درزه‌داری توده سنگ در حفرپذیری

به‌منظور بررسی تأثیر توأمان عامل‌های درزه بر نرخ نفوذ و شاخص حفرپذیری، مشابه با بخش ۵-۳ با استفاده از سیستم رده‌بندی نیروی تأثیر دو عامل زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری توأم با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۵-۸) رابطه بین نرخ نفوذ و شاخص حفرپذیری با ضریب خردشدگی کل به همراه ضریب همبستگی هر رابطه برای هر پروژه ذکر شده است.

جدول ۵-۸: رابطه بین نرخ نفوذ و شاخص حفرپذیری با ضریب خردشدگی کل

نام پروژه	رابطه	R^2
تونل کرمان	$Pr = 0.73LnK_{s-total} + 10.115$	۰/۲۹
	$FPI = 14.27(K_{s-total})^{0.14}$	۰/۴۶
تونل ماروشی - واکولا	$Pr = 4.49(K_{s-total})^{0.007}$	۰/۰۳۶
	$FPI = -1.98Ln(K_{s-total}) + 13.28$	۰/۱۴
تونل کوبینز	$Pr = -0.53LnK_{s-total} + 5.65$	۰/۸۹
	$FPI = 38.45(K_{s-total})^{0.26}$	۰/۹۱

در بررسی ارتباط بین ضریب خردشدگی کل با نرخ نفوذ و FPI مشاهده می‌شود که در هر سه پروژه، ضریب همبستگی بین FPI و ضریب خردشدگی کل بیشتر از ضریب همبستگی بین نرخ نفوذ و ضریب خردشدگی کل می‌باشد.

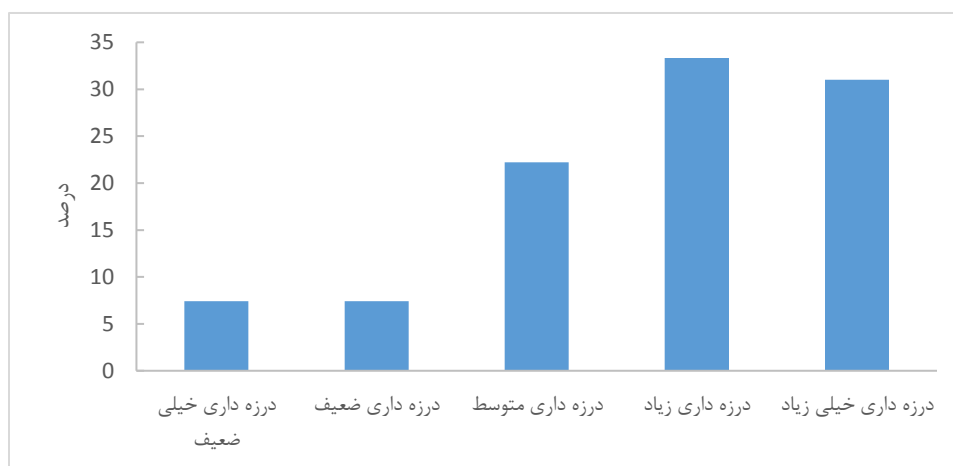
۵-۴-۱- تعداد درزه در متر مکعب

یکی از عوامل ارزیابی میزان درزه‌داری توده سنگ، تعداد درزه در متر مکعب (JV) می‌باشد. این عامل بر اساس فاصله‌داری درزه‌ها و تعداد درزه در متر مکعب سنگ محاسبه می‌شود (پالمستروم^۱، ۱۹۸۲). در این تحقیق برای بررسی دقیق‌تر تأثیر درزه‌داری بر حفرپذیری توده سنگ، ابتدا تعداد درزه در متر مکعب برای سنگ‌های مختلف در پروژه‌های مورد بررسی، محاسبه شده و سپس با استفاده از سیستم رده‌بندی ارائه شده توسط پالمستروم در سال ۱۹۸۲ برای میزان درزه‌داری سنگ (جدول ۵-۹)، بانک داده رده‌بندی شده است (شکل ۵-۲۰).

¹ Palmstrom

جدول ۵- ۹: سیستم رده‌بندی درزه‌داری سنگ بر اساس تعداد درزه در واحد حجم (پالمستروم، ۱۹۸۲)

میزان درزه‌داری	تعداد درزه در واحد حجم
فاقد درزه	$< 0/3$
درزه‌داری خیلی ضعیف	$0/3-1$
درزه‌داری ضعیف	$1-3$
درزه‌داری متوسط	$3-10$
درزه‌داری زیاد	$10-30$
درزه‌داری خیلی زیاد	$30-100$
درزه‌داری فوق العاده زیاد	> 100



شکل ۵- ۲۰: درصد وجود هر رده درزه‌داری در بانک داده

با توجه به ارتباط سیستم رده‌بندی تعداد درزه در واحد حجم با ضریب خردشدگی کل، ضریب خردشدگی کل رده‌بندی شده است (جدول ۵- ۱۰).

جدول ۵- ۱۰: رده‌بندی ضریب خردایش کل

رده‌بندی ضریب خردشدگی کل		رده‌بندی تعداد درزه در واحد حجم
میزان خردشدگی	دامنه ضریب خردشدگی کل	
متوسط	۰/۳-۲/۲	درزه‌داری متوسط
زیاد	۲/۲-۶	درزه‌داری زیاد
خیلی زیاد	>۶	درزه‌داری خیلی زیاد

بر اساس سیستم رده‌بندی تعداد درزه در واحد حجم و ضریب خردشدگی کل، در بانک داده رابطه بین این دو عامل با شاخص حفرپذیری مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس سه رده برای حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار تعرف که در جدول (۵-۱۱) قابل ملاحظه می‌باشد.

جدول ۵- ۱۱: رده‌بندی شاخص حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار بر اساس ضریب خردایش کل

میزان حفرپذیری توده-سنگ درزه‌دار	شاخص حفرپذیری (FPI)	ضریب خردشدگی کل (Kstotal)	تعداد درزه در واحد حجم (Jv)
حفرپذیری پایین	<۱۰	۰/۳-۲/۲	۰/۳ - ۱۰
حفرپذیری متوسط	۱۰-۲۰	۲/۲-۶	۱۰ - ۳۰
حفرپذیری بالا	>۲۰	>۶	۳۰ <

مشاهده می‌شود که تأثیر ضریب خردشدگی کل به عنوان عاملی که شامل تأثیر توأم زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری است، بر شاخص حفرپذیری بیش از نرخ نفوذ می‌باشد. بر این اساس می‌توان از رابطه (۵-۵) برای پیش‌بینی حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار استفاده کرد. ضریب همبستگی این مدل ۰/۷ می‌باشد.

$$FPI_{Jo\text{int}} = 0.115UCS \sqrt{K_{s-total}} \quad (5-5)$$

در این رابطه FPI براساس کیلونیوتن بر دیسک بر میلی‌متر بر دور و UCS (مقاومت فشاری تک محوری) بر اساس مگاپاسکال است. به منظور ارزیابی این مدل، در ۲۵ مقطع مختلف از تونل انتقال آب زاگرس (قطعه ۲) به مقایسه

حفرپذیری واقعی با حفرپذیری پیش‌بینی پرداخته شده است. مقایسه حفرپذیری واقعی با حفرپذیری پیش‌بینی در شکل (۵-۲۱) نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۱: مقایسه کلی حفرپذیری واقعی با حفرپذیری پیش‌بینی شده در تونل انتقال آب زاگرس (قطعه ۲)

همانطور که در شکل (۵-۲۱) ملاحظه می‌شود پراکندگی نقاط اطراف خط مطلوب خیلی زیاد نمی‌باشد و می‌توان بیان کرد که رابطه ارائه شده برای پیش‌بینی حفرپذیری، یک رابطه نسبتاً مطلوب می‌باشد.

۵-۵- بررسی آماری تأثیر عامل‌های درزه‌داری بر حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار

در این بخش از تحقیق به بررسی آماری تأثیر عامل‌های درزه‌داری بر حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از نرم افزار SPSS پرداخته شده است. در بررسی‌های آماری به منظور مشخص کردن ارتباط دو عامل و یا نحوه تأثیر چند عامل بر یک عامل از دو کلمه متغیر مستقل و متغیر وابسته استفاده می‌شود. عاملی را که می‌خواهیم پیش‌بینی کنیم متغیر وابسته می‌نامند. عامل‌هایی که برای پیش‌بینی متغیر وابسته استفاده می‌شود، متغیر مستقل می‌گویند. در این تحقیق شاخص حفرپذیری به عنوان عامل وابسته، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری به عنوان عامل‌های مستقل لحاظ شده است. یکی از تعاریف اساسی در علم آمار

تعریف همبستگی و رابطه بین دو متغیر می‌باشد. بطور کلی شدت وابستگی دو متغیر به یکدیگر را همبستگی تعریف می‌کنند. در تحلیل‌های آماری روش‌های مختلفی برای به دست آوردن ضریب همبستگی وجود دارد که هر کدام از روش‌ها، همبستگی بین دو متغیر را با توجه به نوع داده‌ها و شرایط متغیرها اندازه‌گیری می‌کنند. به طور کلی هر چه ضریب همبستگی به یک نزدیکتر بود میزان وابستگی دو متغیر بیشتر می‌باشد. در این تحقیق با توجه به نوع داده‌ها، پراکندگی و انحراف معیار، از ضریب همبستگی اسپرمن استفاده شده است. این ضریب همبستگی توسط چارلز اسپرمن^۱ دانشمند انگلیسی در سال ۱۹۰۴ معرفی شده است. ضریب همبستگی اسپرمن یکی از ضرایب پرکاربرد در تحلیل‌های آماری مسائل مهندسی می‌باشد. در جدول (۵-۱۲) میزان وابستگی بین FPI با هریک از عامل‌های توده سنگ و سنگ بکر آورده شده است. در این جدول عدد Sig نشان دهنده معناداری است که اگر کمتر از ۰/۰۰۵ باشد نشان دهنده معنی‌دار بودن رابطه بین دو عامل می‌باشد. همچنین اعداد مثبت نشان دهنده همبستگی مستقیم و اعداد منفی نشان دهنده همبستگی معکوس هستند.

¹ Charles Spearman

جدول ۵- ۱۲: ضریب همبستگی اسپرمن بین عامل‌ها

عامل	FPI (kN/cutter/ mm/rev)	فاصله‌داری (سانتی- متر)	زاویه صفحه درزه (درجه)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)
ضریب همبستگی اسپرمن	۰/۵۲۱	۰/۰۸۶	-۰/۰۶۵	۰/۶۹۳	۱
Sig.	۰/۰۰	۰/۱۳۱	۰/۲۵۰	۰/۰۰	
ضریب همبستگی اسپرمن	۰/۱۹۱	۰/۰۱۸	-۰/۰۹۳	۱/۰۰	۰/۶۹۳
Sig.	۰/۰۰۱	۰/۷۴۹	۰/۱۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰
ضریب همبستگی اسپرمن	۰/۰۵۱	۰/۰۲۹	۱/۰۰	-۰/۰۹۳	-۰/۰۶۵
Sig.	۰/۳۶۹	۰/۶۰۵	۰/۱۰۲	۰/۲۵۰	۰/۲۵۰
ضریب همبستگی اسپرمن	۰/۳۲۰	۱/۰۰	۰/۰۲۹	۰/۰۱۸	۰/۰۸۶
Sig.	۰/۰۰	۰/۶۰۵	۰/۷۴۹	۰/۱۳۱	۰/۱۳۱
ضریب همبستگی اسپرمن	۱/۰۰	۰/۳۲۰	۰/۰۵۱	۰/۱۹۱	۰/۵۲۱
Sig.		۰/۰۰	۰/۳۶۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰

همانطور که در جدول (۵-۱۲) ملاحظه می‌شود بیشترین وابستگی بین شاخص حفرپذیری با مقاومت فشاری تک محوری به عنوان عامل سنگ بکر و فاصله‌داری درزه به عنوان عامل‌های توده‌سنگ می‌باشد. ضریب همبستگی اندازه همبستگی بین دو متغیر را نشان می‌دهد اما این شاخص درباره ماهیت این همبستگی اطلاعات زیادی به ما نمی‌دهد. آنچه این شاخص مشخص می‌کند، وجود همبستگی بالا و یا پایین بودن نسبی آن است. به‌دست آوردن اطلاعات کامل‌تر درباره همبستگی، وقتی امکان‌پذیر است که شاخص دیگری به نام "ضریب تعیین" محاسبه شود. با محاسبه این ضریب می‌توان تعیین کرد که چند درصد از کل تغییر یک متغیر ناشی از تغییر متغیر دیگر است. برای محاسبه این ضریب از روش مرحله‌ای^۱ در رگرسیون چند متغیره استفاده می‌شود. در جدول (۵-۱۳) مؤثر

¹ Step wise

بودن هر یک از عامل‌های توده سنگ و سنگ بکر بر روی شاخص حفرپذیری بر اساس شرط ضریب معنی‌داری کمتر از ۰/۰۰۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- ۱۳: ضرائب مربوط به هر عامل در تحلیل آماری

ضرایب غیر استاندارد		ضریب استاندارد بتا	Sig.	رابطه	
B	Std. Error				
۰/۲۴۰	۴/۸۹۸		۰/۹۶۱	ضریب ثابت	۱
۰/۳۸۲	۰/۰۳۷	۰/۵۰۴	۰	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	
۱۶/۷۰۷	۴/۵۷۸		۰	ضریب ثابت	۲
۰/۷۹۸	۰/۰۵۳	۱/۰۵۳	۰	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	
-۷/۳۲۸	۰/۷۳۶	-۰/۶۹۴	۰	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	
۵/۱۳۹	۴/۶۶۱		۰/۲۷۱	ضریب ثابت	۳
۰/۷۷۳	۰/۰۵	۱/۰۲۰	۰	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	
-۷/۲۴۹	۰/۶۹۲	-۰/۶۸۷	۰	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	
۰/۱۵۲	۰/۰۲۴	۰/۲۶۱	۰	(cm) فاصله‌داری (سانتی‌متر)	

در این جدول ستون ضرایب غیر استاندارد^۱، B نشان دهنده ضرایب واقعی رگرسیون می‌باشد که با توجه به واحد اندازه‌گیری هر یک از متغیرها ایجاد شده است. بنابراین نمی‌توان براساس بزرگی هر یک از ضرایب اهمیت متغیر مربوطه در مدل رگرسیونی را تشخیص داد. به این منظور از ستون ضریب استاندارد بتا^۲ استفاده می‌کنیم. ستون بتا نشانگر میزان تاثیر متغیر مستقل بر متغیر وابسته است. کاربرد ضریب بتا هنگامی است که بیش از یک متغیر مستقل در تحلیل وجود داشته باشد. این ضریب این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان سهم نسبی هر متغیر مستقل را در پیش‌بینی متغیر وابسته با هم مقایسه کرد و در واقع بتوان تعیین کرد که کدام متغیرها بیشترین تاثیر را بر

¹ Unstandardize Coefficients

² Standardize Coefficients Beta

متغیر وابسته دارند. ستون Sig نشان دهنده سطح معنی‌داری آماری مدل و ضرایب حاصل شده برای متغیرهای مستقل است. هرچه میزان این عامل کمتر باشد، نشان می‌دهد که مدل پیش‌بینی حفرپذیری توده سنگ از دقت بالاتری برخوردار است. در جدول (۵-۱۳) ملاحظه می‌شود که مقاومت فشاری تک محوری به عنوان عامل سنگ بکر بیشترین تأثیر را در حفرپذیری دارد. همچنین از دو خصوصیات هندسی درزه، فاصله‌داری در حفرپذیری موثر می‌باشد. برای بررسی تأثیر توأمان دو مشخصه هندسی درزه مطابق بخش قبل از ضریب خردایش کل استفاده شده است. برای این هدف در عامل‌های ورودی نرم افزار SPSS، ضریب خردایش کل را جایگزین فاصله‌داری و زاویه صفحه درزه گردیده و سپس مجدداً تحلیل آماری انجام شده است. نتایج در جدول (۵-۱۴) آورده شده است.

جدول ۵-۱۴: ضرایب مربوط به تأثیر ضریب خردشدگی کل در شاخص حفرپذیری

ضریب غیراستاندارد		ضریب استاندارد بتا	Sig.	رابطه	
B	Std. Error				
-۰/۰۷۸	۲/۰۵۱		۰/۹۷۰	ضریب ثابت	۱
۴/۰۱۲	۰/۱۴۷	۰/۸۴۱	۰	ضریب خردایش کل	
-۷/۵۴۶	۳/۰۴۲		۰/۰۱۴	ضریب ثابت	۲
۳/۷۴۸	۰/۱۶۶	۰/۷۸۵	۰	ضریب خردایش کل	
۰/۰۸۶	۰/۰۲۶	۰/۱۱۴	۰/۰۰۱	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	
۰/۰۳۱	۳/۳۳		۰/۹۹۳	ضریب ثابت	۳
۳/۳۰۹	۰/۱۸۴	۰/۶۹۳	۰	ضریب خردایش کل	
۰/۲۷۶	۰/۰۴۷	۰/۳۶۵	۰	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	
-۲/۷۹۵	۰/۵۸۱	-۰/۲۶۳	۰	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	

همانطور که در جدول (۵-۱۴) ملاحظه می‌شود، ضریب خردایش کل تأثیر بیشتری نسبت به سایر عوامل در حفرپذیری دارد.

۵-۶- جمع بندی

در بررسی تأثیر هر یک از عامل‌های زاویه صفحه درزه، فاصله‌داری و تدام درزه بر نرخ نفوذ می‌توان نتیجه گرفت که تنها عامل تداوم درزه با نرخ نفوذ ارتباط مستقیم دارد. بطور کلی می‌توان بیان کرد دو عامل طول و تعداد درزه به تنهایی در حفریذیری توده‌سنگ‌های درزه‌دار نقش مهمی داشته و افزایش مقدار این دو عامل باعث افزایش حفریذیری می‌شود. در بررسی تأثیر عامل‌های زاویه و فاصله‌داری درزه در حفریذیری توده‌سنگ درزه‌دار در حفاری با ماشین حفاری مکانیزه تونل می‌توان به این نتیجه رسید که این عامل‌ها به تنهایی تأثیر متفاوتی را در حفریذیری دارند و رفتار یکسانی برای تغییر حفریذیری در برابر تغییر هر عامل نمی‌توان تعریف کرد. این موضوع لزوم بررسی تأثیر هم زمان زاویه و فاصله‌داری درزه را در حفریذیری توده‌سنگ درزه‌دار بیان می‌کند. تأثیر ضریب خردشدگی کل به عنوان عاملی که تأثیر هم زمان فاصله‌داری و زاویه درزه را پوشش می‌دهد بر شاخص حفریذیری بیشتر از نرخ نفوذ می‌باشد و با افزایش این ضریب، شاخص حفریذیری نیز افزایش می‌یابد. بر اساس دو عامل فاصله‌داری و زاویه درزه، شاخص حفریذیری نیز در سه رده، طبقه‌بندی می‌شود.

فصل ششم

ارتباط شاخص شکست با شاخص حفریذیری در توده سنگ درزه دار

۶-۱- مقدمه

با توجه به ارتباط حفرپذیری سنگ با مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی سنگ لذا انتظار وجود ارتباط مناسب بین شاخص شکست سنگ با حفرپذیری هست. در شاخص شکست سنگ تأثیر دو خصوصیت هندسی درزه (فاصله‌داری و زاویه درزه) وجود ندارد. برای استفاده از این شاخص در پیش‌بینی حفرپذیری توده‌سنگ لزوم بررسی ارتباط این شاخص با دو خصوصیت هندسی درزه وجود دارد. در این بخش در ابتدا برای بررسی موضوع در قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان، بر روی ۱۰ نمونه سنگ در مقاطع مختلف آزمایش نفوذ پانچ با کمک شرکت مکانیک سنگ نفت آسیا در آزمایشگاه شرکت گمانه کاو انجام شده است. سپس بر اساس داده‌های موجود در سیستم ثبت داده دستگاه آزمایش نفوذ پانچ و سیستم ثبت داده ماشین حفار به بررسی رابطه بین داده‌ها پرداخته شده است.

۶-۲- انجام آزمایش نفوذ پانچ

در این تحقیق برای انجام این آزمایش از سنگ‌های حاصل از خردایش جبهه کار توسط ماشین حفار در تونل انتقال آب کرمان استفاده شده است. بنابراین نمونه‌ها دارای شکل و ابعاد مختلفی می‌باشند. برای انجام آزمایش از ۵ مقطع مختلف در طول تونل تعداد ۱۰ نمونه تهیه که در واقع برای هر مقطع دو نمونه و دو آزمایش انجام شده است. در جدول (۶-۱) موقعیت و جنس نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۶-۱: موقعیت نمونه‌برداری در طول مسیر تونل انتقال آب کرمان

ردیف	شماره نمونه	موقعیت در تونل	چینه‌شناسی
۱	۶۵۲۶	۳۰۹۴۰/۶	آندزیت- بازالت
۲	۴۳۴۱	۳۳۱۲۵/۶	فلش
۳	۲۱۹۲	۳۵۲۷۴/۶	دیاباز
۴	۱۹۵۵	۳۵۵۱۱/۶	آندزیت
۵	۱۵۱۰	۳۵۹۵۶/۶	دیاباز

با توجه به اینکه نمونه‌ها دارای ابعاد و شکل‌های متفاوتی می‌باشند لذا امکان تهیه مغزه‌های ۵۲ میلی‌متری وجود ندارد. به همین علت نسبت به برش آنها با رعایت شرط متداول برای انجام آزمایش نفوذ (نسبت طول به قطر نمونه بین ۱ تا ۱/۵) اقدام شده است. در شکل (۶-۱) تصویر اولیه دو نمونه سنگ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱: نمونه‌های سنگ برای انجام آزمایش نفوذ پانچ در تونل انتقال آب کرمان

قالب‌های مورد استفاده در این آزمایش به شکل استوانه با قطر ۲۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و از جنس فولاد به ضخامت یک سانتی‌متر می‌باشد. (شکل (۶-۲)).



شکل ۶-۲: قرار گرفتن نمونه‌ها در مرکز قالب

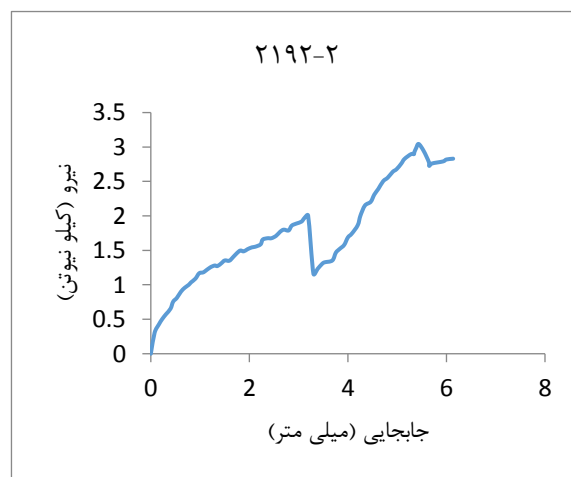
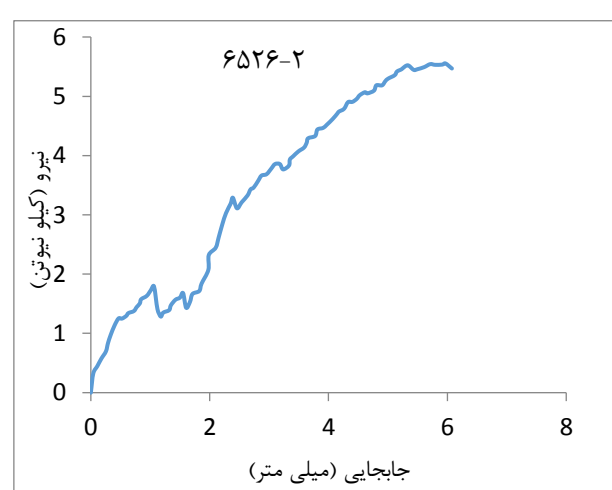
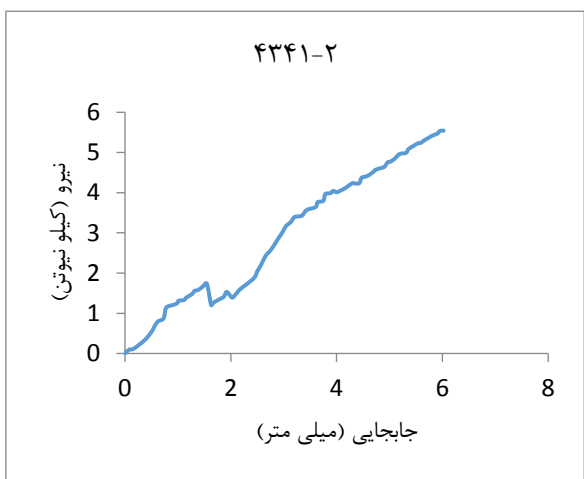
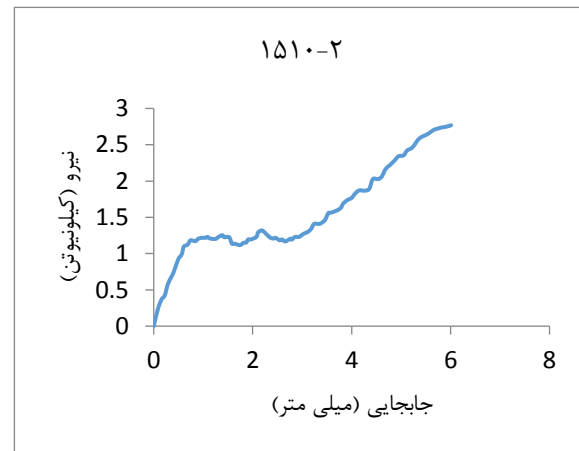
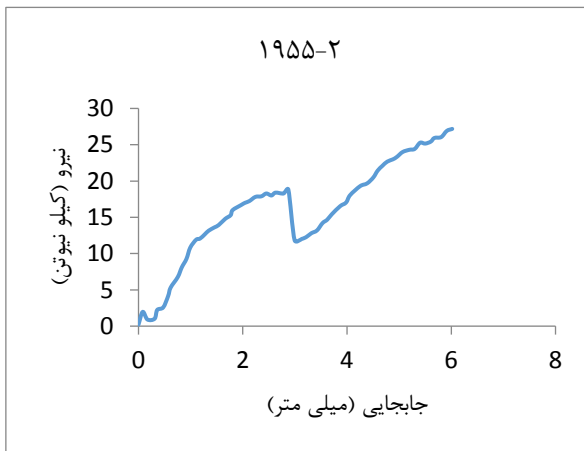
پس از قرار دادن نمونه‌ها در مرکز قالب، ترکیبی از سیمان، گچ و آب تهیه شده و برای ثابت نگه داشتن نمونه در داخل قالب استفاده شده است. در این ترکیب به ازاء هر ۷۰۰ گرم سیمان، ۳۰۰ گرم گچ و ۴۰۰ سی‌سی آب مورد استفاده قرار گرفته است. پس از گذشت ۱۰ روز از زمان قالب‌گیری نمونه‌های سنگی (به منظور رسیدن به مقاومت نهایی ماده نگهدارنده نمونه) نسبت به انجام آزمایش نفوذ پانچ اقدام شده است. در این آزمایش، پانچ با نرخ یک هزارم اینچ بر ثانیه تا زمانی که عمق نفوذ به ۶ میلی‌متر برسد در داخل نمونه نفوذ می‌کند. مقدار نیرو توسط خود دستگاه و مقدار نفوذ با دستگاه ثبت کننده جابجایی^۱ اندازه‌گیری می‌شود. در شکل (۶-۳) نحوه قرارگیری پانچ بر روی نمونه سنگ و همچنین ثبت جابجایی و نیرو در حین انجام آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۶-۳: قرارگیری پانچ بر روی سطح نمونه سنگ و ثبت تغییرات نیرو و نفوذ

برای محاسبه شاخص شکست بعد از ثبت داده‌های مربوط به هر آزمایش، نمودار نیرو-جابجایی برای هر نمونه سنگ رسم گردیده است (شکل (۶-۴)).

¹ linear variable displacement transducer



شکل ۶-۴: نمودار نیرو-جابجایی برای هر نمونه سنگ

۳-۶- بررسی ارتباط بین عامل‌های نیرو و نفوذ با حفرپذیری

برای بررسی ارتباط بین عامل‌های نیرو و جابجایی در آزمایش نفوذ پانچ با شاخص حفرپذیری، از اطلاعات ثبت شده در سیستم ثبت داده دستگاه آزمایش و ماشین حفار استفاده شده است. برای این منظور ابتدا شماره گام حفاری مربوط به نمونه سنگی که آزمایش نفوذ روی آن انجام شده مشخص سپس داده‌های سه عامل نیروی پیشران، گشتاور و نرخ نفوذ مربوط به گام حفاری از سیستم ثبت داده استخراج گردیده است. در سیستم ثبت داده ماشین حفار هر ۱۰ ثانیه یک داده و در سیستم آزمایش نفوذ هر ۵ ثانیه یک داده ثبت می‌شود. برای یکسان کردن فاصله زمانی بین دو داده از داده‌های آزمایش نفوذ میانگین‌گیری شده و به ازاء هر ۱۰ ثانیه لحاظ شده است. به منظور بررسی وجود رابطه بین FPI و عامل‌های نیرو و نفوذ، بانک داده از داده‌های هر ۵ نمونه تشکیل و وارد نرم‌افزار SPSS گردیده است. دامنه تغییرات داده‌ها در جدول (۳-۶) نشان داده شده است.

جدول ۳-۶: دامنه تغییرات داده‌ها

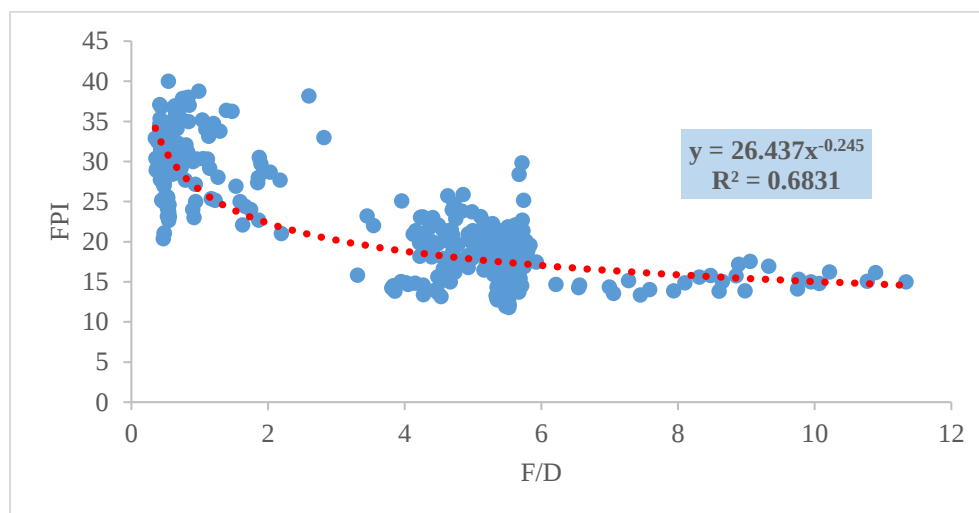
عامل	نیرو (کیلو نیوتن)	جابجایی (میلی متر)	FPI
تعداد داده	۴۶۱	۴۶۱	۴۶۱
حداکثر	۳۲/۸۹	۶/۰۲	۴۰
حداقل	۰/۲۳	۰/۰۸	۱۱/۷۹
متوسط	۱۲/۲۲	۳/۰۸	۲۱/۶۷
انحراف معیار	۱۹/۵	۵/۷۴	۵/۵۳
چارک	۲۵	۰/۲۶	۱۶/۱۷
	۵۰	۳/۰۵	۱۹/۵۶
	۷۵	۵/۷۹	۲۷/۶۷

در این تحقیق در مرحله اول به بررسی ضریب همبستگی اسپرمن بین شاخص حفرپذیری با عامل‌های نیرو و نفوذ و همچنین حالت‌هایی که ممکن است این دو عامل نسبت به هم داشته باشند، پرداخته شده است ((جدول ۳-۶)).

جدول ۶-۳: ضریب همبستگی بین FPI و نیرو و نفوذ

عامل	F×D	F/D	F	D
ضریب همبستگی	۰-/۵۲۶	-۰/۷	۰-/۵۳۹	-۰/۳۶۵
Sig.	.	.	.	.
تعداد	۴۶۱	۴۶۱	۴۶۱	۴۶۱

همبستگی بین FPI با نسبت نیرو به نفوذ بالا می باشد. در شکل (۵-۶) نوع رابطه و ضریب تعیین رابطه بین FPI با نسبت نیرو به نفوذ نشان داده شده است.



شکل ۶-۵: نوع رابطه بین FPI و نسبت نیرو به نفوذ

به طور کلی رابطه (۶-۱) را می توان برای به دست آوردن شاخص حفرپذیری بر اساس آزمایش نفوذ پانچ پیشنهاد داد:

$$FPI_{ppt} = \frac{\sum_{t=1}^n (26.43 * (\frac{f_t}{d_t})^{-0.245})}{N} \quad (۶-۱)$$

در این رابطه FPI_{ppt} حفرپذیری سنگ بکر (بر اساس آزمون نفوذ) بر حسب کیلونیوتن بر دیسک بر میلی‌متر بر دور، N تعداد کل داده‌ها، t زمان ثبت شده، f نیروی ثبت شده در زمان t ام و d جابجایی ثبت شده در زمان t ام می‌باشد. با توجه به اینکه درزه‌داری یکی از خصوصیات توده سنگ می‌باشد لذا نقص اصلی این مدل عدم لحاظ کردن تأثیر مشخصات هندسی درزه در پیش‌بینی FPI می‌باشد. برای افزایش دقت مدل ارائه شده تأثیر دو مشخصه درزه شامل فاصله‌داری و زاویه صفحه درزه به FPI_{ppt} اضافه شده است. برای این منظور با توجه به اینکه مشخصات هندسی درزه‌ها توأم با هم در شکست سنگ تأثیر می‌گذارند لذا از ضریب خردشدگی کل استفاده شده است. برای به‌دست آوردن مدل پیش‌بینی حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار، در عامل‌های ورودی نرم افزار SPSS، علاوه بر FPI_{ppt} ، ضریب خردشدگی کل نیز اضافه گردید. رابطه حاصل از رگرسیون غیر خطی به شکل رابطه (۶-۲) می‌باشد.

$$FPI_{rm} = FPI_{ppt} \sqrt{K_{s-tota}} \quad (۶-۲)$$

در این رابطه FPI_{rm} شاخص حفرپذیری توده سنگ می‌باشد.

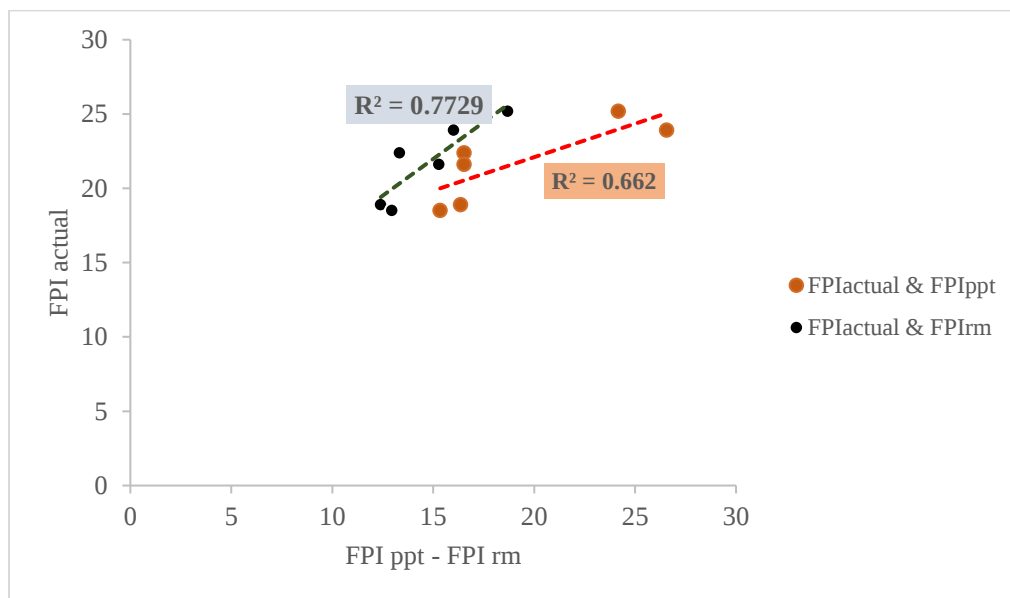
۶-۴- ارزیابی شاخص‌های حفرپذیری

برای ارزیابی شاخص‌های حفرپذیری ارائه شده، شش نمونه سنگ از مقطع‌های مختلف تونل انتخاب و بر روی آنها آزمایش نفوذ پانچ انجام شده است. برای هر نمونه FPI_{ppt} محاسبه شده است (جدول ۶-۴).

جدول ۶-۴: شاخص FPI_{ppt} برای هر نمونه سنگ در تونل انتقال آب کرمان

ردیف	موقعیت در تونل (متر)	شاخص حفرپذیری	زاویه درزه (درجه)	فاصله داری (سانتی متر)	F/D	FPI _{ppt}
۱	۳۰۹۴۰/۶۰۶	۲۵/۲	۲۴/۸۰	۱۰۰	۱/۴۴	۲۴/۱۸
			۷/۴۱	۱۷۵		
			۵۱/۱۱	۱۷۵		
۲	۳۳۱۲۵/۶۰۶	۲۳/۹۲	.	۹۰	۹۸/۰	۲۶/۵۷
			.	۷۰		
			.	۱۰۰		
۳	۳۳۷۸۱/۶۰۶	۱۸/۹۱	۳۴/۵۳	۱۳۰	۷/۱	۱۶/۳۶
			۵۱/۳۲	۱۳۰		
			۱۸/۵۲	۱۳۰		
۴	۳۴۵۷۳/۶۰۶	۲۲/۴	۶۶/۹۱	۶۰	۶/۸	۱۶/۵۳
			۷۲/۸۸	۷۰		
			۱۶/۹۳	۷۰		
۵	۳۴۷۳۰/۶۰۶	۱۸/۵۱	۱۷/۹۳	۶۰	۹/۲	۱۵/۳۵
			۰/۹۶	۱۰۰		
			۶۶/۹۲	۸۰		
۶	۳۵۹۳۲/۶۰۶	۲۱/۶۱	۲۹/۲۸	۴۰	۶/۸	۱۶/۵۳
			۴۱/۹۶	۷۵		
			۳۱/۷۷	۷۵		

در شکل (۶-۶) میزان همبستگی بین FPI واقعی با دو شاخص جدید نشان داده شده است.



شکل ۶-۶: میزان همبستگی بین FPI واقعی و دو شاخص جدید

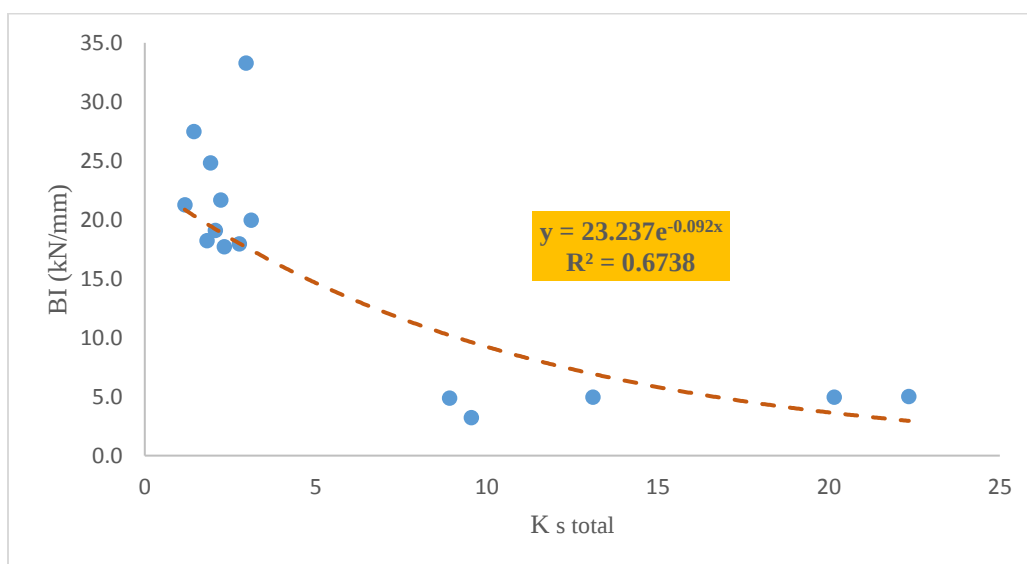
۶-۵- بررسی ارتباط شاخص شکست با حفرپذیری توده سنگ درزه دار

برای بررسی ارتباط شاخص شکست سنگ با حفرپذیری توده سنگ درزه دار به بررسی ارتباط این شاخص با عامل‌های مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، زاویه و فاصله‌داری درزه پرداخته شده است. با توجه به اینکه شاخص شکست برای تونل انتقال آب زاگرس (قطعه ۲) و کویینز موجود بود این دو پروژه از بانک داده انتخاب و داده‌های آنها وارد نرم افزار SPSS شدند. شایان ذکر است شاخص شکست در این پروژه‌ها بر اساس رابطه (۱-۲) به دست آمده است. در جدول (۵-۶) رابطه بین هر عامل مستقل (مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، زاویه و فاصله‌داری درزه) با شاخص شکست به عنوان عامل وابسته و ضریب همبستگی آنها آورده شده است.

جدول ۶-۵: رابطه بین شاخص شکست و عامل‌های سنگ بکر و توده سنگ

عامل وابسته	عامل مستقل	رابطه	ضریب همبستگی
شاخص شکست (BI)	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال) (UCS)	$BI = -9.11\ln(UCS) + 49.14$	۰/۳۶
	مقاومت کششی (مگاپاسکال) (BTS)	$BI = -13.4\ln(BTS) + 33.46$	۰/۵۸
	زاویه درزه (درجه) (α)	$BI = 4.11e^{-0.004\alpha}$	۰/۰۳۶
	فاصله درزه (سانتی متر) (Sp)	$BI = 3.8e^{-0.001Sp}$	۰/۰۲۶

رابطه بین عامل‌های مقاوت فشاری تک محوری و مقاومت کششی سنگ با شاخص شکست، رابطه لگاریتمی با ضریب همبستگی متوسط می‌باشد. در خصوص عامل‌های فاصله‌داری و زاویه بین صفحه درزه با محور تونل ملاحظه می‌شود که این رابطه از ضریب همبستگی بسیار ضعیفی برخوردار می‌باشد. به منظور بررسی بیشتر موضوع و با لحاظ این مسئله که دو عامل فاصله و زاویه درزه توأم با هم در شکست سنگ تأثیر گذار می‌باشند لذا ضریب خردایش کل، برای این منظور استفاده گردیده است. در شکل (۶-۷) ارتباط بین شاخص شکست سنگ با ضریب خردایش کل آورده شده است.

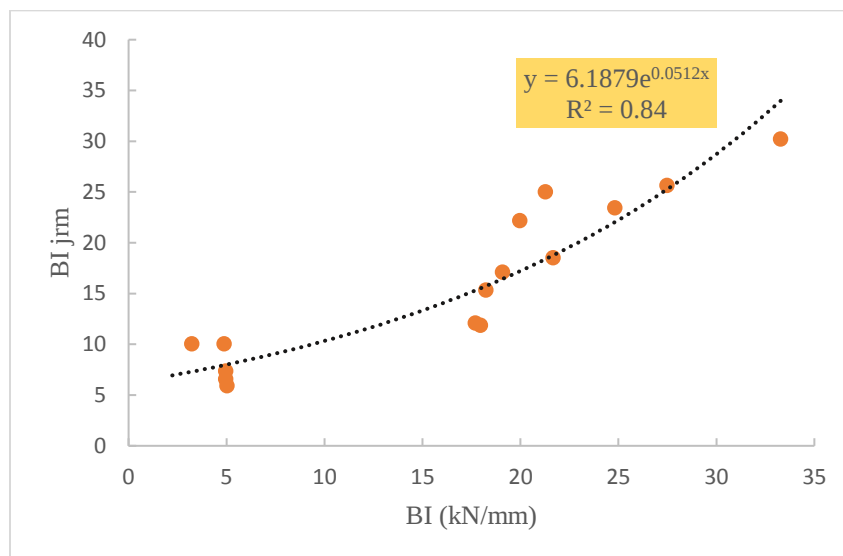


شکل ۶-۷: ارتباط شاخص شکست با ضریب خردایش کل

همانطور که در شکل (۶-۷) ملاحظه می‌شود شاخص شکست سنگ با ضریب خردایش کل ارتباط خوبی دارد لذا می‌توان این ضریب را جایگزین دو عامل اصلی درزه‌داری کرد. با توجه به نتایج بررسی ارتباط بین شاخص شکست سنگ با مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و ضریب خردایش کل، در این مرحله برای ارائه یک رابطه غیر خطی بین شاخص شکست سنگ به عنوان یک عامل وابسته و مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و ضریب خردایش کل به عنوان عامل‌های مستقل از نرم افزار SPSS استفاده شده است. رابطه به‌دست آمده دارای ضریب همبستگی ۰/۷۷ می‌باشد.

$$BI_{jrm} = \frac{1.85 UCS}{BTS \sqrt{K_{s total}}} \quad (۶-۳)$$

در این رابطه BI_{jrm} شاخص شکست توده سنگ درزه‌دار، UCS مقاومت فشاری تک محوری بر حسب مگاپاسکال، BTS مقاومت کششی سنگ بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. در شکل (۶-۸) رابطه بین شاخص شکست سنگ با شاخص شکست توسعه داده شده برای توده سنگ درزه‌دار آورده شده است.

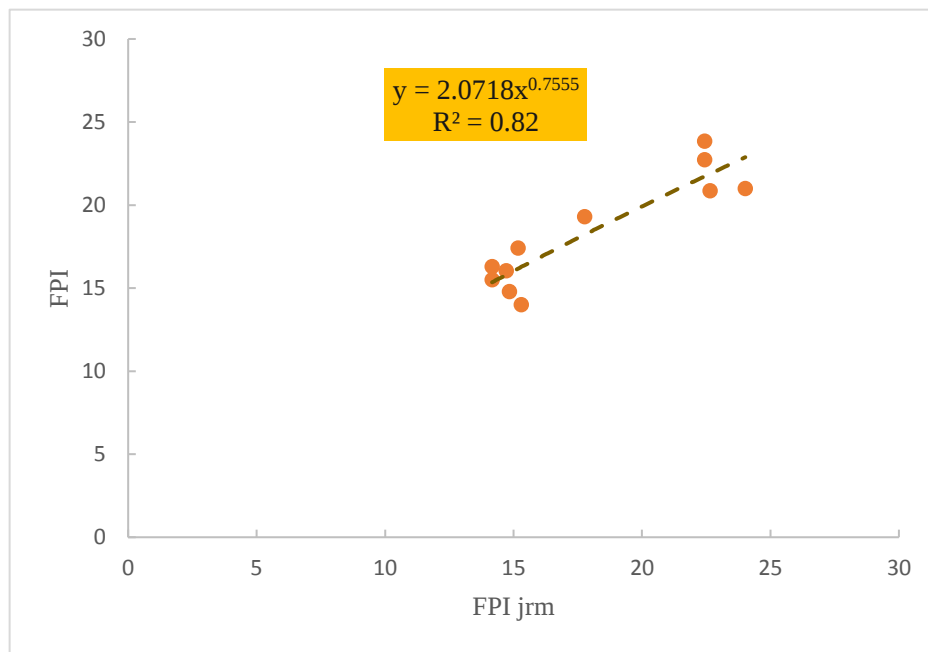


شکل ۶-۸: ارتباط بین BI و BIjrm

برای لحاظ کردن تأثیر تلفیقی عامل‌های اصلی درزه‌ها، به بررسی ارتباط شاخص شکست توده‌سنگ درزه‌دار با شاخص حفرپذیری پرداخته شده که نتیجه این بررسی ارائه رابطه (۴-۶) می‌باشد. ضریب همبستگی این رابطه ۰/۸ می‌باشد.

$$FPI_{jrm} = 6.187 e^{0.512 BI_{jrm}} \quad (۴-۶)$$

در این رابطه FPI_{jrm} شاخص حفرپذیری توده‌سنگ درزه‌دار و BI_{jrm} شاخص شکست توده‌سنگ درزه‌دار می‌باشد. برای ارزیابی شاخص جدید، از نتایج آزمون نفوذ پانچ در تونل انتقال آب کرمان استفاده شده که در شکل (۹-۶) میزان همبستگی بین FPI واقعی و FPI_{jrm} قابل ملاحظه است.



شکل ۹-۶: همبستگی بین FPI و FPI_{jrm}

همانطور که ملاحظه می‌شود همبستگی بین شاخص حفرپذیری واقعی و شاخص حفرپذیری پیش‌بینی شده بر اساس رابطه جدید در این تحقیق، از ضریب همبستگی بالایی برخوردار می‌باشد.

۶-۶- جمع‌بندی

در این تحقیق با توجه به در دسترس بودن و کم هزینه بودن آزمایش نفوذ پانچ، این آزمایش به عنوان مبنایی به منظور ارائه مدلی جدید برای پیش‌بینی حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی در تونل انتقال آب کرمان بیانگر وجود رابطه با ضریب همبستگی $0/68$ بین نسبت نیرو به نفوذ با FPI می‌باشد. این موضوع بیانگر این است که شاخص شکست حاصل از آزمایش نفوذ پانچ انعکاس دهنده خصوصیات سنگ بکر می‌باشد. برای استفاده از این شاخص برای توده سنگ بایستی تأثیر دو مشخصه درزه (فاصله‌داری و زاویه درزه) در این شاخص لحاظ گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شاخص شکست با ضریب خردشدگی کل (به عنوان عاملی که تأثیر تلفیقی زاویه و فاصله‌داری درزه در آن لحاظ شده است) دارای ضریب همبستگی $0/78$ می‌باشد. با توجه به بالاتر بودن ضریب همبستگی بین ضریب خردشدگی کل با شاخص شکست نسبت به مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی می‌توان نتیجه گرفت لحاظ کردن تأثیر تلفیقی فاصله‌داری و زاویه درزه در شاخص شکست از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

فصل هفتم

مدلسازی عددی تأثیر مشخصات هندسی درزه در حفریذیری توده سنگ

از مدلسازی عددی می‌توان به عنوان روشی مناسب برای اندازه‌گیری کمیت‌هایی که اندازه‌گیری آن‌ها نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی خاص که تأمین آن‌ها همراه با صرف هزینه و زمان زیاد می‌باشد، استفاده نمود. در این تحقیق برای ارزیابی عملکرد دیسک برشی به منظور بررسی حفرپذیری توده سنگ، آزمایش برش خطی با استفاده از نرم افزار آباکوس ۶.۱۴-۲ مدلسازی شده است. در این مدلسازی در گام اول، سنگ بکر مدلسازی و سپس برای صحت سنجی، نتایج مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در ادامه درزه‌هایی با مشخصات (زاویه و فاصله‌داری) متفاوت به مدل اضافه و به بررسی تأثیر این مشخصات در نیروهای عمودی و غلتشی پرداخته شده است.

۷-۲- معرفی نرم افزار المان محدود آباکوس

نرم‌افزار آباکوس مجموعه‌ای بسیار توانمند از برنامه‌های مدلسازی عددی است که بر پایه روش اجزاء محدود شکل گرفته است. این نرم‌افزار توانایی حل طیف گسترده‌ای از مسائل علمی و صنعتی، از مسائل ساده و دارای تحلیل خطی تا مباحث پیچیده مدلسازی غیرخطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار برای اولین بار توسط آقای هبیت^۱ در سال ۱۹۷۲ میلادی معرفی شد. او در رساله دکترای خود این نرم‌افزار را تحت عنوان مکانیک محاسبات بر پایه روش اجزای محدود مطرح و سپس در سال ۱۹۷۸ اولین ویرایش آن را منتشر کرد. در سال ۱۹۹۱ اولین نسخه گرافیکی این نرم‌افزار تحت عنوان ABAQUS/CAE در بازار عرضه شد. امروزه آباکوس توسط شرکت فرانسوی داسو سیستم^۲ تولید و عرضه می‌شود. نام و لوگوی نرم‌افزار آباکوس از کلمه "چرتکه" الهام گرفته شده که خود یادآور انجام محاسبات ریاضی است. همان طور که اشاره شد نرم‌افزار آباکوس یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارها در زمینه

¹ Hibitt

² Dassault Systèmes

تحلیل به روش اجزاء محدود است. یکی از نقاط قوت آباکوس فراهم کردن محیطی ساده و کاربرپسند برای انجام هر سه بخش (پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش) است. علاوه بر این، آباکوس قابلیت سابروتین‌نویسی به زبان فورترن^۱ را نیز برای کاربر فراهم کرده است. این ویژگی سبب شده که هر مدلی را چه در حوزه آکادمیک چه در حوزه صنعتی بتوان در آباکوس پیاده‌سازی کرد. این نرم‌افزار قابلیت انجام تحلیل‌های استاتیکی، دینامیکی صریح^۲ و دینامیکی ضمنی^۳ را دارد.

۷-۳- مدلسازی عددی آزمایش برش خطی سنگ

برای مدلسازی سه بعدی آزمایش برش خطی به منظور بررسی فرآیند شکست سنگ توسط ابزار برش دهنده دیسکی از نرم افزار آباکوس نسخه ۲-۱۴ استفاده شده است. برای رسیدن به هدف در گام اول بانک داده از انواع سنگ‌هایی که آزمایش برش خطی بر روی آنها انجام و نتایج در دسترس می‌باشد تشکیل شده است. سپس سایر مشخصات از جمله خواص اصلی سنگ بکر، قطر دیسک برش دهنده و ... به بانک داده اضافه و در نهایت یک نوع سنگ که اطلاعات مورد نیاز به طور کامل در دسترس بوده از بانک داده برای بررسی صحت مدل ساخته شده انتخاب گردیده است.

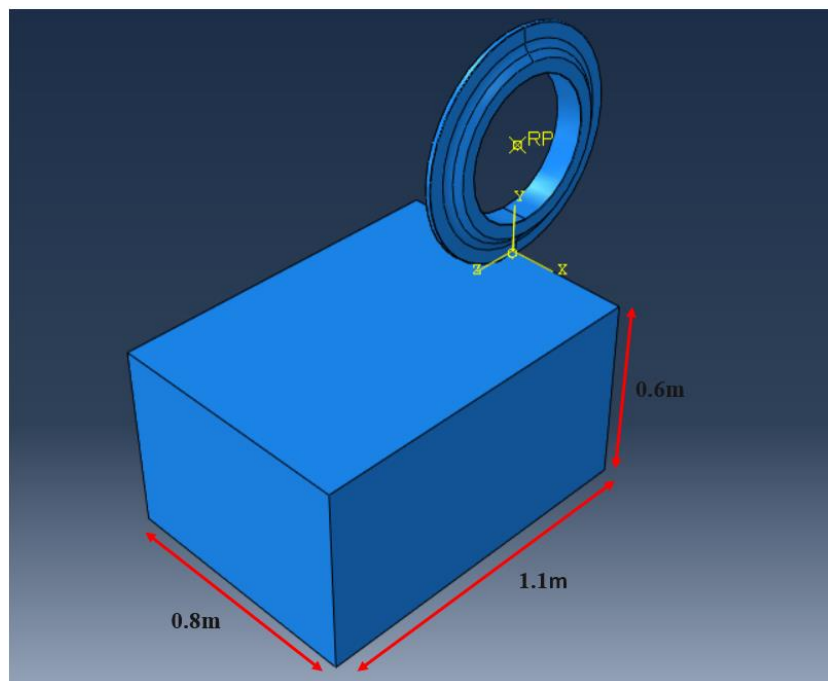
۷-۳-۱- مدلسازی بلوک سنگی

برای ارزیابی کارایی دیسک از نمونه سنگ گرانیات قرمز کلرادو استفاده شده است. با توجه به اینکه ابعاد واقعی نمونه در آزمایشگاه برای انجام تست برش خطی $1/1 \times 0/8 \times 0/6$ متر می‌باشد لذا در مدلسازی نیز ابعاد بلوک سنگ مشابه با آزمایشگاه لحاظ شده و از المان‌های مربعی به ابعاد یک میلی‌متر برای مش‌بندی نیز استفاده شده است (شکل‌های (۷-۱) و (۷-۲)).

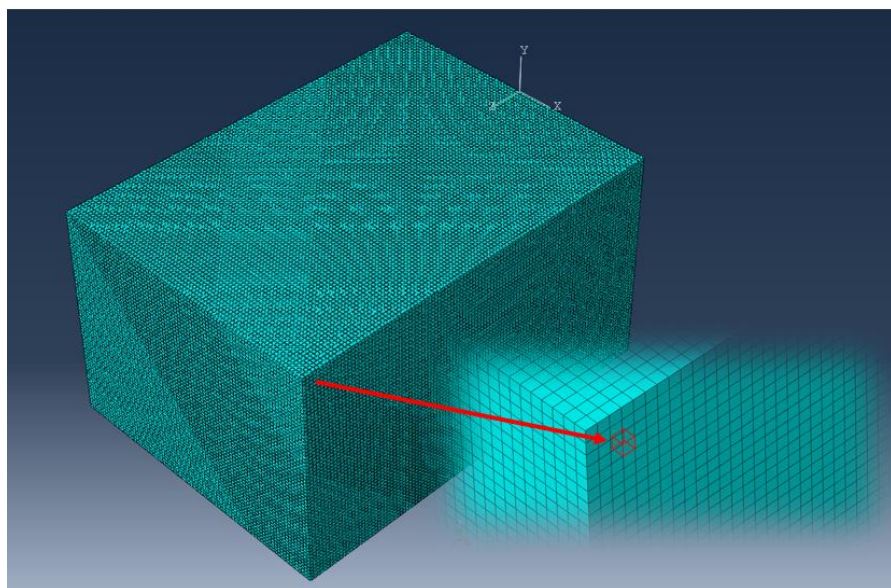
¹ Fortran

² Explicit

³ Implicit



شکل ۷-۱: ابعاد بلوک سنگی مدل شده برای آزمایش برش خطی



شکل ۷-۲: مش‌بندی بلوک سنگی

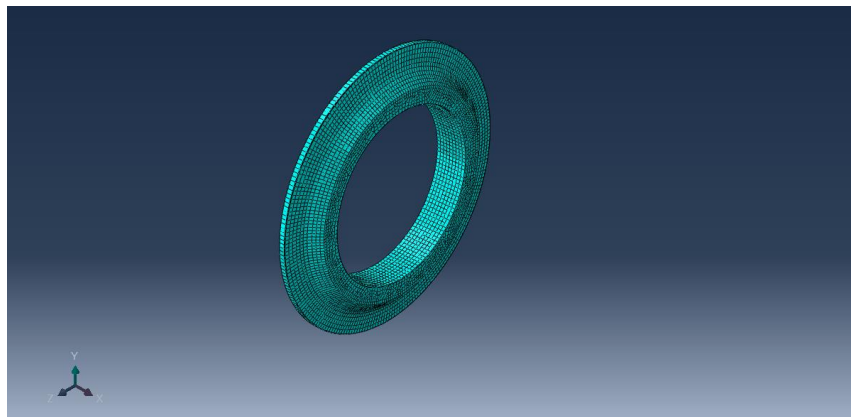
نمونه سنگ بصورت همسانگرد در نظر گرفته شده و مشخصات ژئومکانیکی سنگ در جدول (۷-۱) آورده شده است.

جدول ۷-۱: مشخصات ژئومکانیکی سنگ گرانیت قرمز

عامل	واحد	مقدار
مقاومت فشاری تک محوری	مگاپاسکال	۱۵۸
مقاومت کششی	مگاپاسکال	۶/۷۸
مدول یانگ	گیگاپاسکال	۴۱
مدول برشی	گیگاپاسکال	۱۶/۶۱
نسبت پواسون	-	۰/۲۳

۷-۳-۲- مدلسازی دیسک برش دهنده

بخش دیگری از مدل، دیسک برشی می‌باشد. دیسک برشی مدلسازی شده، از نوع مقطع ثابت با قطر ۱۷ اینچ (۴۳۲ میلی‌متر) و ضخامت لبه ۱۳ میلی‌متر به صورت تک و ساخت شرکت رابینز می‌باشد. برای مدلسازی دیسک برشی از نرم افزار اتوکد استفاده شده است. یکی از نقاط قوت نرم‌افزار آباکوس، قابلیت فراخوانی مدل هندسی از نرم افزار اتوکد می‌باشد. در مرحله اول هندسه دیسک برشی بر اساس ابعاد واقعی در نرم‌افزار اتوکد مدلسازی گردیده سپس مدل وارد نرم افزار آباکوس شده است. در ادامه برای مش‌بندی از مش‌های مکعبی شکل با ابعاد ۳ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۷-۳) مدل دیسک در پیش‌پردازنده نرم‌افزار نشان داده شده است. همچنین خصوصیات مکانیکی لحاظ شده برای دیسک در جدول (۷-۲) آمده است.



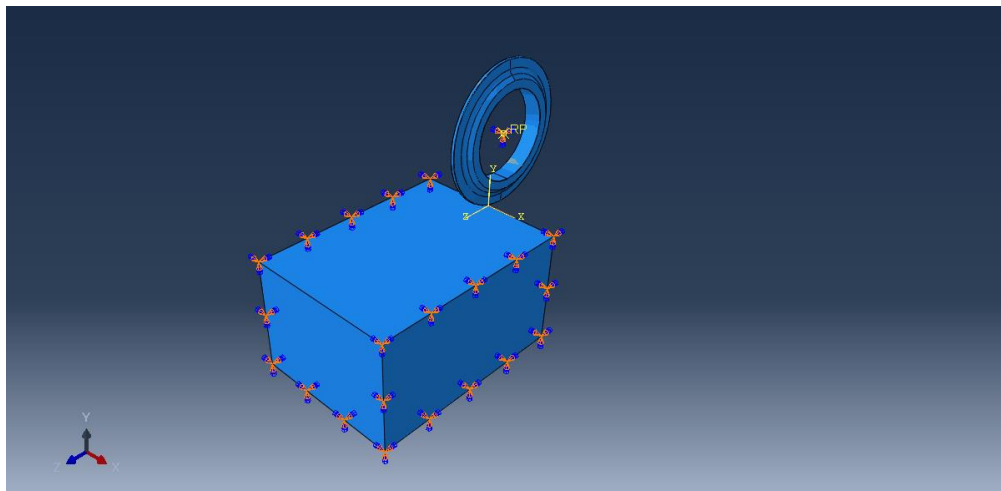
شکل ۷-۳: دیسک مدل سازی شده برای آزمایش برش خطی

جدول ۷-۲: خصوصیات مکانیکی دیسک مدل سازی شده

عامل	واحد	مقدار
چگالی	کیلوگرم بر متر مکعب	۸۰۰۰
مدول یانگ	گیگا پاسکال	۲۱۰
نسبت پواسون	-	۰/۲۵

۷-۳-۳- شرایط مرزی مدل

در این تحقیق مبنای اعمال شرایط مرزی، شرایط آزمایشگاهی برش خطی می باشد. مدل برش دهنده دیسکی ساخته شده در راستای Y با سرعت $9/3$ رادیان بر ثانیه و با عمق نفوذهای $1/9$ ، $3/2$ و $5/1$ میلی متر تنظیم شده است. همچنین مدل برش دهنده دیسک به غیر از راستای حرکت خود (راستای Y) در سایر جهات ثابت شده است. برای اعمال شرایط مرزی بر مدل سنگ، مشابه شرایط آزمایشگاهی، مدل سنگ در کف و دو دیوار جانبی موازی جهت حرکت دیسک محدود و در سایر جهات آزاد می باشد (شکل (۷-۴)).



شکل ۷-۴: شرایط مرزی مدل آزمایش برش خطی

۷-۳-۴- مدل سازی تماس سنگ و برش دهنده

با توجه به اینکه مدل از دو بخش مختلف سنگ و دیسک برش دهنده تشکیل شده است لذا در مدل سازی بایستی نحوه تماس این دو بخش تعریف شود. در آباکوس برای تعریف تماس بین دو جسم مختلف، دو روش وجود دارد. روش اول، روش تماس سطح به سطح^۱ و روش دوم، روش تماس عمومی^۲ می باشد. در این تحقیق با توجه به حرکت دیسک بر روی سنگ، روش تماس عمومی انتخاب شده است.

۷-۳-۵- انتخاب روش حل مدل

آباکوس دارای دو روش حل، روش استاندارد و روش صریح برای حل مسائل می باشد. در روش استاندارد معادلات موقعیت، سرعت و شتاب گره ها به صورت همزمان و با استفاده از روش حل تکرار محاسبه می شوند. از این روش بیشتر برای تحلیل تنش های استاتیکی و شبه استاتیکی و همچنین تحلیل های دینامیکی استفاده می شود. در روش صریح نتایج (شامل موقعیت، سرعت و شتاب گره ها) در هر لحظه، مستقیماً از نتایج در لحظه قبل به دست

^۱ surface to surface contact

^۲ general contact

می آیند و هیچ حل تکراری نیز صورت نمی گیرد. این روش بیشتر برای تحلیل های دینامیکی که در آنها تغییرات با سرعت بالایی انجام می شود، مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق با توجه به تحلیل دینامیکی از روش حل صریح استفاده شده است.

۷-۳-۶- مدل رفتاری سنگ

به منظور مدلسازی فرآیند شکست دینامیکی سنگ توسط دستگاه برش سنگ، از مدل جانسون هلمکوئیست^۱ (JH-2) استفاده شده است. مدل JH-2 نخستین بار به منظور توصیف رفتار دینامیکی آسیب سرامیک ها استفاده شده است (باناداک^۲، ۲۰۱۲). مدل JH2 شامل مقاومت وابسته به فشار، آسیب، شکستگی و مقاومت پس از شکستگی می باشد. در این مدل، تنش های نرمال سالم و شکست به صورت تابعی از فشار نرخ کرنش محاسبه می شوند.

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (۱-۷)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (۲-۷)$$

در روابط بالا، P^* نمایانگر فشار نرمالیزه شده، T^* نمایانگر حد کشش هیدرواستاتیکی نرمالیزه شده، $\dot{\epsilon}^*$ بیانگر نرخ کرنش و A ، B ، C ، M و N ثابت های ماده می باشند. در این مدل اگر تنش معادل نرمالیزه شده موجود بزرگ تر از استحکام ماده سالم باشد، ماده به سطح تسلیم خود تغییر شکل داده و تغییر شکل پلاستیک رخ می دهد. با افزایش تغییر شکل پلاستیک غیر قابل بازگشت، آسیب درون ماده انباشته شده و استحکام آن از استحکام ماده سالم (σ_i^*) به طور تدریجی به σ_D^* کاهش می یابد. سپس سطح تسلیم جدید به سطح آسیب وابسته می شود ($0 \leq$ $D \leq 1$). اگر ماده کاملاً آسیب دیده باشد ($D=1$)، سطح تسلیم جدید به سطح ماده شکسته تنزل می یابد (ایکسیا

¹ Johnson-Holmquist

² Banadaki

و همکاران، ۲۰۱۷). در این تحقیق برای به دست آوردن عامل‌های ورودی مدل JH2 مربوط به سنگ گرانیت قرمز از عامل‌های مورد استفاده توسط آقای هیویان لی^۱ (۲۰۱۶) در مدلسازی خردایش سنگ گرانیت قرمز کلرادو استفاده شده است (جدول ۷-۳).

جدول ۷-۳: مقادیر عامل‌های ورودی مدل JH2 برای سنگ گرانیت قرمز (هیویان لی، ۲۰۱۶)

عامل	واحد	مقدار
چگالی	کیلوگرم بر متر مکعب	۲۶۰۰
ضریب مقاومت اولیه (A)	-	۰/۳
ضریب مقاومت شکست (B)	-	۲/۰۴
ضریب نرخ کرنش (C)	-	۰/۰۰۷
توان مقاومت اولیه (N)	-	۰/۷
توان مقاومت شکست (M)	-	۱/۵
مدول بالک (K1)	گیگاپاسکال	۸۵
ضریب فشار دوم (K2)	گیگاپاسکال	-۱۷۱
ضریب فشار سوم (K3)	گیگاپاسکال	۲۰۸
ضریب آسیب (D1)		۰/۰۴
ضریب آسیب (D2)		۱
نرخ کرنش ($\dot{\epsilon}_0$)	یک بر ثانیه	۱
فشار در حد الاستیک (P_{HEL})	گیگاپاسکال	۴/۵

۷-۳-۷- دریافت خروجی از مدل

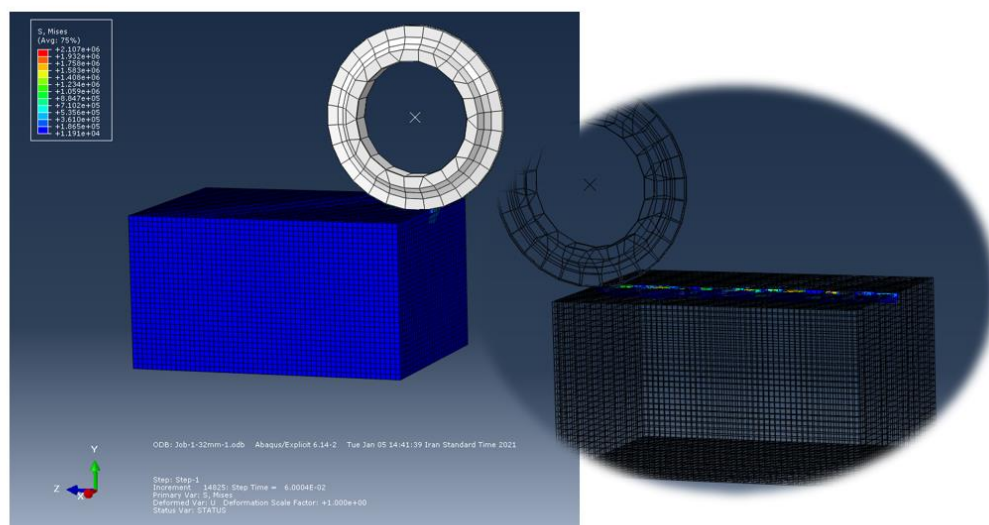
در آزمون آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری نیروهای عمودی و غلتشی وارد بر دیسک از سیستم ثبت داده استفاده شده است. برای این منظور سیستم ثبت داده بر روی محور دیسک نصب و در هر لحظه نیروهای وارد بر دیسک ثبت می‌گردد. با توجه اینکه مدلسازی مطابق با شرایط واقعی آزمایش انجام شده لذا برای دریافت خروجی نیز

¹ Huiyun Li

مرکز دیسک برشی به عنوان یک نقطه مرجع در مدلسازی انتخاب و در حین برش سنگ توسط دیسک، نیروهای وارد بر دیسک ثبت شده است.

۷-۳-۹- ارزیابی مدل

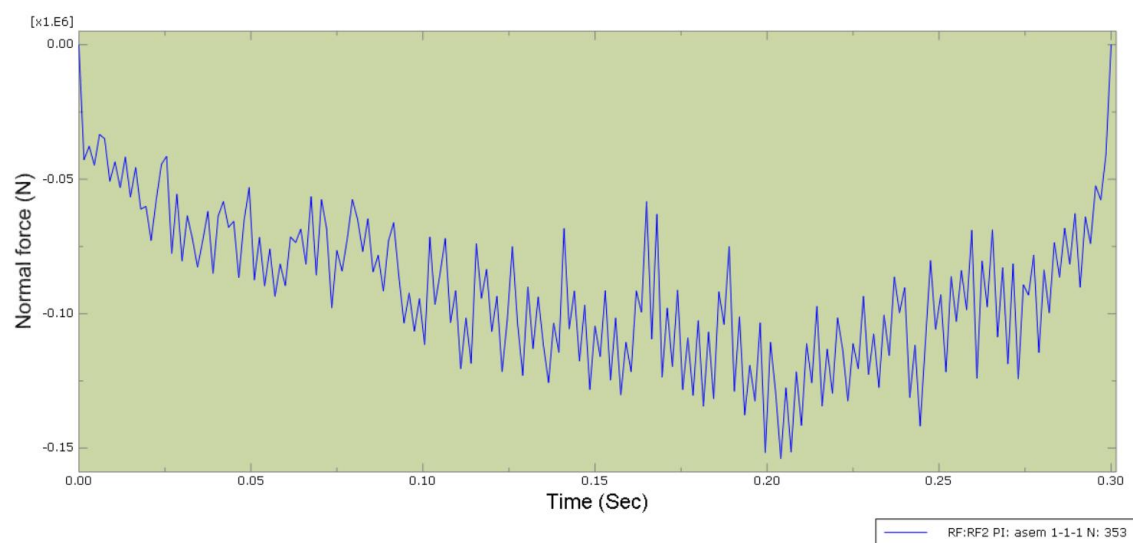
برای ارزیابی مدل ساخته شده، نیروهای عمودی و غلتشی که به صورت لحظه‌ای در مدلسازی آزمایش برش خطی به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی که توسط آقای ریچارد گرتچ^۱ در آزمایشگاه مدرسه معدن کلرادو ارائه شده، مقایسه گردیده است. برای به دست آوردن نیروهای نرمال و چرخشی، مدل‌های زیادی ساخته و حل شده تا تمام خطاهای محاسبات موجود در مدل حذف گردد. با حل مدل نهایی، نمودار تغییرات نیروی وارد بر دیسک (عمودی و غلتشی) به دست می‌آید. به عنوان نمونه در شکل (۷-۵) چرخش دیسک روی سنگ و خردایش نشان داده شده است.



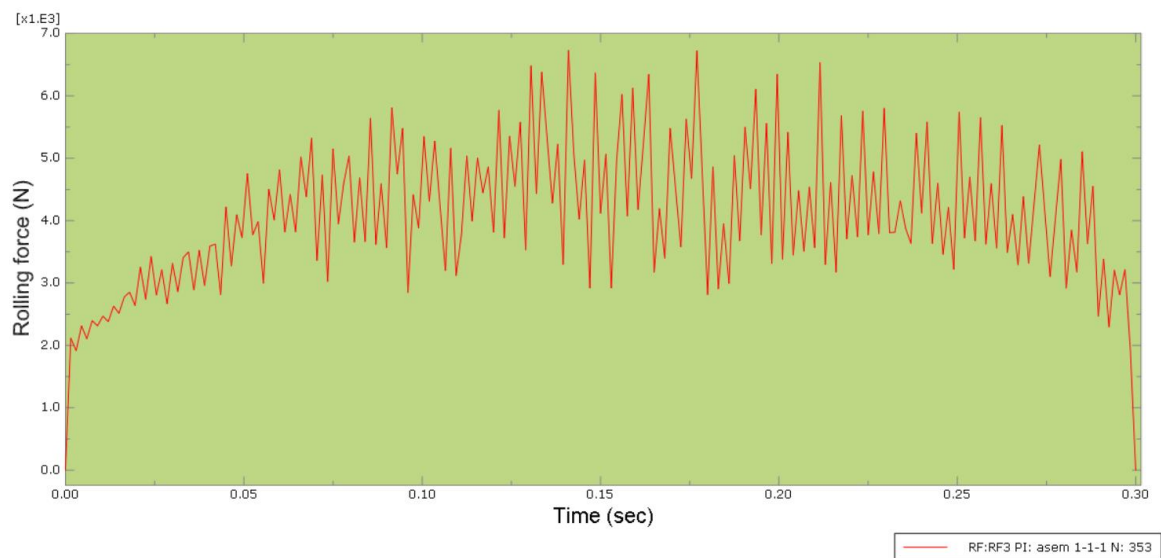
شکل ۷-۵: چرخش دیسک روی سنگ و مسیر برش داده شده

¹ Richard Gertsch

شکل‌های (۶-۷) و (۷-۷) روند تغییرات نیروی عمودی و غلتشی وارد بر سطح تیغه دیسکی و سنگ در عمق نفوذ ۱/۹ میلی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۷: تغییرات نیروی عمودی وارد بر دیسک در عمق برش ۱/۹ میلی‌متر



شکل ۷-۷: تغییرات نیروی عمودی وارد بر دیسک در عمق برش ۱/۹ میلی‌متر

در روش المان محدود، المان‌هایی که ضریب آسیب آنها به مقدار یک می‌رسد از مدل حذف می‌شوند. بنابراین در سطح سنگ، با حذف المان‌های مذکور، شیاری در مسیر حرکت دیسک برشی دیده می‌شود. رفتار نمودار دندانه-اره‌ای شکل نیرو - زمان بسیار وابسته به عامل‌های سنگ می‌باشد. هر چه سنگ مقاومتر باشد تغییرپذیری دامنه این نمودار دندانه‌اره‌ای شکل بیشتر می‌شود. نمودار تغییرات نیروی عمودی وارد بر دیسک در جهت منفی می‌باشد. در واقع نیروی عمودی وارد بر سنگ معادل نیروی عمودی وارد بر دیسک ولی در جهت مخالف است. نیروی جانبی وارد بر دیسک نیز در دو جهت مثبت و منفی محور زمان تغییر می‌کند. علت این تغییر، تشکیل تراشه در حین انجام برش سنگ می‌باشد. در نمودار تغییرات نیروی عمودی ملاحظه می‌شود که دامنه تغییرات نسبت به سایر نیروها بسیار بیشتر می‌باشد علت این موضوع اثر لرزه و برخورد دیسک در هنگام تخریب المانهای جلوی خود و درگیر شدن دوباره آن با المانهای بعدی می‌باشد. فرآیند مدلسازی برای عمق نفوذهای $3/2$ و $5/1$ میلی‌متر نیز انجام شده است. برای آنکه بتوان مقدار نیروی وارد بر دیسک را برآورد کرد و با نتایج حاصل از آزمون آزمایشگاهی برش خط سنگ مقایسه کرد، از مقدار هر یک از نیروها میانگین گرفته شده است. در جدول (۷-۴) انحراف بین میانگین مقادیر نیروی‌های عمودی حاصل از مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی و مدل CSM ذکر شده است.

جدول ۷-۴: مقایسه نیروهای عمودی به‌دست آمده از روش‌های مختلف

نیروی عمودی (کیلو نیوتن)					عمق نفوذ (میلی متر)
مدلسازی عددی	آزمایشگاهی	مدل CSM	درصد انحراف بین نتیجه عددی با آزمایشگاهی	درصد انحراف بین نتیجه عددی با مدل CSM	
۹۱/۱۱	۱۰۰	۹۶/۴۱	۹/۷۵	۵/۸۱	۱/۹
۱۰۴/۷۶	۱۱۲	۱۱۴/۵۸	۶/۹۱	۹/۳۷	۳/۲
۱۴۱/۰۵	۱۵۹	۱۳۳/۶۱	۱۲/۷۲	۵/۲۷	۵/۱

همچنین در جدول (۷-۵) انحراف بین میانگین مقادیر نیروی‌های غلتشی حاصل از مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی و مدل CSM ذکر شده است.

جدول ۷-۵: مقایسه نیروهای غلتشی به‌دست آمده از روش‌های مختلف

نیروی غلتشی (کیلو نیوتن)					عمق نفوذ (میلی‌متر)
درصد انحراف بین نتیجه عددی با مدل CSM	درصد انحراف بین نتیجه عددی با آزمایشگاهی	مدل CSM	آزمایشگاهی	مدل سازی عددی	
۵۶/۰۹	۲۲/۴۹	۶/۴	۵	۴/۱	۱/۹
۳۱/۸۶	۱۱/۳۱	۹/۸۹	۸/۳	۷/۵	۳/۲
۲۱/۱۶	۲۰/۳۸	۱۴/۶۰	۲۲/۳	۱۸/۵۲	۵/۱

برای انتخاب عمق نفوذ با درصد انحراف کمتر برای ادامه بررسی موضوع لزوم انتخاب مبنای انحراف وجود دارد. با توجه به اختلاف موجود بین نتایج حاصل از آزمایشگاه و مدل CSM به نظر می‌آید که مدل CSM محافظه کارانه می‌باشد. چنانچه این موضوع توسط بالچی و توماچ (۲۰۱۵) نیز بیان شده است. بر این اساس برای ادامه بررسی با توجه به اینکه خطای بین عمق نفوذ ۳/۲ میلی‌متر با نتایج آزمایشگاهی کمتر می‌باشد لذا مدل مربوط به این عمق انتخاب شده است.

۷-۴- مدلسازی توده سنگ

به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های هندسی درزه شامل زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری بر خردایش سنگ توسط دیسک برشی، در این مرحله از مدلسازی برش خطی سنگ، این دو ویژگی به مدل بلوکی سنگ اضافه شده است. برای اعمال درزه در مدل از روش تماس سطح به سطح استفاده و خواص لحاظ شده برای درزه نیز بر طبق جدول (۷-۶) می‌باشد.

جدول ۷-۶: عامل‌های مربوط به درزه

عامل	واحد	مقدار
چسبندگی	مگاپاسکال	۰
زاویه اصطکاک	درجه	۲۵
زاویه اتساع	درجه	۵

برای بررسی شیب درزه، مدل‌هایی با درزه‌هایی با شیب صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه با فاصله‌داری‌های مختلف شامل ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌متر ساخته شده است. در جدول (۷-۷) میانگین نیروی عمودی و غلتشی به‌دست آمده برای هر زاویه با فاصله‌داری‌های مختلف ذکر شده است.

جدول ۷-۷: مقدار نیروی عمودی در زاویه درزه با فاصله‌داری‌های مختلف (بر حسب کیلونیوتن)

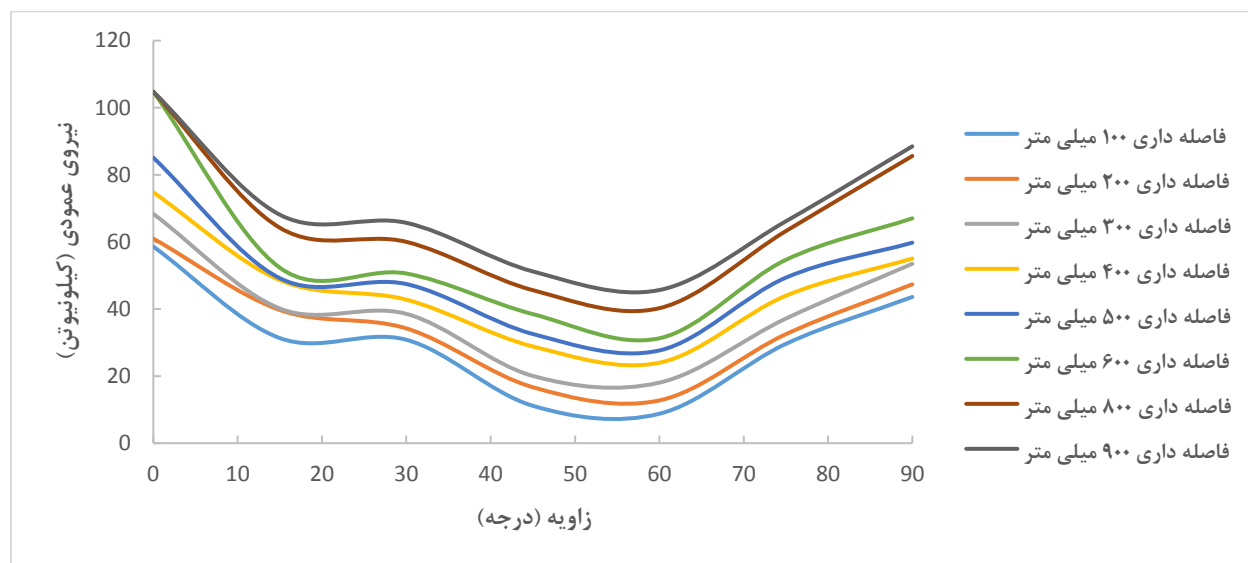
فاصله‌داری درزه (میلی‌متر)	زاویه درزه (درجه)						
	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰
۱۰۰	۵۸/۶۰	۳۱/۳۳	۳۰/۸۳	۱۱/۱۴	۸/۷۸	۲۹/۶۰	۴۳/۶۰
۲۰۰	۶۱/۰۰	۳۹/۷۱	۳۴/۲۲	۱۶/۶۹	۱۲/۷۵	۳۲/۴۹	۴۷/۳۶
۳۰۰	۶۸/۳۶	۴۰/۱۴	۳۸/۵۶	۲۰/۰۵	۱۸/۰۵	۳۷/۱۴	۵۳/۴۷
۴۰۰	۷۴/۷۷	۴۸/۶۰	۴۲/۷۹	۲۸/۸۵	۲۳/۹۹	۴۳/۹۵	۵۵/۰۵
۵۰۰	۸۵/۱۲	۴۹/۱۸	۴۷/۴۴	۳۲/۵۵	۲۷/۶۵	۴۹/۳۵	۵۹/۷۷
۶۰۰	۱۰۴/۷۶	۵۲/۳۱	۵۰/۵۸	۳۸/۴۸	۳۱/۲۷	۵۴/۶۵	۶۷/۰۳
۷۰۰	۱۰۴/۷۶	۵۹/۹۴	۵۶/۵۸	۴۲/۹۳	۳۶/۶۶	۵۹/۶۶	۷۷/۴۲
۸۰۰	۱۰۴/۷۶	۶۴/۲۲	۶۰/۰۲	۴۵/۶۲	۴۰/۲۵	۶۳/۲۳	۸۵/۶۲
۹۰۰	۱۰۴/۷۶	۶۸/۱۰	۶۵/۶۹	۵۱/۲۱	۴۵/۶۶	۶۶/۱۵	۸۸/۵۰

جدول ۷- ۸: مقدار نیروی غلتشی در زاویه درزه با فاصله‌داری‌های مختلف (بر حسب کیلو نیوتن)

فاصله‌داری درزه (میلی متر)	زاویه درزه (درجه)						
	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰
۱۰۰	۴/۷۱	۳/۰۳	۲/۷۳	۲/۳۴	۱/۷۲	۲/۹۰	۳/۴۸
۲۰۰	۵/۴۹	۳/۶۶	۳/۱۹	۳/۰۰	۲/۷۵	۳/۴۵	۴/۰۶
۳۰۰	۶/۰۲	۴/۲۷	۳/۹۵	۳/۴۰	۳/۵۲	۳/۹۹	۴/۶۹
۴۰۰	۶/۸۹	۴/۸۸	۴/۴۰	۳/۷۴	۳/۵۹	۴/۷۸	۵/۰۳
۵۰۰	۷/۳۸	۵/۳۶	۴/۶۴	۴/۱۳	۳/۹۴	۵/۴۵	۵/۹۶
۶۰۰	۷/۵۰	۵/۹۲	۴/۹۴	۴/۶۱	۴/۳۲	۵/۹۹	۵/۳۸
۷۰۰	۷/۵۰	۶/۲۳	۵/۴۱	۵/۰۵	۴/۹۳	۶/۴۶	۶/۷۰
۸۰۰	۷/۵۰	۶/۵۱	۵/۹۴	۵/۴۸	۵/۱۳	۶/۸۵	۷/۰۹
۹۰۰	۷/۵۰	۶/۹۸	۶/۵۵	۵/۱۷	۵/۸۵	۷/۱۶	۷/۳۹

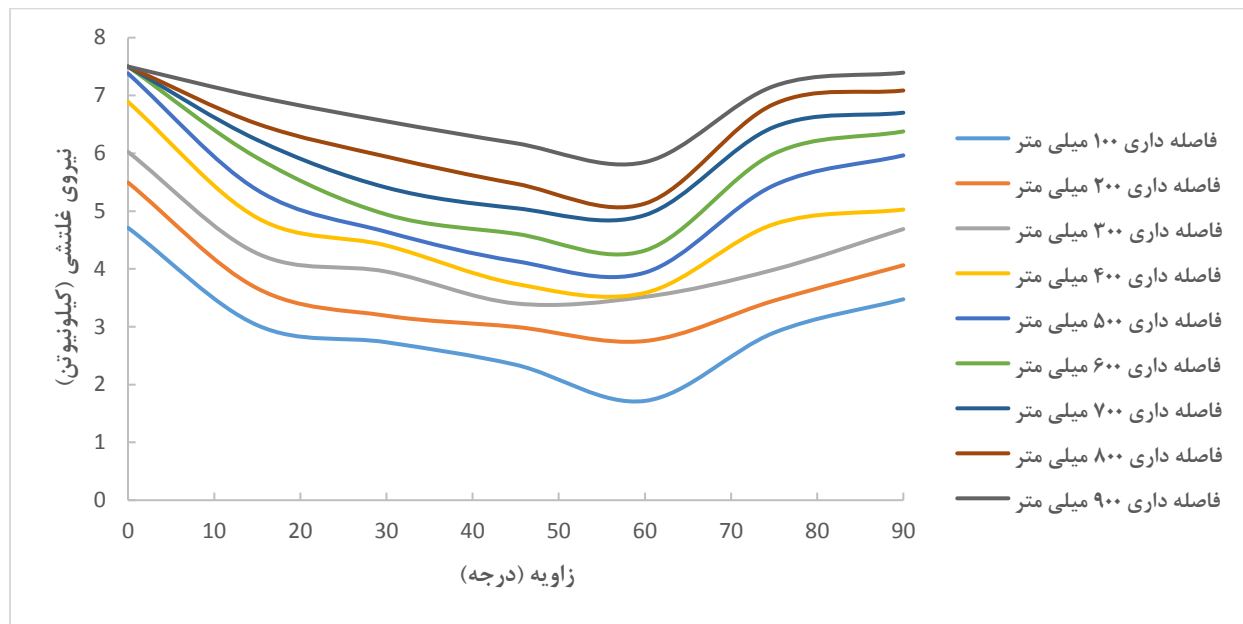
۷-۴-۱- بررسی تأثیر شیب درزه بر نیروی عمودی و غلتشی

برای بررسی تأثیر شیب درزه بر نیروی عمودی و غلتشی برای هر زاویه درزه با فاصله‌داری مختلف، یک مدل ساخته شده است. بعد از حل مدل‌ها، از نیروهای عمودی و غلتشی به دست آمده میانگین‌گیری شده است. برای بررسی تغییرات نیروی عمودی بر اثر تغییر زاویه درزه، نمودار تغییرات برای هر کدام از فاصله‌داری‌ها رسم شده است (شکل (۷-۸)).



شکل ۷-۸: تغییرات زاویه درزه با تغییر نیروی عمودی در فاصله‌داری‌های مختلف

همانطور که در شکل (۷-۸) ملاحظه می‌شود با تغییر زاویه از صفر تا ۵۵ درجه، نیروی عمودی کاهش و از ۵۵ تا ۹۰ درجه نیروی عمودی افزایش می‌یابد. در بازه حدوداً ۴۰ تا ۶۵ درجه کمترین مقدار نیروی‌های عمودی وجود دارد. این موضوع بیانگر این است که در این محدوده بیشترین نرخ نفوذ وجود دارد. همچنین در شکل (۷-۹) تغییرات نیروی غلتشی با تغییر زاویه درزه نشان داده شده است.

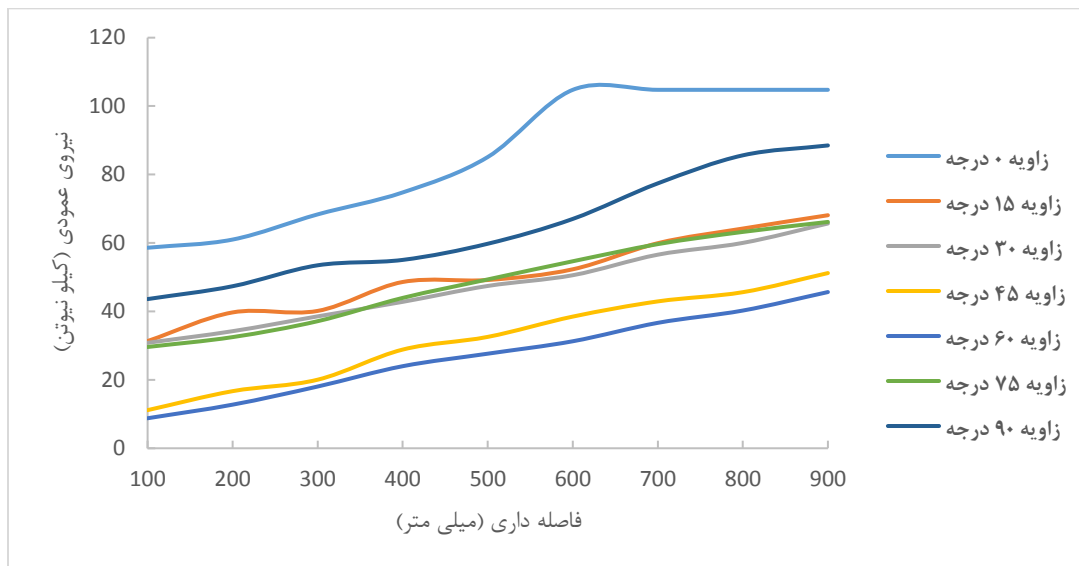


شکل ۷-۹: تغییرات زاویه درزه با تغییر نیروی غلتشی در فاصله‌داری‌های مختلف

با توجه به شکل (۷-۹)، از زاویه صفر تا حدود ۶۰ درجه نیروی غلتشی کاهش و از ۶۰ تا ۹۰ درجه نیروی غلتشی افزایشی می‌باشد. در زاویه ۶۰ درجه کمترین نیروی غلتشی وجود دارد.

۷-۴-۲- بررسی تأثیر فاصله‌داری درزه بر نیروی عمودی و غلتشی

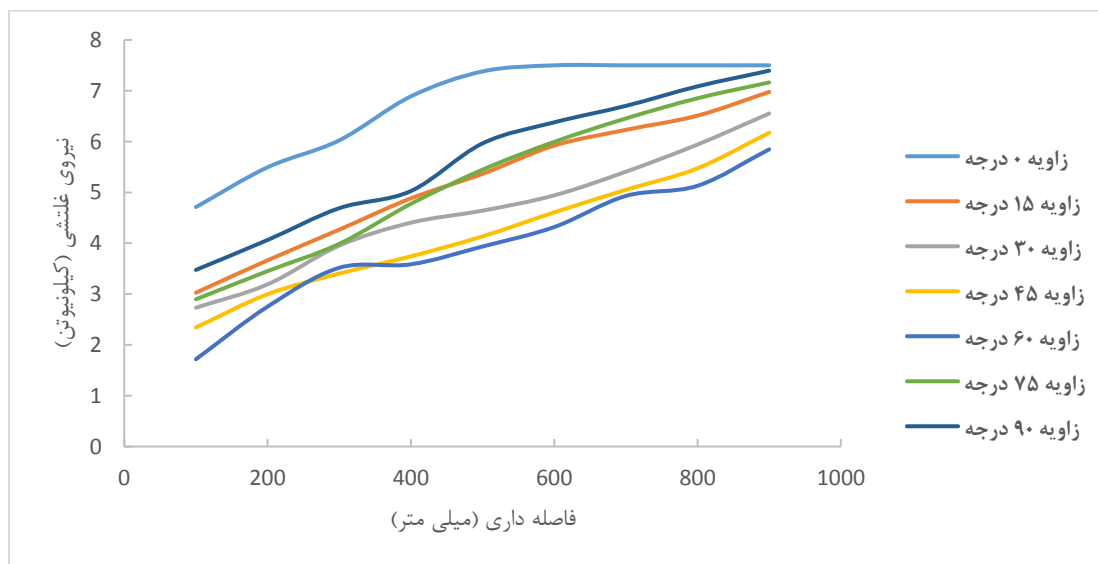
برای بررسی تأثیر فاصله‌داری درزه بر نیروی عمودی و غلتشی پس از میانگین‌گیری از مقدار نیروی عمودی و غلتشی برای هر زاویه با فاصله‌داری مشخص، به رسم نمودار تغییرات نیروی عمودی و غلتشی نسبت به تغییر فاصله‌داری اقدام شده است (شکل (۷-۱۰)).



شکل ۷-۱۰: تغییر نیروی عمودی با تغییر فاصله‌داری درزه در زاویه‌های مختلف درزه

در شکل (۷-۱۰) ملاحظه می‌شود که با افزایش فاصله‌داری درزه، نیروی عمودی نیز افزایش می‌یابد. همچنین در

شکل (۷-۱۱) تغییرات نیروی غلتشی با تغییر فاصله‌داری درزه نشان داده شده است.



شکل ۷-۱۱: تغییر نیروی غلتشی با تغییر فاصله‌داری درزه در زاویه‌های مختلف درزه

بر اساس تغییرات نیروی غلتشی با توجه به تغییر فاصله‌داری درزه، با افزایش فاصله‌داری، نیروی غلتشی نیز افزایش می‌یابد.

۷-۵- جمع بندی

در این فصل به بررسی تأثیر دو مشخصه درزه (زاویه و فاصله‌داری درزه) بر حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار با استفاده از مدلسازی عددی پرداخته شد. برای این منظور در مرحله اول سنگ بکر مدل و به مقایسه میانگین تغییرات نیروی عمودی و غلتشی حاصل از مدل با نتایج به‌دست آمده در آزمایش برش خطی و همچنین مدل تئوری CSM پرداخته شده است. آنچه که در این مقایسه مشهود است، وجود اختلاف کمتر بین نتایج حاصل از مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی نسبت به مدل تئوری CSM می‌باشد. در ادامه درزه‌هایی با شیب‌های صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ و فاصله‌داری‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌متر در مدل لحاظ گردیده است. نتایج بیانگر این است که در درزه با زاویه حدود ۴۰ تا ۶۵ درجه، نیروی عمودی و غلتشی کاهش لذا انتظار افزایش حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار وجود دارد. در صورتی که در زاویه حدود ۴۰ تا ۶۵ درجه علاوه بر تأثیر زاویه، تأثیر فاصله‌داری را نیز مدنظر قرار دهیم مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله‌داری نیروی عمودی و غلتشی افزایش لذا حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار کاهش می‌یابد.

فصل هشتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه گیری:

یکی از تحولات بزرگ در تونلسازی، ابداع ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل می‌باشد که با توسعه مهندسی تونل، استفاده از این ماشین‌ها به علت مزایای زیاد همچون راندمان بالا، امنیت بالا و اختلالات کم در محیط پیرامونی، در حال گسترش می‌باشد. از موضوعات مهم در استفاده از این ماشین‌ها، پیش‌بینی عملکرد آنها به منظور تحقق اهداف استاندارد مدیریت پروژه در یک پروژه تونلسازی است. از شاخص حفریذیری توده‌سنگ می‌توان در پیش‌بینی عملکرد این ماشین‌ها استفاده کرد. بررسی تجربی تأثیر سه مشخصه درزه شامل تداوم، فاصله‌داری و زاویه صفحه درزه در حفریذیری توده‌سنگ‌های درزه‌دار نشان دهنده:

- تداوم درزه با حفریذیری ارتباط مستقیم دارد.

- زاویه صفحه درزه و فاصله‌داری هر کدام به‌تنهایی تأثیر متفاوتی را بر حفریذیری دارند و رفتار یکسانی برای تغییر حفریذیری در برابر تغییر هر عامل نمی‌توان تعریف کرد. این موضوع لزوم بررسی تأثیر هم زمان زاویه و فاصله‌داری درزه را در حفریذیری توده‌سنگ درزه‌دار بیان می‌کند.

- تأثیر ضریب خردشدگی کل به عنوان عاملی که تأثیر توأمان فاصله‌داری و زاویه درزه را پوشش می‌دهد بر شاخص حفریذیری بیشتر از نرخ نفوذ می‌باشد. با توجه به ارتباط بین ضریب خردشدگی کل و تعداد درزه در واحد حجم سنگ (J_v)، با افزایش J_v و K_s ضریب خردشدگی کل، شاخص حفریذیری نیز افزایش می‌یابد. بر اساس ضریب خردشدگی کل، شاخص حفریذیری نیز به سه رده، حفریذیری پایین، حفریذیری متوسط و حفریذیری بالا تقسیم می‌شود.

با توجه به ارتباط بین شاخص‌های حاصل از آزمایش نفوذ پانچ با شکست سنگ، این آزمایش به عنوان مبنایی به منظور ارائه مدلی جدید برای پیش‌بینی حفریذیری توده‌سنگ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی در

تونل انتقال آب کرمان بیانگر وجود رابطه با ضریب همبستگی $0/68$ بین نسبت نیرو به جابجایی با شاخص حفرپذیری می‌باشد. شاخص شکست سنگ حاصل از آزمایش نفوذ با عامل‌های اصلی سنگ بکر (مقاوت فشاری تک محوری و مقاومت کششی) رابطه بسیار قوی‌تری نسبت به عامل‌های اصلی درزه‌داری توده سنگ (فاصله‌داری و زاویه درزه) دارد. این موضوع بیانگر این است که شاخص شکست حاصل از آزمایش انعکاس دهنده خصوصیات سنگ بکر می‌باشد. لذا برای استفاده از این شاخص برای توده سنگ بایستی تأثیر عامل‌های اصلی درزه‌داری (فاصله‌داری و زاویه درزه) در این شاخص لحاظ گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شاخص شکست با ضریب خردشدگی کل به عنوان عاملی که تأثیر تلفیقی زاویه و فاصله‌داری درزه در آن لحاظ شده است، دارای ضریب همبستگی $0/67$ می‌باشد. بر این اساس مدلی برای پیش‌بینی حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار ارائه شده که دارای ضریب همبستگی $0/8$ است.

در بررسی تأثیر دو مشخصه هندسی درزه (زاویه و فاصله‌داری درزه) بر حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار با استفاده از مدلسازی عددی نتایج بیانگر این است که در درزه با زاویه حدود 40 تا 65 درجه نیروی عمودی و غلتشی کاهش یافته لذا انتظار افزایش حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار وجود دارد. در صورتی که در زاویه حدود 40 تا 65 درجه علاوه بر تأثیر زاویه، تأثیر فاصله‌داری را نیز مدنظر قرار دهیم مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله‌داری نیروی عمودی و غلتشی افزایش یافته لذا حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار کاهش می‌یابد.

پیشنهادهای:

برای بررسی تأثیر مشخصات هندسی درزه در حفریذیری توده سنگ درزه دار در حفاری با ماشین های حفاری تمام مقطع تونل پیشنهاد می گردد:

➤ بانک جامعی از سه مشخصه هندسی درزه شامل تداوم، فاصله داری و زاویه صفحه درزه در پروژه های مختلف تونلسازی تشکیل و با استفاده از تحلیل های آماری یک ضریب تلفیقی از این سه عامل تعریف و ارتباط آن با حفریذیری توده سنگ مورد بررسی قرار بگیرد.

➤ در پروژه های که امکان تهیه نمونه سنگ در مقاطع مختلف و همچنین امکان ثبت داده های حفاری توسط سیستم ثبت داده وجود دارد، نسبت به بررسی ارتباط بین نیرو و نفوذ نسبت در آزمایشگاه و در حفاری پرداخته شود.

➤ در یک پروژه حفاری مکانیزه در مقاطع مختلف زمین شناسی، آزمایش نفوذ پانچ انجام سپس با استفاده از روش های مدلسازی عددی، آزمایش نفوذ پانچ را مدلسازی کرده و نتایج حاصل از مدلسازی با نتایج آزمایش مقایسه شود. در ادامه درزه به مدل اضافه نموده و به بررسی ارتباط بین نتایج حاصله با داده های حفاری مکانیزه پرداخته شود.

➤ با توجه به اینکه مقطع دیسک در نرخ نفوذ دیسک تأثیر دارد لذا سایش دیسک هم در نرخ نفوذ آن تأثیر دارد. پیشنهاد می شود ارتباط بین سایش و نرخ نفوذ دیسک با استفاده از روش های مدلسازی عددی بررسی شود.

➤ پیشنهاد می شود تأثیر مشخصات هندسی درزه در سایش و نرخ نفوذ توأم با هم بررسی و بر این اساس رده بندی برای پیش بینی نرخ نفوذ و سایش دیسک با توجه به زاویه و فاصله داری درزه ارائه گردد.

مراجع

فرجی تسوجی ر، خادمی حمیدی ج، بصیری م، افتخاری ع (۱۳۹۵) " شبیه سازی عددی برش سنگ با تیغه دیسکی TBM در آزمون برش خطی " نشریهی مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی، شماره ۲، دوره ۵.

محمدی ر، خادمی حمیدی ج، صمیمی نمین ف (۱۳۹۶) " تعیین نیروها و انرژی ویژه برش سنگ با شبیه سازی عددی عملکرد تیغه دیسکی در ماشین تونلزنی تمام مقطع " نشریه علمی-پژوهشی مکانیک سنگ، دوره ۱، شماره ۳، صفحه ۵۵ تا ۶۶.

گزارش زمین شناسی مهندسی تونل انتقال آب کرمان، (۱۳۹۵)، مؤسسه مهندسين مشاور ساحل، چاپ نشده

گزارش زمین شناسی مهندسی تونل انتقال آب نوسود (قطعه دوم)، (۱۳۸۸)، مؤسسه مهندسين ايمن سازان، چاپ نشده

Azarafza M, Akgun Ebrahim H, Kaljahi A. (2018) "Stochastic geometry model of rock mass fracture network in tunnels" Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 51(3):379-386 . DOI: 10.1144/qjgegh2017-136

Barton N. (2000) "TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock" Balkema, Rotterdam.

Baek SH, Moon HK. (2003) "A numerical study on the rock fragmentation by TBM cutter penetration" Tunn Undergr Space (J Korean Soc Rock Mech) 13(6):444-454

Bejari H, Khademi J. (2013) "Simultaneous Effects of Joint Spacing and Orientation on TBM Cutting Efficiency in Jointed Rock Masses" Rock Mech Rock Eng; 46, 897-907. DOI: 10.1007/s00603-012-0314-2

Bilgin N, Copur H, Balci C. (2016) "TBM Excavation in Difficult Ground Conditions" Istanbul Technical University, Faculty of Mines, Mining Engineering Department Wilhelm Ernst & Sohn. DOI:10.1002/9783433607190.

Bieniawski Z T, Celada B, Galera JM, Alvarez M. (2006) "Rock masse excavability indicator: new way to selecting the optimum tunnel construction method" Tunn. Undergr. Space Technol. 21 (3-4), 237, DOI: 10.1016/j.tust.2005.12.016

Bieniawski Z, Celada B, Galera J. (2007) "TBM excavability: prediction and machine-rock interaction" RETC, Toronto, pp 1118

Blindheim O.T. (1979) "Boreability Predictions for Tunneling" Ph.D. Thesis, Department of Geological Engineering, Norwegian Institute of Technology, p. 406.

Bruland A, Dahlo T, Nilsen B. (1995) "Tunneling Performance Estimation Based on Drillability Testing" Proceedings of 8 the International Congress of Rock Mechanics, Sep. 25-30, Tokyo, Japan.

- Cheema S. (1999) “Development of a Rock Mass Boreability Index for the Performance of Tunnel Boring Machines” Doctoral Dissertation, Department of Mining Engineering, Colorado School of Mines, Golden, CO, USA.
- Ciantia M, Hueckel T. (2013) “Weathering of submerged stressed calcarenites” Chemo-mechanical coupling mechanisms; 63: 768–785. DOI: 10.1680/geot. sip13. p.024
- Cui Q, Shen S, Yin Z. (2016) “Protection of neighbour buildings due to construction of shield tunnel in mixed ground with sand over weathered granite” Environmental Earth Sciences, 75: 458. DOI: 10.1007/s12665-016-5300-7
- Curlinger P. (2009) “Multivariate Regression in Behavioral Research” Thomson Learning, ISBN-13: 978-0-03-072831-0.
- Delisio A, Zhao J, Einstein H (2013) Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Lötschberg Base Tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 33, pp. 131-142, DOI: 10.1016/j.tust.2012.06.015
- Entacher M. (2013) “Measurement and interpretation of disc cutting forces in mechanized tunnelling” Technische, Universität München.
- Farrokh E. (2012) “Study of utilization feactor and advance rate of hard rock TBMS” Doctor of Philosophy. Pennsylvania State University.
- Gang L, Lida Z. (2012) “A Method to Predict Disc Cutter Specific Energy for TBM Based on CSM Model” Applied Mechanics and Materials. Vol 236-237, pp 414-417.
- Gong QM, Zhao J, Jiao Y.Y. (2005) “Numerical modelling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters” Tunnel Underground Space Technology, 20(2):183–191. DOI: 10.1016/j.tust.2004.08.006
- Gong QM, Jiao YY, Zhao J. (2006) “Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters” Tunnel Underground Space Technology, 21(1):46–55. DOI: 10.1016/j.tust.2005.06.004
- Gong QM, Jiao Y.Y, Zhao J. (2007) “In situ TBM penetration tests and rock mass boreability analysis in hard rock tunnels” Tunnel Underground Space Technology, 22(32):303–316. DOI: 10.1016/j.tust.2006.07.003
- Gong QM, Zhao J. (2009) “Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 46(1):8–18. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.03.003

- Gong Q, He G, Zhao X, Ma H, Li X, Zhang H, Miao C. (2015) "Influence of different cutter spacings on rock fragmentation efficiency of Beishan granite by TBM" Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 37(1): 53-60. <https://doi.org/10.11779/CJGE201501005>
- Hamilton W, Dollinger G. (1979) "tunnel boring machine and cutter design for greater boreability" RETC Proc Atlanta 1:280–296.
- Hai Xu, Jian Z, Panagiotis G, Danial Jahed A, Mahmood T. (2019) "Supervised Machine Learning Techniques to the Prediction of Tunnel Boring Machine Penetration Rate" Applied Sciences. doi:10.3390/app9183715, DOI: 10.3390/app9183715
- Hassanpour J. (2010) "Analysis of actual TBM performance in Ghomrood project" Bulletin of Iranian Tunneling Association, No. 9, (article in Persian).
- Hassanpour J, Rostami J, Zhao J. (2011) "A new hard rock TBM performance prediction model for project planning" Tunnelling and Underground Space Technology, No. 26, pp. 595–603, DOI: 10.1016/j.tust.2011.04.004
- Houngyuan Q, Jiao Y. (2006) "Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters" Tunneling and Underground Space Technology, Vol 21, No 1, pp 46–55. DOI: 10.1016/j.tust.2005.06.004
- Houngyuan L. (2004) "Numerical modelling of the rock fragmentation process by mechanical tools" Doctor of Philosophy thesis. Sweden: University of technology Lulea.
- Hongsu M.A. (2013) "Experimental Study on the Effect of Joint Spacing on Fragmentation Modes and Penetration Rate under TBM Disc Cutters" Applied Mechanics and Materials Vols; 353-356: pp 890-894. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.890>
- Huiyun Li1, and Erxia Du. (2016). Simulation of rock fragmentation induced by a tunnel boring machine disk cutter. Advances in Mechanical Engineering, Vol. 8(6) 1–11. DOI: 10.1177/1687814016651557.
- IBM SPSS Statistics V25.0 documentation, 2019. <https://www.ibm.com>
- Innaurato N, Oggeri C, Oreste P.P. (2001) "Performance and modelling of indenters and Cutting tools for the assessment of the boreability in rock tunnelling" Eurock Symposium Rock Mechanics Sarkka, p. 573–8.
- Innaurato N, Oggeri C, Oreste P.P, Vinai R. (2007) "Experimental and numerical studies on rock breaking with TBM tools under high stress confinement" Rock Mechanics and Rock Engineering 40(5):429–451. DOI: 10.1007/s00603-006-0109-4.

- Jeong H, Cho J, Jeon S, Rostami J. (2015) “Performance Assessment of Hard Rock TBM and Rock Boreability Using Punch Penetration Test” *Rock Mech Rock Eng.* 10,1007015-0834-7.
- Jie Liu. (2018) “The influence of bedding plane orientation on rock breakages in biaxial States” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 95. 186–193. DOI: 10.1016/j.tafmec.2018.03.005.
- Khademi J, Shahriar K, Rezai B, Rostami J. (2010) “Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system” *Tunnelling and Underground Space Technology*, No. 25, pp. 333–345, DOI: 10.1016/j.tust.2010.01.008
- Karami M, Zare Sh, Rostami J. (2020) “Tracking of disc cutter wear in TBM tunneling: a case study of Kerman water conveyance tunnel” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01931-7>
- Liu HY, Kou SQ, Lindqvist CA, Tang CA. (2002) “Numerical simulation of the rock Fragmentation process induced by indenters” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39:491–505. DOI: 10.1016/s1365-1609(02)00043-6
- Lin Qi. (2018) “Experimental study on acoustic emission characteristics of jointed rock mass by double disc cutter” *Journal Central South University*, 25: 357–367. DOI: 10.1007/s11771-018-3742-7
- Li H.Y, Shi G.Y. (2012) “The Numerical Simulations of Forces Acting on TBM Disc Cutters with the Consideration of Confining Pressure and Damage in Rocks” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 105-107, PP. 1170-1174.
- Li H, Shi G. (2011) “The Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two-disc cutter” *Advanced material research*, Vol 366, PP 224-228. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.366.224>
- Macias F. (2016) “Hard Rock Tunnel Boring Performance Predictions and Cutter Life Assessments” Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Norwegian University of Science and Technology.
- Maleki MR. (2018) “Rock Joint Rate (RJR); a new method for performance prediction of tunnel boring machines (TBMs) in hard rocks” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73, 261-286. DOI: 10.1016/j.tust.2017.12.022
- Mabra C. (2012) “Development of the Discrete Element Method for Excavation Processes” *International Center for Numerical Methods in Engineering Gran Capitán. Barcelona, Spain.*

- Medel-Morales R.C, Botello-Rionda S. (2013) “Design and Optimization of Tunnel Boring Machines by Simulating the Cutting Rock Process using the Discrete Element Method” *Computación Sistema*, vol. 17, PP. 329-339.
- Mohammadi Reza. (2015) “Numerical modeling of rock cutting in TBM tunneling” Master's Thesis, Faculty of Mine Engineering, University of Zanjan, Iran.
- Nelson PP, Ingraffea AR, O'Rourke TD. (1985) “TBM performance prediction using rock fracture parameters” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 22(3):189–192. DOI: 10.1016/0148-9062(85)93234-6
- Ning Bo, YiMin Xia, Laikuang Lin, Xuhui Zhang, YuanFu He, Yifan Liu. (2020). Experimental study on the adaptability of cutters with different blade widths under hard rock and extremely hard rock conditions, *Acta Geotechnica*, <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00958-0>
- Okubo S, Fukuim K, Chen W. (2010) “Size and shape of TBM debris estimated by the nishimatsu's cutting resistance equation” *Open Civil Engineering*: 4, pp. 88-95, <http://dx.doi.org/10.2174/1874149501004010088>.
- Ozdemir L. (1977) “Development of Theoretical equations for predicting Tunnel boreability” PhD, Thesis, T-1969, Colorado school of mines, Golden Co.,1977.
- Paltrinieri E. (2015) “Analysis of TBM tunnelling performance in faulted and highly fractured rocks” Doctor of Philosophy thesis, Ecole Polytechnique Federale DE LAUSANNE.
- Prasnna J. (2014) “Evaluation of engineering geological and geotechnical properties for the performance of a tunnel boring machine in deccan rap rocks- A case study from Mumbai, India” Thesis of Doctor of Philosophy, Indian Institute of Technology Bombay, India;
- Ping C, Qibin L, Kaihui L, Dongya H. (2017) “Effects of joint angle and joint space on rock fragmentation efficiency by two TBM disc cutters” *Journal of Central South University (Science and Technology)*, DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.05.023.
- Poisel R, Tentschert E, Preh A, Osteemann V, Chwatal W, Zettler A. (2010) “The interaction of machine and rock mass analysed using TBM data and rock mass parameters” *Geomechanics and Tunnelling*, 3 (5): 510–519. DOI: 10.1002/geot.201000043
- Prasnna J. (2014) “Evaluation of engineering geological and geotechnical propertice for the performance of a tunnel boring machine in deccan rap rocks- A case study from Mumbai, India” Thesis of Doctor of Philosophy, Indian Institute of Technology Bombay, India.

- Qiuming G, Yuyong J. (2005) "Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters" *Tunneling and Underground Space Technology*, 183–191. DOI: 10.1016/j.tust.2004.08.006
- Qing T. (2017) "Numerical Analysis on Rock Breaking by Disc Cutters with Different Joint Characteristics" *The Open Civil Engineering Journal*, 11, 54-69. DOI: 10.2174/1874149501711010054
- Quansheng Liu. (2017) "Investigation of the Rock Fragmentation Process by a Single TBM Cutter Using a Voronoi Element-Based Numerical Manifold Method" *Rock Mechanics and Rock Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1381-1>
- Ramezanzadeh A, Rostami J, Tadic D. (2008) "Impact of Rock Mass Characteristics on Hard Rock Tunnel Boring Machine Performance" 13th Australian Tunneling Conference, Melbourne, VIC, 4 - 7 May.
- Ramezanzadeh A, Rostami J, Tadic D. (2004) "Performance Analysis of Hard Rock Tunnel Boring Machine at KCRC D320 tunnel (Hong Kong)" *Eurock*, 53rd Geomechanics Colloquium.
- Ramezanzadeh A, Rostami J, Richard K. (2005) "Influence of rock mass properties on performance of hard rock TBMS" *Rapid excavation and tunneling conference*, Chapter 56.
- Ramezanzadeh A, Rostami J, Tadic D. (2008) "Impact of Rock Mass Characteristics on Hard Rock Tunnel Boring Machine Performance" 13th Australian Tunneling Conference, Melbourne, VIC, 4 - 7 May.
- Rinne M. (2008) "Fracture mechanics and subcritical crackgrowth approach to model time-dependent failure brittle rock" Doctor of Philosophy. Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology.
- Rostami J, Ozdemir L, Nilsen B. (1996) "Methods for predicting mechanical excavation performance and costs" *Proceedings of annual technical meeting of the institute of shaft drilling technology*, Las Vegas, 1–3 May.
- Rostami J. (1997) "Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modelling and physical measurement of crushed zone pressure" PhD Thesis. Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
- Rostami J. (2013) "Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 57, 172-186.

- Rojek J, Labra C, Oñate E. (2010) “Discrete Element Simulation of Rock Cutting Processes” Modern Building Materials, Structures and Techniques - The 10th International Conference.
- Salimi A, Rostami J. (2016) “Application of non-linear regression analysis and artificial intelligence algorithms for performance prediction of hard rock TBMs” Tunneling and Underground Space Technology, 236–246. DOI: 10.1016/j.tust.2016.05.009
- Salimi A, Moormann C, Singh T, Jain P. (2015) “TBM performance prediction in rock tunneling using various artificial intelligence algorithms” 11th Iranian and 2nd Regional Tunnelling Conference "Tunnels and the Future".
- Sahir Butt, and Günther Meschke. (2017) “A 3D peridynamic model of rock cutting with TBM disc cutters” Proceedings of the 7th GACM Colloquium on Computational MechanicsAt: Stuttgart, Germany.
- Seun L, sung h. (2009) “Numerical Analysis on Fragmentation Mechanism by Indentation of Disc Cutter in a Rock Specimen with a Single Joint” Tunneling and Underground Space Technology, Vol 19, No 5, pp 440-449.
- Shen S, Wang Z, Cheng W. (2017) “Estimation of lateral displacement induced by jet grouting in clayey soils” Geotechnique, ICE, 67, 621–630. DOI: 10.1680/jgeot.16. p.159
- Sharifzadeh M, Iranzadeh A. (2009) “Three dimensional numerical modelling of joint spacing and orientation effects on rock cutting process by a single TBM” Published in Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Magazine, Vol 4, No 6. <https://orcid.org/0000-0002-8139-1079>
- Sungong C, Seungong L. (2015) “Numerical Study to Estimate the Cutting Power on a Disc Cutter in Jointed Rock Mass” KSCE Journal of Civil Engineering.
- Tentschert E, Poisel R, Zettler A. (2005) “Gefügeeinfluss auf TBM-Vortriebe” Felsbau Magazin, 23, (5): 42–47.
- Thuro K. (2002) “Geologisch-felsmechanische Grundlagen der Gebirgslösung im Tunnelbau” Münchner Geologische Hefte - Reihe B: Angewandte Geologie, 18, 160 pp.
- Wilfing L. (2016) “The Influence of Geotechnical Parameters on Penetration Prediction in TBM Tunneling in Hard Rock” Technische Universität MÜNCHEN.
- Xia Y, Guo B, Cong G, Zhang X, Zeng G. (2017) “Numerical simulation of rock fragmentation induced by a single TBM disc cutter close to a side free surface” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 91:40-8.

- Yagiz S. (2008) “Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition” Tunnel Underground Space Technology, 23(3):326–399. DOI: 10.1016/j.tust.2007.04.011
- Yagiz S. (2002) “Development of rock fracture and brittleness indices to Quantify the effects of rock mass features and toughness on the CSM model basic penetration for hardrock tunnel machines” Thesis Doctor of Philosophy. Colorado School of Mine.
- Yagiz S. (2017) “New equations for predicting the field penetration index of tunnel boring machines in fractured rock mass” Arab Journal of Geosciences, 10:33. DOI 10.1007/s12517-016-2811-1
- Yagiz S. (2015) “The Punch Penetration Test for Estimating Machine Performance” International Conference and Exhibition. Istanbul. Paper 41.
- Yagiz S, Yazitova A. (2019) “Using Intact Rock Brittleness for Assessing TBM Penetration” Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19) Rome, Italy – April, 2019 Paper No. ICGRE 122 DOI: 10.11159/icgre19.122
- Yin LJ, Gong QM, Zhao J. (2014) “Study on rock mass boreability by TBM penetration test under different in situ stress conditions” Tunnelling and Underground Space Technology, 43: 413-425.
- Yucong Pan, Quansheng Liu¹, Qi Liu, Jianping Liu, Xingxin Peng, Xing Huang, Mingbao Wei. (2019) “Full-scale linear cutting tests to check and modify a widely used semitheoretical model for disc cutter cutting force prediction” Acta Geotechnica. [https://doi.org/10.1007/s11440-019-00852-4\(0123456789\(\),-volV\)\(0123456789,-\(\).volV\)](https://doi.org/10.1007/s11440-019-00852-4(0123456789(),-volV)(0123456789,-().volV)).
- Zare Naghadehi M, Ramezanzadeh A. (2016) “Models for estimation of TBM performance in granitic and mica gneiss hard rocks in a hydropower tunnel” Bulletin of Engineering Geology and the Environment. DOI:10.1007/s10064-016-0950-y
- Zhou X, Jianping J, Zhan V, Song Sh, Cao, Ch. (2019) “Identification of structural domains considering the combined effect of multiple joint characteristics” Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 52, 375-385, DOI:10.1144/qjegh2018-091
- Zhiqiang Zhang¹, Kangjian Zhang · Weijie Dong · Biao Zhang. (2020) “Study of Rock-Cutting Process by Disc Cutters in Mixed Ground based on Three-dimensional Particle Flow Model” Rock Mechanics and Rock Engineering <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02118-y>
- Zou F, Zhou C. (2012) “Experimental study of influence of joint space and joint angle on rock fragmentation by TBM disc cutter” Rock and Soil Mechanics, 1640–1646.

Abstract

The rock mass boreability index is an important parameter that reflects the interaction between the rock mass and the cutting tool so it is related to the penetration rate of Tunnel Boring Machine (TBM) and the factors affecting the penetration rate, boreability is also effective. The angle and orientation of the joint plane are two factors which affect the boreability index of the jointed rock mass when using a TBM. This study aims to effects of Joint Orientation and Spacing on the boreability index and present a new model and classification system for predict the FPI focusing on field studies. In this regard, a database of four water conveyance projects, Queens conveyance Tunnel in USA, Kerman conveyance Tunnel in Iran, zagros conveyance (lot 2) in Iran and Maroshi-Vakola conveyance Tunnel in India was provided. At first in Kerman Tunnel, for this purpose, the joint parameters (orientation, spacing, persistence) affecting the boreability have initially been investigated. Then, the total fracturing factors (Bruland) and Persistence classification were used to investigate the effects of all three parameters on the boreability. The results showed that the boreability is also increased by increasing the joint persistency. Besides, the effect of fracturing factor on boreability increases by increasing the joint persistency. In this paper, a new parameter called "Rock Joint Index"(RJI) is also presented according to the analysis performed on the database. The boreability value estimated based on the RJI shows a good agreement with the actual penetration rates. In the continue, investigation the combined effects of the Joint Orientation and Spacing on the boreability in database. The results showed that the increase in total fracturing factor will result in higher boreability. A model was developed for predicting the boreability of the jointed rock mass based on the total fracturing factor and the convergence coefficient of this model was 0.7. The volumetric joint count classification system was also developed to analyze the relationship between the total fracturing factor and the volumetric joint count. In order to predict the boreability of the jointed rock mass in Zagros tunnel in Iran the boreability was classified in three catagories. The result showed a good agreement between the predicted and actual boreability of the jointed rock mass . In this study, presented a new model for perdicachion od boreability the bases of punch penetration test. Tis model is with a convergence coefficient of 0.68. To verify the new index, a PPT was performed on a number of other samples from different sections of the tunnel and the new index was compared with the PSI index (presented by Mr. Yagiz) and the PLI index (presented by Mr. Jing). The results show that the correlation coefficient of the new index with actual boreability index is higher in comparison with the other two indexes. The effect of two geometric properties of joints on boreability using numerical modeling using ABAQUS 6-14software has also been investigated. Then joints with angle and spacing defrent are considered in the model. Is. The results indicate that in the joint with an angle between 40 to 65 degrees, the vertical and rolling force is reduced, so it is expected to increase the porosity of the joint. If in the angle between 40 to 65 degrees, in addition to the effect of angle, we also consider the effect of spacing, it is observed that with increasing spacing, vertical and rolling force increases.

Keywords: Tunnel Boring Machine, Boreabiliy index, Joint Orientation, Joint Spacing



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Rock Mechanic.

Development of borability index in jointed rock mass in excavation by tunnel boring machine

By: Morteza Khosravi

Supervisor:
Dr. Ahmad Ramezanzadeh

Dr. Sokrollah Zare

February, 2021