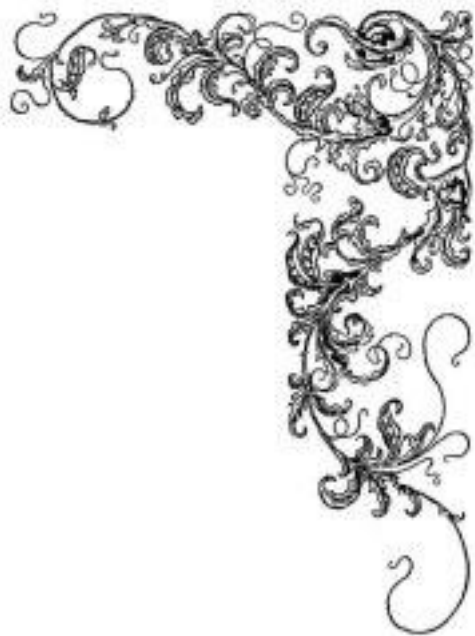


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
مَنْ كَانَ فِي حَرْبٍ مَعَهُ نِسَاءٌ
وَأَوْلَادٌ فَليُقِرِّمْهُنَّ
مِمَّا مَلَكَتْ أَيْمَانُهُ
فَإِذَا حَرَّبْتُمْ إِلَى
بِلَادِكُمْ فَتُحَارَبْ عَلَيْكُمْ
فَإِذَا حَرَّبْتُمْ إِلَى بِلَادِكُمْ
فَتُحَارَبْ عَلَيْكُمْ





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارائه مدلی جدید برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در سنگ

سخت

محمدحسین ارباب سیر

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطائی

دکتر کورش شهریار

اساتید مشاور:

دکتر شکرالله زارع

مهندس مسعود بیاتی

تابستان ۹۲

تقدیم به

پدر، مادر و عموی عزیزتر از جانم که در تمام مراحل زندگی ام دعاها و راهنمایی‌هایشان همراهم بوده است.

تشکر و قدردانی:

حال که توفیق ختم این پایان نامه را یافتیم، خدا را سپاسگزارم که در تمام مراحل زندگی همواره استعانت از او چراغ راه و گرمابخش دل من بوده است.

از اساتید ارجمندم آقایان دکتر محمد عطایی و دکتر کورش شهریار نهایت سپاس و تشکر را دارم. همچنین از زحمات مشاوران آقایان دکتر شکرالله زارع و مهندس مسعود بیاتی تشکر و قدردانی می‌کنم.

همچنین از آقای دکتر ابراهیم فرخ نیز بابت همکاری و زحمات بی‌دریغشان در پیش برد این تحقیق تشکر و قدردانی می‌نمایم.

اساتید و دوستان گران قدر بسیاری مرا در انجام این تحقیق یاری‌رسان بودند که شاید نتوان اسامی تمام آن‌ها در این مختصر گنجانید. با این حال دست تک‌تک آن‌ها را به گرمی می‌فشارم و از خداوند منان برای آنان آرزوی توفیق روزافزون دارم.

تعهد نامه

این جانب محمدحسین ارباب سیر، دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت، ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع «ارائه مدلی جدید برای پیش-بینی نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت» تحت راهنمایی آقایان دکتر محمد عطایی، دکتر کورش شهریار متعهد می‌شوم.

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

تاریخ

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

پیش‌بینی دقیق نرخ نفوذ ماشین حفار در پروژه‌های حفاری در سنگ سخت تأثیر زیادی در تخمین میزان هزینه و مدت زمان اجرای پروژه دارد. تا کنون مدل‌های بسیاری برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین حفار ارائه شده است؛ که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود بوده‌اند. طی بررسی‌های انجام‌شده بهترین مدل به منظور پیش‌بینی نرخ نفوذ، مدل‌های امتیازدهی می‌باشند. در تجربیات گذشته نشان داده شده است که اصلاح شاخص‌های رده‌بندی توده سنگ به تنهایی نمی‌تواند شاخص خوبی به منظور پیش‌بینی نرخ نفوذ باشد. در نتیجه نیاز به معرفی یک شاخص جدید که دربرگیرنده پارامترهای ماشین حفار به همراه شرایط زمین باشند احساس می‌شود. در این تحقیق با استفاده از ابزار تطبیقی جعبه‌ابزار شبکه عصبی نرم‌افزار MATLAB سعی شد پارامترهای موثر بر نرخ نفوذ ماشین حفار تونل با کمترین همپوشانی و بیش‌ترین تأثیر انتخاب شوند؛ این پارامترها عبارت‌اند از سرعت چرخش سر حفار، نیروی پیش‌ران به ازای هر کاتر، امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده، مقاومت کششی؛ همچنین برای وزن دهی به پارامترها با استفاده از نظر متخصصان و به وسیله تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی وزن هر یک از پارامترها به دست آمد تا مدل جدید از وابستگی کمتری به داده‌ها و جامعیت بیشتری برخوردار باشد. با توجه به اهمیت نسبی پارامترهای مورد استفاده مجموع امتیازات، ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین در طبقه‌بندی جدید هر چهار پارامتر به تنهایی طبقه‌بندی و مورد امتیازدهی به صورت غیرخطی قرار گرفتند، در مرحله بعد برای اعتبارسنجی سیستم، امتیازدهی جدید برای برداشت‌های به دست آمده از ۱۸ قطعه با خصوصیات ژئومکانیکی مختلف در پروژه تونل انتقال آب زاگرس اعمال شد. سپس به کمک تحلیل رگرسیونی رابطه ریاضی $y = 0.0621x - 0.8098$ بین امتیاز به دست آمده از مدل جدید با مقادیر واقعی نرخ نفوذ با ضریب تعیین $R^2 = 0.9191$ به دست آمد. در ادامه مقادیر پیش‌بینی‌شده به وسیله مدل جدید با مقادیر پیش‌بینی‌شده به وسیله مدل‌های دیگر و مقادیر واقعی نرخ نفوذ مقایسه و مورد تحلیل قرار گرفتند. مقادیر پیش‌بینی‌شده به وسیله مدل جدید، بیش‌ترین نزدیکی را با مقادیر واقعی نرخ نفوذ نسبت به مدل‌های دیگر بررسی‌شده از خود نشان داد.

کلمات کلیدی: ماشین حفار - نرخ نفوذ - امتیازدهی - مدل جدید - تونل زاگرس

فهرست مطالب

عنوان

شماره صفحه

۱	فصل اول
۱-۱	مقدمه
۲-۱	تعریف مسئله
۳-۱	سابقه انجام تحقیق
۴-۱	ضرورت انجام تحقیق
۵-۱	معرفی تونل انتقال آب زاگرس
۵-۱-۱	زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه
۵-۱-۲	وضعیت آب زیرزمینی
۵-۱-۳	زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل
۵-۱-۳-۱	تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی
۵-۱-۳-۲	تشریح ویژگی‌های توده سنگ‌های مسیر تونل
۵-۱-۴	پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ
۵-۱-۵	طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ‌ها
۵-۱-۶	ماشین حفار مورد استفاده در تونل انتقال آب زاگرس
۶-۱	ساختار پایان‌نامه
۱۶	فصل دوم
۱-۲	مقدمه
۲-۲	دسته‌بندی انواع مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM
۱-۲-۲	مدل‌های ساده
۲-۲-۲	مدل‌های چند پارامتری
۳-۲-۲	مدل‌های احتمالاتی
۴-۲-۲	مدل‌های با کمک رایانه
۵-۲-۲	مدل‌های امتیازدهی
۳-۲	پارامترهای هدف در پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM

۲۷	۱-۳-۲ نفوذ ویژه (SP).....
۲۷	۲-۳-۲ شاخص نفوذ میدانی (FPI).....
۲۷	۳-۳-۲ سرعت ویژه حفاری (SER).....
۲۹	۴-۲ تفاوت ظرفیت‌های اسمی و واقعی.....
۳۰	۵-۲ بررسی مدل‌های موجود پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM.....
۳۴	۱-۵-۲ بررسی مدل‌های با اهمیت بالاتر.....
۳۴	۱-۱-۵-۲ مدل نرو-فازی.....
۳۶	۲-۱-۵-۲ مدل RME.....
۳۹	۱-۲-۱-۵-۲ کاربردهای شاخص RME.....
۳۹	۳-۱-۵-۲ مدل فرخ.....
۴۵	۶-۲ بحث و جمع‌بندی.....
۴۷	فصل سوم.....
۴۸	۱-۳ مقدمه.....
۴۸	۲-۳ شبکه‌ی عصبی.....
۴۹	۱-۲-۳ شبکه‌های چند لایه‌ی پرسپترون.....
۵۱	۳-۲-۳ شبکه عصبی مصنوعی پس انتشار.....
۵۲	۱-۲-۲-۳ الگوریتم آموزش شبکه‌های پس انتشار.....
۵۲	۲-۲-۲-۳ الگوریتم لونبرگ - مارکوارت.....
۵۳	۳-۳ انتخاب پارامترها در مدل جدید.....
۵۸	۴-۳ بحث و نتیجه گیری.....
۶۰	فصل چهارم.....
۶۱	۱-۴ مقدمه.....
۶۲	۲-۴ تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP).....
۶۳	۱-۲-۴ نظرسنجی از متخصصان.....
۶۳	۲-۲-۴ محاسبه اعداد فازی.....
۶۴	۳-۲-۴ تشکیل ماتریس معکوس فازی.....
۶۴	۴-۲-۴ محاسبه وزن فازی نسبی پارامترها.....

۶۵	.....۴-۲-۵ غیر فازی کردن وزن پارامترها.....
۶۵	.....۴-۳ بررسی رابطه هر یک از پارامترها با نرخ نفوذ.....
۶۸	.....۴-۴ نظرسنجی از متخصصان.....
۷۲	.....۴-۵ یافتن وزن پارامترها با استفاده از روش FDAHP.....
۷۴	.....۴-۶ پیشنهاد مدلی جدید برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت.....
۷۹	.....۴-۷ بحث و نتیجه‌گیری.....
۸۰	..... فصل پنجم
۸۱	.....۵-۱ اعتبارسنجی مدل جدید.....
۸۲	.....۵-۲ مقایسه مدل جدید با مدل های دیگر پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM.....
۸۸	.....۵-۳ کاربردهای دیگر مدل جدید.....
۸۹	..... فصل ششم
۹۰	.....۶-۱ نتیجه‌گیری.....
۹۱	.....۶-۲ پیشنهادها.....
۹۲	..... منابع

فهرست اشکال

عنوان	شماره صفحه
شکل ۱-۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به تونل	۵
شکل ۲-۱. پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل	۸
شکل ۳-۱. دسته درزه‌های موجود در واحد LI1	۱۱
شکل ۴-۱. نمایی از واحد شیلی SH-LS3	۱۱
شکل ۱-۲. شاخص سایش سرمته	۲۲
شکل ۲-۲. آزمایش اندازه‌گیری میزان تردی سنگ (S_{20})	۲۲
شکل ۳-۲. آزمایش چال زنی کوچک با سر مته مینیاتوری	۲۳
شکل ۴-۲. نمودارهای تعیین شاخص نرخ حفاری	۲۳
شکل ۵-۲. دستگاه آزمایش اندازه‌گیری سایش (AV)	۲۴
شکل ۶-۲. نمونه‌ای از آزمایش سرشار به منظور به دست آوردن شاخص سایش سرشار (CAI)	۲۵
شکل ۷-۲. ماشین برش خطی (LCM)	۲۵
شکل ۸-۲. رابطه واقعی میان نفوذ به ازای هر چرخش (PR_{ev}) و نیروی عمودی کاتر (F_n) و مقایسه با پارامتر SP	۲۸
شکل ۹-۲. مقایسه نتایج در مدل‌های انتخاب‌شده	۳۳
شکل ۱۰-۲. مثالی از مدل نرو-فازی ارائه‌شده به وسیله	۳۴
شکل ۱۱-۲. مثالی از مدل نرو-فازی با به دست آوردن مقادیر منفی برای PR	۳۵
شکل ۱۲-۲. تغییرات ضریب F_A با طول تونل حفاری شده	۳۸
شکل ۱۳-۲. تغییرات ضریب F_D با قطر تونل	۳۸
شکل ۱۴-۲. روابط ارائه‌شده بین RME و ARA_T در TBM باز	۳۹
شکل ۱۵-۲. رابطه میان انرژی ویژه و RME	۴۰
شکل ۱۶-۲. رابطه میان گشتاور و RME	۴۰
شکل ۱۷-۲. رابطه میان نیروی کاتر و RME	۴۱
شکل ۱۸-۲. رابطه میان مصرف دیسک کاتر و RME با کمک شاخص سرشار در محیط با مقاومت فشاری زیر 45 Mpa	۴۲
شکل ۱۹-۲. نحوه توزیع فراوانی قطرهای مختلف در بانک اطلاعات	۴۳

- شکل ۲-۲۰. رابطه میان قطر تونل با سرعت چرخش سر حفار ۴۳
- شکل ۲-۲۱. رابطه میان قطر تونل با نیروی پیشران ۴۴
- شکل ۳-۱. کارکرد شبکه عصبی مصنوعی ۴۹
- شکل ۳-۲-نمودار عملکرد شبکه در نرم افزار MATLAB ۵۶
- شکل ۳-۳-نمودار هیستوگرام توزیع خطای شبکه در نرم افزار MATLAB ۵۷
- شکل ۳-۴-نمودار رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی در مراحل آموزش، آزمون، اعتبارسنجی، کلیه داده‌ها ۵۸
- شکل ۴-۱. تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی ۶۴
- شکل ۴-۲. بررسی رابطه بین سرعت چرخش سر حفار با نرخ نفوذ ۶۶
- شکل ۴-۳. رابطه نیروی پیشران به ازای هر کاتر با نرخ نفوذ ۶۶
- شکل ۴-۴. رابطه بین امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح شده با نرخ نفوذ ۶۷
- شکل ۴-۵. رابطه بین مقاومت کششی ماده سنگ با نرخ نفوذ ۶۷
- شکل ۴-۶. هیستوگرام فراوانی امتیاز سرعت چرخش سر حفار با توجه به نظر متخصصان ۶۹
- شکل ۴-۷. هیستوگرام فراوانی امتیاز نیروی پیشران به ازای هر کاتر با توجه به نظر متخصصان ۷۰
- شکل ۴-۸. هیستوگرام فراوانی امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح شده با توجه به نظر متخصصان ۷۰
- شکل ۴-۹. هیستوگرام فراوانی مقاومت کششی با توجه به نظر متخصصان ۷۱
- شکل ۴-۱۰-نمودار ستونی میانگین امتیاز هر یک از پارامترها با توجه به نظر متخصصان ۷۱
- شکل ۴-۱۱-محاسبات ریاضی مربوط به تعیین وزن با استفاده از FDAHP ۷۳
- شکل ۴-۱۲-نمودار ستونی امتیاز هر یک از پارامترها ۷۴
- شکل ۴-۱۳-منحنی امتیازدهی پیوسته به سرعت چرخش سر حفار ۷۷
- شکل ۴-۱۴-منحنی امتیازدهی پیوسته به نیروی پیشران به ازای هر کاتر ۷۷
- شکل ۴-۱۵-منحنی امتیازدهی پیوسته به امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح شده ۷۸
- شکل ۴-۱۶-منحنی امتیازدهی پیوسته به طبقه‌بندی مقاومت کششی ۷۸
- شکل ۵-۱-رابطه بین امتیاز به دست آمده از مدل جدید با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM ۸۱
- شکل ۵-۲-رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل جدید ۸۲
- شکل ۵-۳-رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل NTNU ۸۳
- شکل ۵-۴-رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل Q_{TBM} ۸۳

- شکل ۵-۵- رابطه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل Innaurato ۸۴
- شکل ۵-۶- رابطه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل Caselini ۸۴
- شکل ۵-۷- رابطه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل خادمی ۸۵
- شکل ۵-۸- رابطه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل حسن پور ۸۵
- شکل ۵-۹- مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده به وسیله مدل‌های مختلف با مقادیر واقعی ۸۵

فهرست جداول

شماره صفحه	عنوان
۱۰	جدول ۱-۱- نمونه تقسیم‌بندی زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل.....
۱۲	جدول ۲-۱- نمونه خصوصیات ماده سنگ در واحدهای مختلف.....
۱۳	جدول ۱-۳- نمونه نتایج طبقه‌بندی مهندسی برای واحدهای مختلف.....
۱۴	جدول ۱-۴- مشخصات ماشین حفار دوسپره مورد استفاده در تونل زاگرس.....
۲۰	جدول ۲-۱. دسته‌بندی انواع مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM.....
۲۶	جدول ۲-۲. پارامترهای مختلف نشان‌دهنده نرخ نفوذ TBM.....
۲۹	جدول ۲-۳. پارامترهای عملیاتی TBM در شرایط مختلف.....
۳۰	جدول ۲-۴. مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM.....
۳۶	جدول ۲-۵. نمونه‌ای از سیستم امتیازدهی ارائه‌شده توسط بنیادوسکی.....
۳۷	جدول ۲-۶. ضریب مهارت تیم اپراتور.....
۳۷	جدول ۲-۷. ضریب تجربه تیم اپراتور.....
۳۸	جدول ۲-۸. ضریب توانایی تیم اپراتور در حل مشکلات پیش‌آمده برای ماشین حفار.....
۵۳	جدول ۳-۱. نمونه داده‌های استفاده شده به عنوان ورودی در جعبه‌ابزار شبکه عصبی نرم‌افزار MATLAB.....
۵۵	جدول ۳-۲. انتخاب پارامترهای موثر در مدل جدید با استفاده از جعبه‌ابزار شبکه عصبی نرم‌افزار MATLAB.....
۶۸	جدول ۴-۱- نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده.....
۶۸	جدول ۴-۲- نتایج کلی نظرسنجی ها.....
۷۲	جدول ۴-۳- ماتریس مقایسه زوجی فازی-دلفی بین چهار پارامتر نظرسنجی شده.....
۷۳	جدول ۴-۴- امتیاز هر یک از پارامترها.....
۷۶	جدول ۴-۵- ساختار کلی طبقه‌بندی پیشنهادی مدل جدید.....

۱. فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

امروزه با توجه به توسعه روش‌های حفر تونل با استفاده از ماشین‌آلات مکانیزه به ویژه TBM¹ در تونل‌های با طول زیاد تحقیق و بررسی در راستای شناسایی و رفع مشکلات موجود در این حوزه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. مسئله پیش‌بینی مدت زمان اتمام پروژه همواره یکی از چالش‌های بسیار مهم در این حوزه بوده که باعث اختلافات زیادی بین کارفرما و پیمانکاران شده است، یکی از مهم‌ترین پارامترهای پیش‌بینی مدت زمان اتمام پروژه پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در حین حفاری است. لازم به ذکر است تا کنون تحقیقات بسیاری در این حوزه صورت گرفته که نشان‌دهنده اهمیت این موضوع می‌باشد، مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف با مقادیر واقعی نشان‌دهنده این است که با وجود بررسی‌های بسیار صورت گرفته، تا کنون مدل‌های ارائه شده از دقت لازم برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت برخوردار نبوده‌اند. در این تحقیق تلاش شده مدلی ارائه شود که از دقت بالاتری برای پیش‌بینی نرخ نفوذ برخوردار باشد و بسیاری از معایب مدل‌های دیگر را نداشته باشد. در این فصل کلیاتی از مساله مورد بررسی و هدف از انجام مطالعه‌ی حاضر بیان خواهد شد و همچنین به ضرورت پرداخت به چنین تحقیق‌هایی پرداخته خواهد شد. در این فصل تونل انتقال آب زاگرس و همچنین ماشین حفار مورد استفاده در آن که در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است به طور مختصر معرفی خواهد شد؛ و همچنین انواع روش‌های حفر تونل به طور خلاصه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در انتها نیز به مرور مطالب عنوان شده و فرایندهای انجام‌گرفته در فصل‌های مختلف تحقیق پرداخته خواهد شد.

۱-۲ تعریف مسئله

به طور کلی پیش از آغاز عملیات تونل‌سازی مکانیزه به وسیله ماشین حفار (TBM) نیاز به یک سری پیش‌بینی‌ها برای تخمین مدت زمان پروژه و همچنین هزینه مصرفی وجود دارد. یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر مدت زمان پروژه تخمین نرخ نفوذ ماشین حفار در توده سنگ است. هدف از این تحقیق این است

¹-Tunnel Boring Machine

که با ارائه یک مدل بر اساس پارامترهای ماشین حفاری، توده سنگ، ماده سنگ بتواند تخمینی از نرخ نفوذ ارائه دهد که تا حد امکان کمترین میزان خطا را داشته باشد.

۱-۳ سابقه انجام تحقیق

کاربرد اولیه ماشین‌های حفار TBM سنگ سخت بیشتر در سنگ‌های پیوسته با درزه و ترک کم بوده است؛ در این‌گونه محیط‌ها بیشتر تمرکز مدل‌ها بر روی خواص ماده سنگ بوده است. با گسترش فناوری ساخت TBM محدوده کاربرد آن به شدت گسترش پیدا کرده است. امروزه TBM‌ها به طور گسترده‌ای در محدوده وسیعی از شرایط توده سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. با گسترش کاربرد ماشین‌های حفار درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها در توده سنگ تأثیر مهم تری بر روی عملکرد TBM از خود نشان دادند؛ و نیاز به گسترش و بهبود مدل‌های پیش‌بینی برای کاربری TBM‌ها در سنگ‌های درزه دار آشکار شد. در بسیاری از مدل‌های ابتدایی تأثیر ناپیوستگی‌ها بر روی میزان نرخ نفوذ TBM بر حسب متر بر ساعت (PR)¹ در نظر گرفته نشده است. در نتیجه نیاز به اصلاح مدل‌های قدیمی و یا گسترش مدل‌های جدید که پارامترهای توده سنگ را در نظر گرفته باشد احساس می‌شد. انواع مدل‌های موجود به پنج دسته مدل‌های ساده، مدل‌های چند پارامتری، مدل‌های احتمالاتی، مدل‌های با کمک رایانه و مدل‌های امتیازدهی تقسیم شده است و هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارا هستند. (Farrokh, Rostami et al. 2012)

اشکالات عمده این روش‌ها عبارت است از:

استفاده از پارامترهای متعدد

استفاده از روابط پیچیده

استفاده از نتایج تست‌های آزمایشگاهی نامعمول

و همچنین در نظر نگرفتن عدم قطعیت در پارامترهای زمین‌شناسی و غیره

¹-Penetration Rate

۴-۱ ضرورت انجام تحقیق

با توجه به مشکلات موجود در مدل‌های پیشین و همچنین خطای بالای مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های موجود و همچنین نبود مدلی که امکان پیش‌بینی نرخ نفوذ را در هنگام حفاری داشته باشد و علاوه بر آن امکان تخمین پارامترهای عملیاتی برای رسیدن به یک نرخ مشخص را داشته باشد. نیاز به مدلی با ساختار ساده و کاربرد فراوان احساس می‌شد.

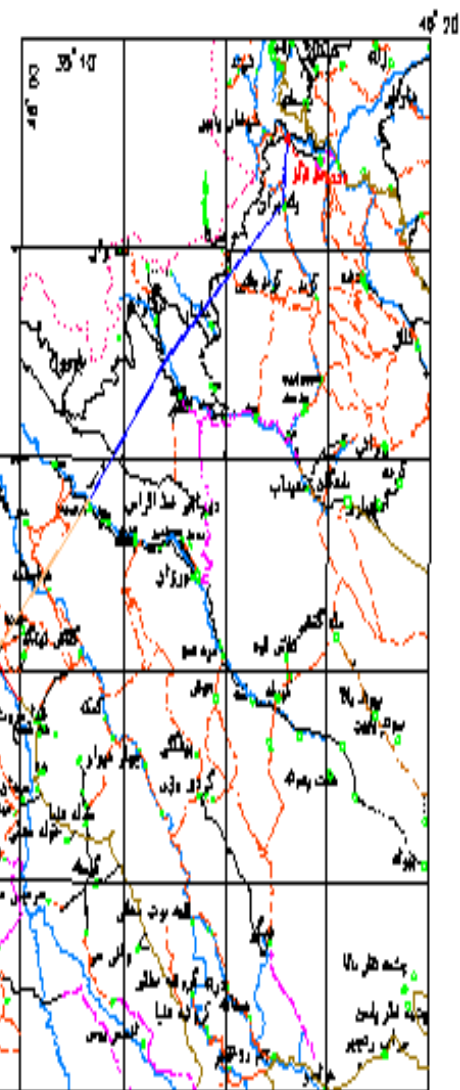
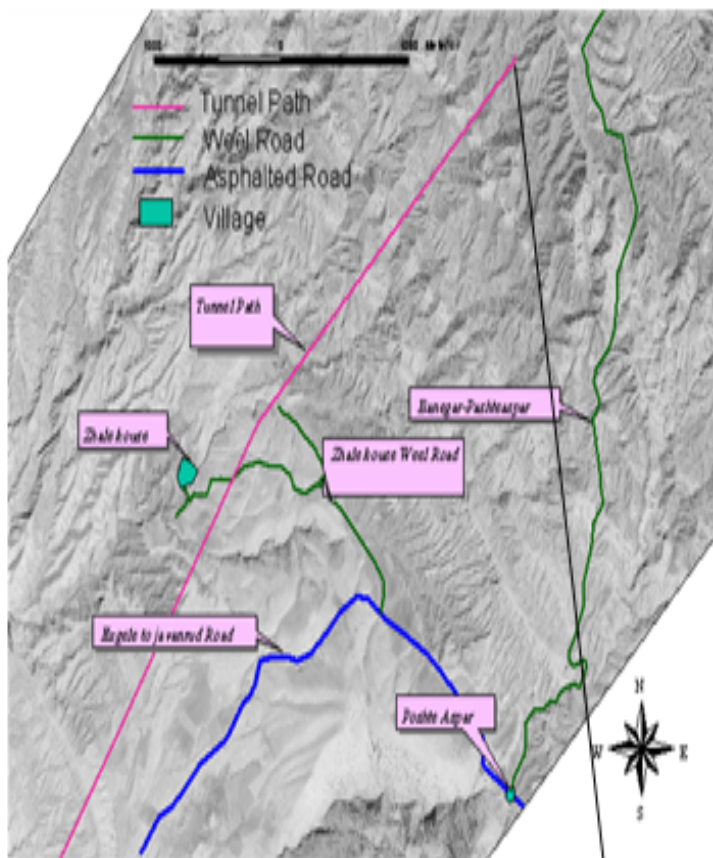
در این پروژه تلاش شده است بتوان با استفاده از روش‌های آماری و هوش مصنوعی و همچنین استفاده از اطلاعات تونل زاگرس بتوان معایب مدل‌های دیگر را تا حدودی برطرف کرد و میزان خطاها را کاهش داد. همچنین با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان خطاهای موجود در تخمین زمان و هزینه پروژه را در مراحل طراحی و اجرا به مقادیر بسیار زیادی کاهش داد.

۵-۱ معرفی تونل انتقال آب زاگرس

تونل انتقال آب نوسود بخشی از طرح انتقال آب به دشت‌های گرمسیری غرب کشور است. منبع اصلی تأمین آب رودخانه سیروان است که حوزه آن در مرز ایران و عراق واقع شده است.

طول کل مسیر حدوداً ۴۶۰ کیلومتر برآورد گردیده است که تونل نوسود که از حوالی روستای هیروی تا ازگله ادامه دارد طولی معادل ۵۰ کیلومتر آن را تشکیل می‌دهد. قطعه دوم این تونل که از رودخانه لیل تا ازگله است، توسط مؤسسه ره‌ساز به وسیله ماشین حفاری تونل (TBM) با سپر دابل اجرا شده است. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به تونل در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. (مهندسین مشاور

ساحل، ۱۳۸۵)



LEGEND	علامت
Barrier	مرز
Asphalted Road	آسفالتنه
Unasphalted Road	شمی دو راهه
Unasphalted Road	شمی یک راهه
Wool Road	خاکلی
Foot path	کوره راه و پیاده رو
Tunnel Path (new route)	مسیر تونل (کل مسر)
Tunnel Path (former route)	مسیر تونل (قبله دوم)
Standard Tunnel Path	مسیر مورد مطالعه
Outlet & Inlet of Tunnel	خروجی و ورودی تونل
River	رودخانه
Town	نهر-روستا

شکل 1-1- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به تونل (مهندسین مشاور ساحل، 1385)

۱-۵-۱ زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی که از نظر تقسیم‌بندی کشوری در استان کرمانشاه قرار گرفته است و نزدیک‌ترین مرکز تجمع جمعیت به آن بخش ازگله است که از نظر تقسیم‌بندی زمین‌شناسی، محدوده مورد بررسی در بخش لرستان کمر بند چین‌خورده-رانده شده زاگرس قرار دارد. واحدهای سنگی موجود در منطقه مورد بررسی که شامل واحدهای شیلی و آهک رسی از سازند پابده و گورپی و سنگ آهک‌های نازک تا متوسط لایه سازند ایلام مربوط به زمان کرتاسه پسین است که اکثر گستره مسیر تونل در زاگرس چین‌خورده را می‌پوشاند.

همچنین تغییرات ضخامت در واحدهای سنگی وجود دارد، از آنجا که در ترسیم عمقی واحدهایی که رخنمون سطحی ندارند از ضخامت نزدیک‌ترین رخنمون آن‌ها استفاده شده است، این تغییرات سبب جابجایی مرز واحدهای سنگی شود. البته از آنجا که تغییرات واحدهای سنگی تدریجی است در هنگام حفاری نباید انتظار دقت بالای مرزهای تعیین‌شده را داشت، ولی می‌توان به عنوان حدود عبور از یک واحد به واحد دیگر بهره جست.

محدوده مورد بررسی در مسیر تونل تحت تأثیر حرکات تکتونیکی جوان زاگرس چین‌خورده و گسل خورده است. ساختارهای موجود در محدوده مورد بررسی را می‌توان به ساختارهای بزرگ و اصلی و ساختارهای کوچک و فرعی تقسیم‌بندی نمود. (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۵)

۱-۵-۲ وضعیت آب زیرزمینی

در بررسی وضعیت آب زیرزمینی در پروژه‌های تونل‌سازی و پیش‌بینی فشار و دبی آب ورودی به تونل سه نکته لازم است مورد توجه و بررسی قرار گیرد:

- وضعیت نفوذپذیری و قابلیت جریان آب در محیط اطراف تونل

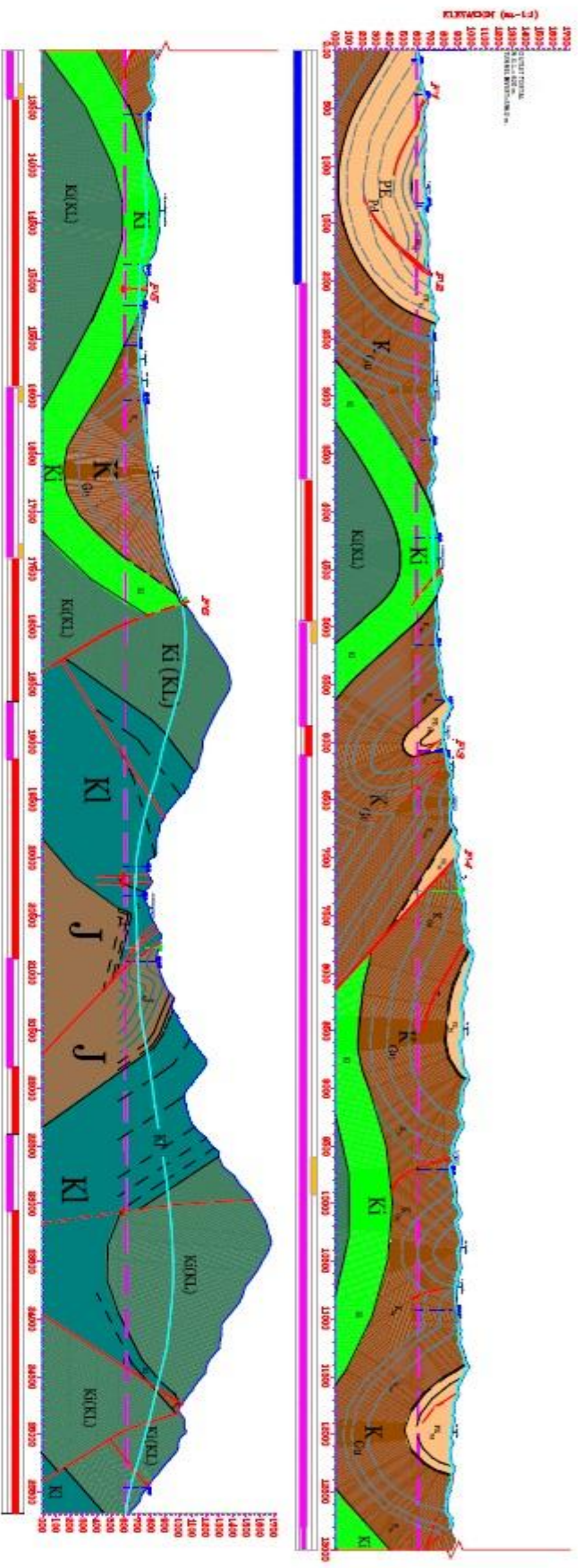
- تراز آب زیرزمینی بالای تونل

- شرایط هیدروژئولوژیکی، نظیر وجود لایه‌های آبدار تحت فشار، ساختارهای هدایت‌کننده جریان و غیره

در بررسی موارد فوق‌الذکر دو عامل، بسیار مهم و تأثیرگذار می‌باشند: ۱- جنس و سنگ‌شناسی سنگ مسیر
۲- ساختارهای زمین‌شناسی موجود.

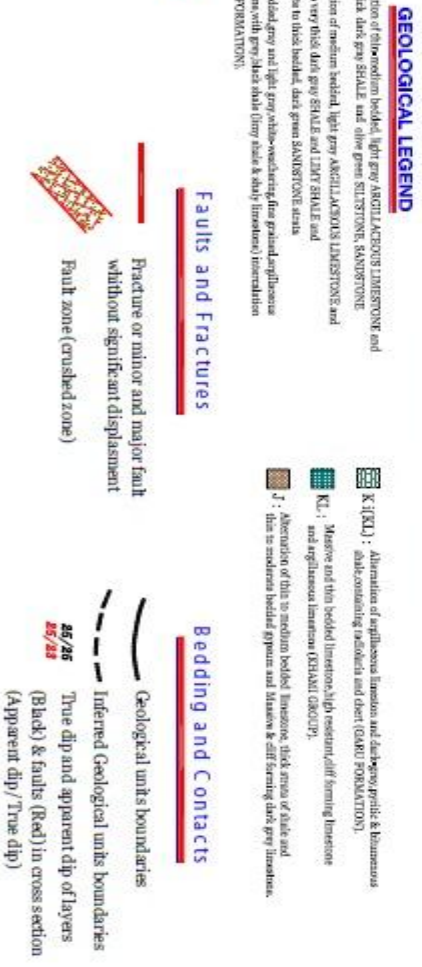
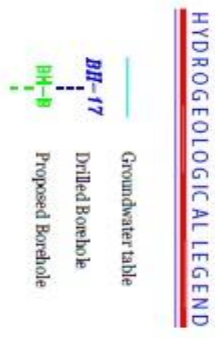
از دیدگاه سنگ‌شناسی، محدوده مطالعه عمدتاً از دو نوع لیتولوژی اصلی آهک و شیل تشکیل یافته است. واحدهای سازند گورپی و ایلام عمدتاً متشکل از سنگ‌های شیلی و آهک شیلی می‌باشند. این واحدها به لحاظ لیتولوژیک دارای نفوذپذیری پایینی می‌باشند. دانه ریز بودن سنگ‌ها و عدم وجود ساختارهای اولیه عامل نفوذپذیری، باعث پایین بودن نفوذپذیری ذاتی این سنگ‌ها است. ناپیوستگی‌ها موجود در این واحدها از قبیل دسته درزه‌ها و لایه‌بندی نیز به دلیل وجود پرشدگی رسی و بازشدگی کم و عدم وجود پدیده انحلال در آنها دارای نفوذپذیری کم هستند، در نتیجه نفوذپذیری توده‌های سنگی این واحدها به طور کلی کم می‌باشد. بررسی سطح آب درون گمانه در این واحدها، نشان می‌دهد که در تمام سال، سطح آب زیرزمینی بالاتر از تراز تونل است و عملاً وضعیت آب درون تونل از نفوذپذیری توده‌های سنگی موجود و ساختارهای منطقه تبعیت می‌کند. در شکل ۱-۲ پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل انتقال آب زاگرس را مشاهده می‌کنید. (مهندسین مشاور

ساحل، ۱۳۸۵)



Geological hazard Legend

Sticky ground	
High	[Orange hatched box]
Moderate	[Purple hatched box]
Low	[Blue hatched box]
Gas Problem	



شکل ۲-۱- بر ویل زمین شناسی مسیر تونل زاگرس (Khademi Hamidi, Shahriar et al. 2010)

۱-۵-۳ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل

۱-۵-۳-۱ تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

با توجه به برداشت‌های صورت گرفته در مطالعات صحرایی، همچنین با در نظر گرفتن مقیاس نقشه توده‌های سنگی مسیر تونل به واحدهای مختلف تقسیم گردید و مبنای تفکیک این واحدها تفاوت خصوصیات لیتولوژیک لایه‌ها، همچنین تفاوت‌های ساختاری واحدها است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه مبنای تفکیک واحدهای زمین‌شناسی تفاوت‌های لیتولوژیک بوده است، می‌توان این واحدها را به عنوان مجموعه‌های سنگ‌شناسی در نظر گرفت. از این رو مرز واحدهای زمین‌شناسی مهندسی عملاً بر مرز واحدهای زمین‌شناسی منطبق است. واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در برش زمین‌شناسی مهندسی با علائمی مشخص می‌شوند که از حروف آغازین لیتولوژی آن مجموعه تشکیل می‌شود. مجموعاً در محدوده مورد مطالعه ۱۰ واحد زمین‌شناسی مهندسی قابل تفکیک است که با توجه به تشابه خصوصیات زون‌های خردشده می‌توان تعداد واحدهای تفکیک‌شده را ۸ واحد دانست. خصوصیات این واحدها به طور خلاصه در جدول ۱-۱ ارائه شده است. (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۵)

جدول ۱-۱- نمونه تقسیم‌بندی زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۵)

ردیف	واحد زمین‌شناسی مهندسی	واحد چینه شناسی	متوسط ضخامت روباره (متر)	شرایط آب	توصیف
۱	SH-LS3	U11	۲۰۰	خشک	نسبتاً ضعیف، لایه‌بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۲	SH-LS4	U12	۱۶۰	خشک	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه‌بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
		U13			
۳	LI1	Ki	۱۷۰	مرطوب - جریان	نسبتاً مقاوم، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خردشده، پایدار
۴	CZ3	Ki	۱۸۰	جریان	زون خرد شده گسلی
۵	SH-LS2	U3	۲۴۰	خشک	نسبتاً مقاوم، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خردشده، پایدار
۶	SH-LS1	U2	۲۶۰	خشک	نسبتاً ضعیف، لایه‌بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۷	ML-SH5	U1	۲۲۰	خشک	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه‌بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
۸	CZ4	U7	۲۲۰	قطره‌ای - جریان	زون خردشده گسلی
۹	FZ2	U6	۲۴۰	خشک - نمناک	بسیار ضعیف، لایه‌بندی نازک، شکسته شده و ناپایدار
۱۰	CZ5	U11	۲۶۰	خشک - نمناک	زون خردشده گسلی

۱-۵-۳-۲ تشریح ویژگی های توده سنگ های مسیر تونل

واحدهای تشکیل دهنده مسیر تونل در محدوده مورد مطالعه عمدتاً شامل آهک، شیل، شیل های آهکی و آهک های شیلی می باشند که تحت تأثیر فرآیندهای زمین ساختی دچار چین خوردگی و شکستگی های فراوان گردیده اند و به دلیل عدم مقاومت زیاد تحت تأثیر عوامل فرسایشی قرار گرفته و رخنمون تپه ماهوری را ایجاد نموده اند. تصاویر نمونه ای از واحدهای موجود در مسیر تونل را در اشکال ۱-۴ و ۱-۵ مشاهده می کنید.



شکل ۱-۳. دسته درزه های موجود در واحد LI1 (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۵)



شکل ۱-۴. نمایی از واحد شیلی SH-LS3 (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۵)

۴-۵-۱ پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ

نتایج جمع‌بندی شده تست‌های آزمایشگاهی و صحرایی که بر اساس بررسی‌های آماری تعیین شده است

برای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در جدول ۱-۲ زیر درج شده است.

جدول ۱-۲- نمونه خصوصیات ماده سنگ در واحدهای مختلف (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۸۵)

شماره	واحد زمین‌شناسی مهندسی	مقاومت تک محوری (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	مدول دگرشکلی (Gpa)	دانسیته خشک (g/cm^3)	تخلخل (%)	هوازگی
1	SH-LS3	۱۵-۳۰	۱-۳	۴-۶	۲.۳-۲.۵	۳-۱۵	نسبتاً هوا زده
2	SH-LS4	۱۵-۳۰	۲.۵-۶	۴-۶	۲.۳۵-۲.۶	۲-۹.۵	نسبتاً هوازده
3	LII	۵۰-۱۰۰	۲.۵-۶	۵.۵-۱۱.۵	۲.۴۷-۲.۶۲	۲.۵-۶	کمی هوازده
4	CZ3	۵۰-۱۰۰	۲.۵-۶	۵.۵-۱۱.۵	۲.۴۷-۲.۶۲	۲.۵-۶	شدیداً هوازده
5	SH-LS2	۳۰-۵۰	۲-۴	۵-۶.۵	۲.۳-۲.۶	۲-۴	کمی هوازده تا نسبتاً هوازده
6	SH-LS1	۱۵-۳۰	۱-۳	۴-۶	۲.۴-۲.۵۵	۱-۳	نسبتاً هوازده
7	ML-SH5	۵۰-۱۰۰	۴-۱۰	۵.۵-۷	۲.۳-۲.۶	۴-۱۰	کمی هوازده تا نسبتاً هوازده
8	CZ4	۵۰-۱۰۰	۴-۱۰	۵.۵-۷	۲.۳-۲.۶	۴-۱۰	شدیداً هوازده
9	FZ2	۱۵-۳۰	۱-۳	۴-۶	۲.۴-۲.۵۵	۱-۳	نسبتاً تا شدیداً هوازده
10	CZ5	۱۵-۳۰	۱-۳	۴-۶	۲.۳-۲.۵	۱-۳	شدیداً هوازده

۱-۵-۵ طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ‌ها

برای طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ‌ها از نظر ژئومکانیکی معمولاً از روش‌های تجربی نظیر RQD، Q، RMR و یا GSI استفاده می‌شود. چنین طبقه‌بندی‌هایی اصولاً مبتنی بر پارامترها و خصوصیات سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها هستند.

با توجه به برداشت‌های صورت گرفته از ناپیوستگی‌ها و خصوصیات سنگ بکر، واحدهای مختلف زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های RMR، RQD، GSI، Q، RMi و RSR طبقه‌بندی شده‌اند. نمونه از مقادیر طبقه‌بندی توده سنگ‌ها برای واحدهای مختلف در جدول ۱-۳ نشان داده شده است.

جدول ۱-۳- نمونه نتایج طبقه‌بندی مهندسی برای واحدهای مختلف (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۵)

شماره	واحد	RQD (%)	RMR	RMR اصلاح شده	Q	GSI	RMi	RSR
1	SH-LS3	۵۰-۶۰	۴۴	۳۴	۱.۵۳	۳۵-۴۰	۱.۰۸	۳۵
2	SH-LS4	۷۰-۷۵	۴۸	۴۳	۱.۹۴	۴۰-۴۵	۱.۲۳	۴۰
3	LI1	۸۰-۹۰	۵۷	۵۲	۴.۶۸	۵۵-۶۰	۶.۵	۵۴
4	CZ3	۲۵-۳۵	۳۴	۲۴	۰.۲۸	۲۰-۲۵	۰.۷	۲۸
5	SH-LS2	۷۵-۸۰	۵۰	۴۰	۳.۱۳	۳۵-۴۵	۲.۷	۳۹
6	SH-LS1	۶۰-۷۰	۴۴	۳۴	۱.۴۵	۲۵-۳۰	۰.۹	۳۷
7	ML-SH5	۷۵-۸۵	۴۹	۳۹	۲.۲۲	۳۰-۳۵	۱۱.۲۸	۵۲
8	CZ4	۲۵-۳۵	۳۰	۲۰	۰.۲۲	۱۸-۲۵	۰.۷	۳۰
9	FZ2	۶۵-۷۵	۳۵	۲۵	۰.۶۴	۲۰-۳۰	۰.۹	۳۲
10	CZ5	۷۵-۸۵	۲۹	۱۹	۰.۳۸	۲۰-۲۵	۰.۲۸	۳۱

۱-۵-۶ ماشین حفار مورد استفاده در تونل انتقال آب زاگرس

ماشین حفار مورد (TBM) استفاده از نوع دو سپره است که مشخصات آن در جدول ۱-۴ نشان داده شده است.

جدول ۱-۴- مشخصات ماشین حفار دوسپره مورد استفاده در تونل زاگرس (مذاکرات شفاهی با مهندس مسعود بیاتی، ۱۳۹۲)

مشخصات	مقدار	توضیحات
قطر سر حفار (m)	۶.۷۳	
قطر دیسک کاتر (in)	۱۷ in	
بیشترین نیروی پیشران به ازای هر دیسک کاتر (KN)	۲۷۵	
گشتاور (KN.m)	۲۹۶۹-۴۴۵۰	۶.۵RPM
سرعت چرخش سر حفار (RPM)	۰-۹.۰۵	
توان (KW)	۲۱۰۰	
طول (m)	۱۸۵	
بیشترین نیروی پیشران (KN)	۲۹۰۳۹	

۱-۶ ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر مشتمل بر شش فصل می باشد که در شرح زیر توضیح داده می شود:

فصل حاضر شامل بیان کلی مسئله مورد بررسی، ضرورت و اهداف تحقیق به همراه معرفی تونل زاگرس است.

فصل دوم تحت عنوان «بررسی مدل های پیش بینی نرخ نفوذ در سنگ سخت» شامل معرفی مفاهیم و بررسی مهم ترین تحقیقات گذشته می باشد، همچنین به مزایا و معایب این مدل ها پرداخته شده است.

فصل سوم با عنوان «پارامترهای پیشنهادی موثر در مدل جدید برای نرخ نفوذ» به بررسی چگونگی انتخاب پارامترهای موثر در مدل جدید با استفاده شبکه عصبی می‌پردازد که ابتدا مختصری در باره تئوری شبکه عصبی توضیح داده می‌شود، سپس نحوه انتخاب پارامترها شرح داده می‌شود.

فصل چهارم با عنوان «ارائه مدلی جدید برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت» می‌باشد که به نحوه وزن‌دهی به پارامترهای موثر و امتیازدهی به بازه‌های هر یک از پارامترها می‌پردازد، در این بخش نیز ابتدا درباره تئوری تحلیل سلسله مراتبی فازی-دلفی توضیح داده می‌شود، سپس به امتیازدهی پیوسته و گسسته درباره مدل جدید پرداخته می‌شود.

فصل پنجم با عنوان «اعتبارسنجی مدل جدید و مقایسه با مدل‌های دیگر» به اعتبارسنجی مدل ارائه پرداخته می‌شود و رابطه ریاضی بین امتیاز به دست آمده از مدل جدید و نرخ نفوذ ارائه می‌شود و در ادامه به مقایسه دقت مدل جدید با مدل‌های دیگر پرداخته می‌شود.

فصل ششم تحت عنوان نتیجه‌گیری و پیشنهادات می‌باشد. در این فصل به برخی از نتایج حاصل از این تحقیق به همراه پیشنهادات ارائه شده بر طبق نتایج حاصل از تحقیق پرداخته شده است.

۲. فصل دوم

بررسی مدل های پیش بینی نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت

۲-۱ مقدمه

عملکرد TBM تأثیر زیادی بر مدت زمان و هزینه پروژه دارد. پارامتر کلیدی در طراحی موفقیت‌آمیز پروژه‌های تونلی با استفاده از TBM پیش‌بینی دقیق پارامترهای عملکرد TBM به ویژه نرخ نفوذ است. PR (میزان نرخ نفوذ TBM در مدت زمان حفاری) و AR^۱ (میزان نرخ نفوذ در نوبت کاری) در چند دهه گذشته مطالعات متعددی برای گسترش و بالا بردن دقت مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM صورت گرفته است. نتایج این مطالعات در چندین مدل برای پیش‌بینی نرخ نفوذ نشان داده شده است. یک مدل مناسب باید شامل پارامترهایی مهم از قبیل ویژگی‌های ماشین و شرایط زمین باشد. به منظور بررسی و اعتبارسنجی یک مدل باید قابلیت پیش‌بینی آن در پروژه‌های جدید آزمایش شود. فرآیند اعتبارسنجی یک مدل می‌تواند مشکلات مدل‌های موجود در پیش‌بینی دقیق تر میزان نرخ نفوذ را آشکار سازد. در این فصل مرور خلاصه و بحث بر روی قابلیت تعدادی از مدل‌هایی که بیش‌ترین استفاده را در پیش‌بینی نرخ نفوذ داشته‌اند صورت می‌گیرد.

۲-۲ دسته‌بندی انواع مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM

تاکنون مدل‌های زیادی به منظور پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه شده‌اند که می‌توان آن‌ها را در قالب پنج دسته مدل‌های ساده، مدل‌های چند پارامتری، مدل‌های احتمالاتی، مدل‌های با کمک رایانه و مدل‌های امتیازدهی دسته‌بندی کرد. اقتباس از (Farrokh, Rostami et al. 2012)

۲-۲-۱ مدل‌های ساده

مدل‌های ساده به راحتی قابل استفاده هستند؛ چون شامل داده‌های اولیه از قبیل مقاومت فشاری تک محوره^۲، مقاومت کششی^۳ هستند؛ اما کاربرد آن‌ها بسیار محدود است. بسیاری از پارامترهای موثر بر عملکرد

¹-Advance Rate

²-Uniaxial Compressive Strength

³-Tensile Strength

TBM از قبیل شرایط توده سنگ (فاصله درزه ها^۱، اندیس کیفی سنگ^۲) در این مدل ها در نظر گرفته نشده‌اند. (Farrokh, Rostami et al. 2012)

۲-۲-۲ مدل های چند پارامتری

مدل های چند متغیره پارامترهای بیشتری را نسبت به مدل های ساده در نظر گرفته است و همچنین کاربردشان از مدل های احتمالاتی و بر پایه رایانه آسان تر است. (Farrokh, Rostami et al. 2012)

۳-۲-۲ مدل های احتمالاتی

مدل های احتمالاتی روش های پیچیده ای را برای پیش بینی عملکرد ارائه می دهند. این مدل ها تنها هنگامی باید مورد استفاده قرار گیرند که جزییات اطلاعات از قبیل (تابع توزیع پارامترهای مختلف در دسترس باشد) تونل مشابه ای در دسترس باشد تا از آن برای پیش بینی عملکرد TBM در تونل جدید استفاده شود. این مدل ها داده های جمع آوری شده در تونل مشابه را مورد استفاده قرار داده اند. اگر تفاوت عمده بین شرایط زمین شناسی و فناوری به کار برده شده در پروژه های جدید با پروژه های گذشته وجود داشته باشد با خطا مواجه خواهد شد. (Farrokh, Rostami et al. 2012)

۴-۲-۲ مدل های با کمک رایانه

نوع دیگری از روش ها که بر اساس رایانه گسترش یافته اند برای پیش بینی عملکرد TBM موجود است. این مدل ها اگرچه از امتیازاتی از قبیل، بالا بودن ضریب تعیین، و در صورت نیاز استفاده از فرمول های پیچیده را دارند، کمتر مورد استفاده قرار گرفته اند. (Farrokh, Rostami et al. 2012)

¹ -Joint Spacing

² -Rock Quality Designation (RQD)

۲-۲-۵ مدل های امتیازدهی

نوع دیگری از مدل ها نیز وجود دارد که ساختاری بسیار ساده دارند (شبیه به RMR^۱) از قبیل (RME^۲) و کاربرد بسیار فراوانی دارند. مدل های امتیازدهی باعث به وجود آمدن یک شاخص می شوند که می تواند در حوزه های وسیعی از قبیل پیش بینی نرخ نفوذ، نرخ سایش دیسک کاتر، میزان دسترسی ماشین، انتخاب ماشین حفار و غیره با اندکی اصلاحات برای هر هدف مورد استفاده قرار گیرند. ممکن است دقت مقادیر پیش بینی شده توسط این مدل ها با مقادیر ثبت شده نسبت به مدل های دیگر کمتر باشد؛ که به نظر می رسد مزایای فراوان این مدل ها تا حدودی این نقص را پوشش دهد.

انواع مدل های موجود به همراه بررسی مزایا و معایب آنها در جدول ۱-۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می کنید، در این جدول انواع مدل های موجود به پنج دسته مدل های ساده، مدل های چند پارامتری، مدل های احتمالاتی، مدل های با کمک رایانه و مدل های امتیازدهی تقسیم شده است و مزایا و معایب مهم آنها ذکر شده است.

^۱-Rock Mass Rating

^۲-Excavability Rock Mass

جدول ۱-۲. دسته‌بندی انواع مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM اقتباس از (Farrokh, Rostami et al. 2012)

معایب مهم	مزایای مهم	مثال	
<ul style="list-style-type: none"> احتمال تخمین نادرست به دلیل در نظر نگرفتن پارامترهای درزه دامنه کاربرد محدود 	<ul style="list-style-type: none"> کاربرد آسان 	(Graham 1976)	مدل‌های ساده
<ul style="list-style-type: none"> تعدد پارامترها روابط پیچیده استفاده از نتایج آزمایش‌های نامعمول 	<ul style="list-style-type: none"> در نظر گرفتن هر دو عامل پارامترهای توده سنگ به همراه ماشین حفار گسترش یافته بر اساس منابع اطلاعاتی وسیع 	<ul style="list-style-type: none"> CSM(Rostami 1993) NUNT(Brulan 1998) Q_{TBM}(Barton 1999) 	مدل‌های چند پارامتری
<ul style="list-style-type: none"> نبود اطلاعات پروژه‌های مشابه 	<ul style="list-style-type: none"> در نظر گرفتن احتمالات و تخمین‌ها 	(Laughton 1998)	مدل‌های احتمالاتی
<ul style="list-style-type: none"> ساختار پیچیده معمولاً در دسترس عموم قرار ندارند. حفظ کردن داده‌ها 	<ul style="list-style-type: none"> گسترش یافته بر اساس منابع اطلاعاتی وسیع 	مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های نرو-فازی (Alvarez Grima 2000)	مدل‌های با کمک رایانه
<ul style="list-style-type: none"> ممکن است در پارامترهای ورودی از نتایج تست‌های نامعمول استفاده شود. ممکن است همبستگی کمتری نسبت به مدل‌های با کمک رایانه از خود نشان دهد. 	<ul style="list-style-type: none"> گسترش یافته بر اساس منابع اطلاعاتی وسیع کاربرد آسان دسترسی عموم کاربرد فراوان قابلیت اصلاح برای کاربردهای مختلف 	RME(Bieniawski Z.T 2007)	مدل‌های امتیازدهی

در گسترش مدل‌های کاربردی توجه محققین بیشتر بر روی تأثیر پارامترهای توده سنگ که اهمیت تأثیر آن‌ها بر روی عملکرد TBM مشهود بود، متمرکز شده بود.

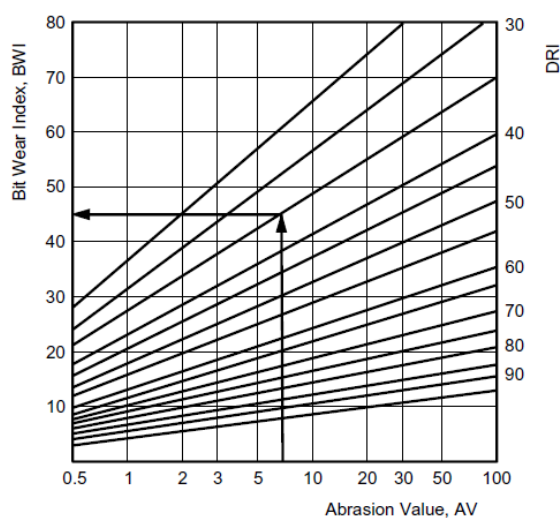
یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در گسترش مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM به ویژه مدل‌های چند پارامتری به حساب آوردن چگونگی اندر کنش ماشین حفار و توده سنگ بوده است.

¹ -Colorado School of Mine

² - Over fitting

برای بهتر نشان دادن پیچیدگی این اندرکنش بعضی از محققین تست های آزمایشگاهی جدیدی که تا حدودی نشان دهنده این اندرکنش باشد طراحی کردند. آزمایش های مخصوصی از قبیل (شکل های ۲-۲ تا ۲-۷) برای به دست آوردن پارامترهایی از قبیل، شاخص قابلیت حفاری (DRI)^۱، شاخص سایش سرمته (BWI)^۲ (شکل های ۲-۲، ۲-۲، ۲-۴) برای بهبود پیش بینی میزان نرخ نفوذ دیسک در شرایط اندر کنش بین TBM و سنگ همان طور که در مدل NTNU^۳ ارائه شده به وسیله برولند (۱۹۹۸) شرح داده شده است (شکل ۲-۳). محقق های دیگر اندکی قدم را فراتر نهاده و سعی کرده اند شرایط واقعی خردایش سنگ به وسیله دیسک کاتر ها را با استفاده از تست برش خطی (LCM)^۴ در ابعاد کامل در آزمایشگاه شبیه سازی کنند (شکل ۲-۷)، همان طور که به وسیله رستمی (۱۹۹۳) شرح داده شده است. نتایج این آزمایشات محققین را کمک کرد تا به وسیله این پارامترها پیش بینی دقیق تری از عملکرد TBM ارائه دهند. (Farrokh, Rostami et al. 2012)

همانطور که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است، شاخص سایش سرمته بر اساس شاخص سرعت حفاری و نیز مقدار سایش استوار است؛ شاخص DRI نیز خود به دو کمیت میزان تردی (S_{۲۰}) و نیز مقدار ارزش سیور- جی^۵ که از آزمایش حفاری کوچک قابل محاسبه می باشد (شکل ۲-۳)، وابسته است.



شکل ۲-۱. شاخص سایش سرمته (BWI) (Bruland, ۱۹۹۸)

^۱ -Drilling Rate Index

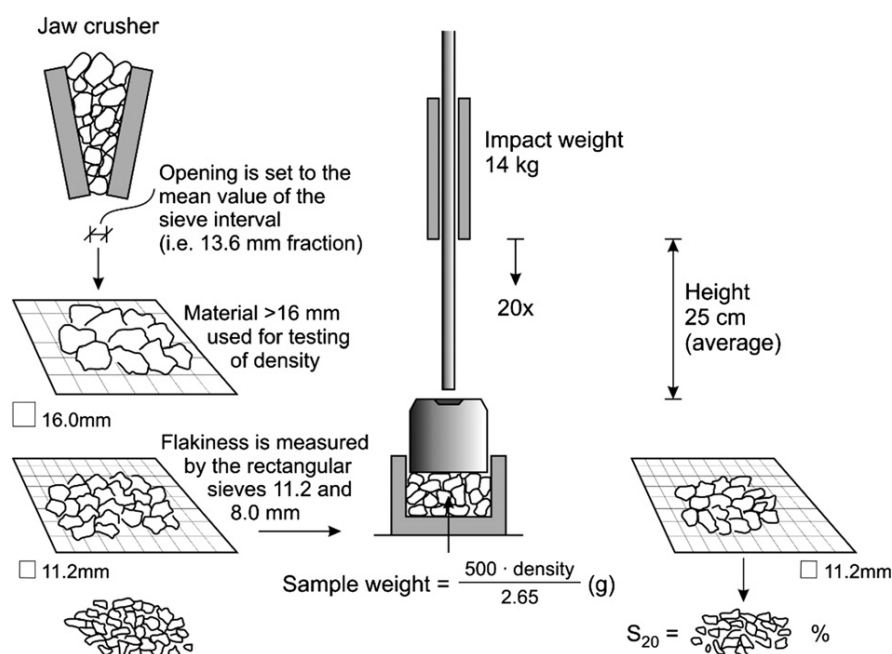
^۲ -Bit Wear Index

^۳ -Norwegian University of Science and Technology

^۴ -Linear Cutter Machine

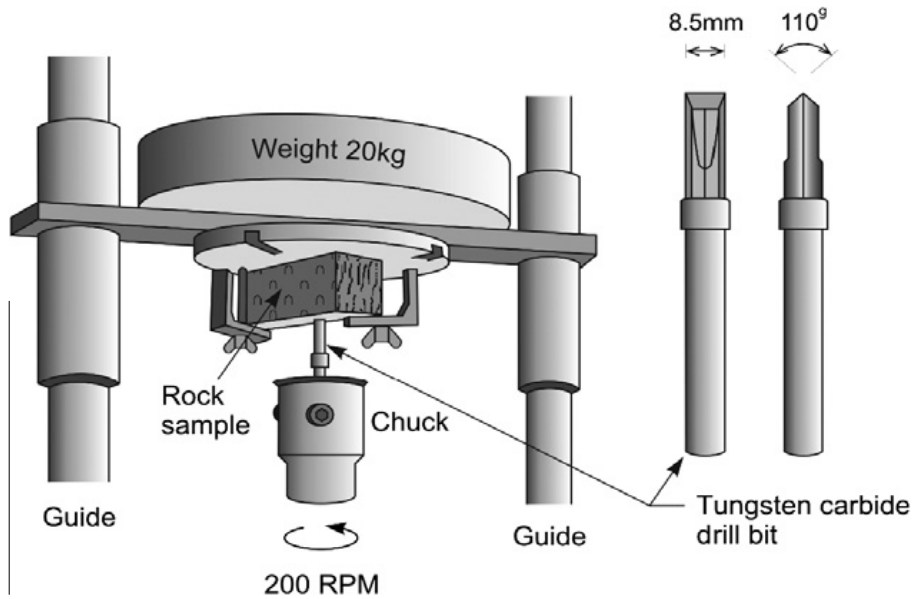
^۵ -Siever's J value

میزان تردی سنگ توسط یک آزمایش ساده اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور، یک نمونه معرف ۵۰۰ گرمی از سنگ به قطعات ۱۱.۲ تا ۱۶ میلی‌متر خرد می‌شود و سپس تحت ۲۰ ضربه متوالی ناشی از یک وزنه ۱۴ کیلوگرمی که از ارتفاع ۲۵ سانتیمتری روی نمونه انداخته می‌شود قرار می‌گیرد. این فرآیند ۳ یا ۴ مرتبه تکرار، و در هر مرتبه قطعات کوچک‌تر از ۱۱.۲ میلی‌متر که «مقدار تردی» یا «عدد شکستگی» (S) نامیده می‌شود، اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها محاسبه می‌شود (شکل ۲-۲)،



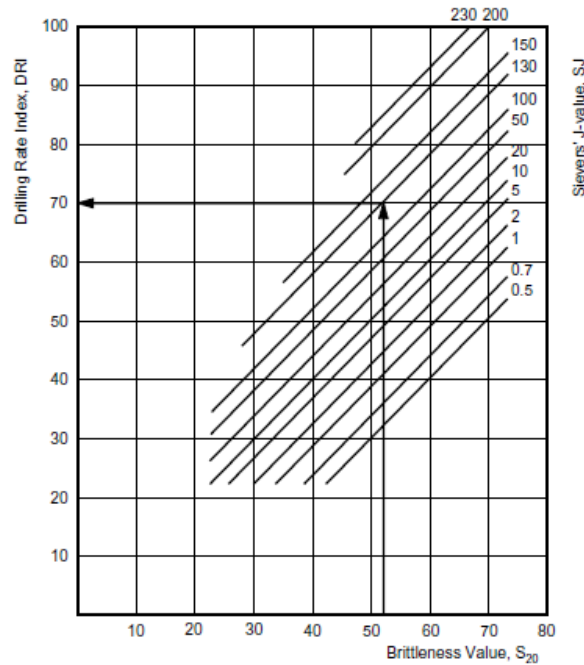
شکل ۲-۲. آزمایش اندازه‌گیری میزان تردی سنگ (S₂₀) (Dahl, Bruland et al. 2012)

در آزمایش چال زنی کوچک، یک دستگاه حفاری کوچک با سرمته مینیاتوری به قطر ۸.۵ میلی‌متر و زاویه نوک ۱۱۰ درجه، نیروی ۲۰ کیلوپی در پشت مته و سرعت چرخش ۲۸۰ دور بر دقیقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. چهار تا هشت بار حفاری روی نمونه انجام‌شده و طول چال‌های حفرشده بر حسب دهم میلی‌متر اندازه‌گیری و به عنوان عدد J ثبت می‌شود (شکل ۳-۲).



شکل ۲-۳. آزمایش چال زنی کوچک با سر منته مینیاتوری (Dahl, Bruland et al. 2012)

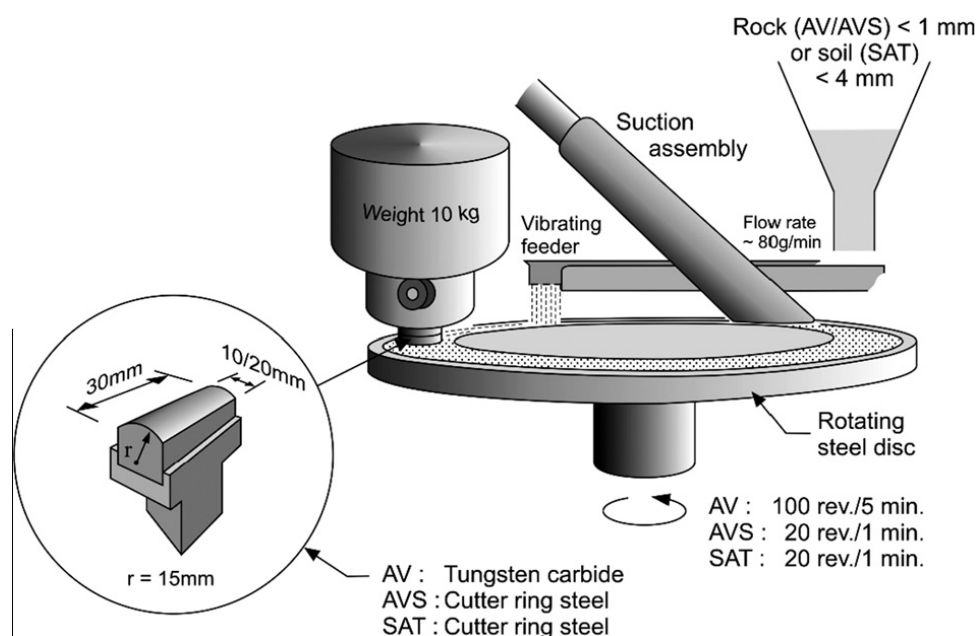
با در دسترس بودن دو پارامتر میزان تردی (S_{20}) و نیز مقدار ارزش J شاخص سرعت حفاری (DRI) طبق نمودار شکل ۲-۴ قابل محاسبه است.



شکل ۲-۴. نمودارهای تعیین شاخص نرخ حفاری (DRI) (Bruland, ۱۹۹۸)

پس از تعیین DRI نوبت به AV می‌رسد. در این روش ذرات دارای قطر کمتر از ۱ میلی متر در بخش زیر قرص تنگستن از فضای دیسک سوراخ وارد می‌شوند. میزان AV در این آزمایش برابر است با میزان کاهش

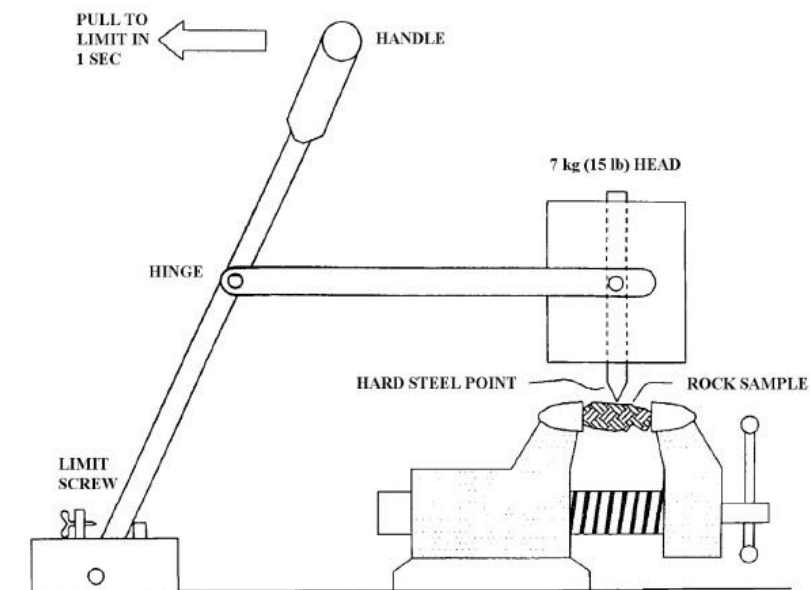
وزن ناشی از دوران ۱۰۰ دور صفحه گردان دستگاه (معادل ۵ دقیقه دوران). حال با دانستن میزان DRI و نیز AV می‌توان میزان شاخص سایش سرمته BWI را از روی شکل ۲-۲ تخمین زد.



شکل ۲-۵. دستگاه آزمایش اندازه‌گیری سایش (AV) (Dahl, Bruland et al. 2012)

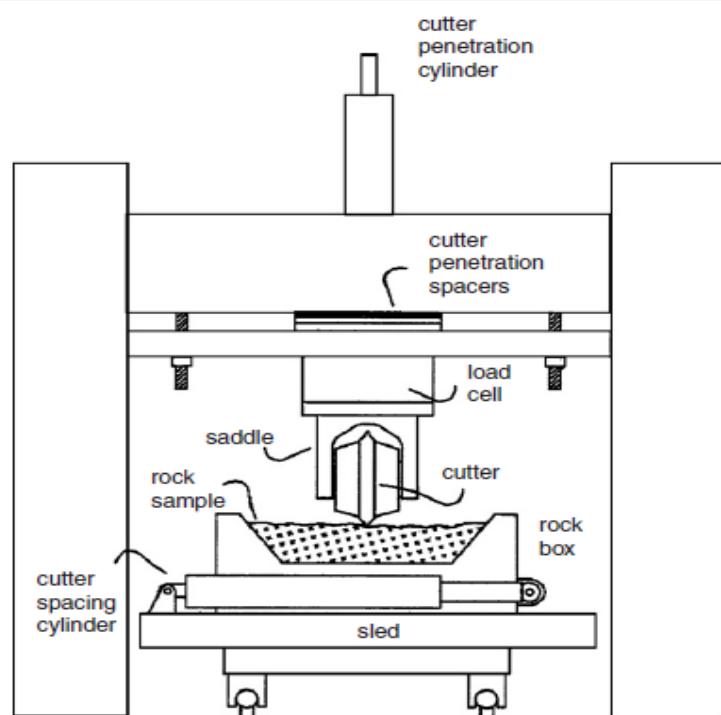
همان‌طور که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است، برای تعیین شاخص سرشار به منظور ایجاد سطحی تازه و بدون هوازدگی، نمونه‌ها شکسته می‌شوند به نحوی که قطعه باقی‌مانده از نمونه قابل نصب در گیره باشد. پس از اتصال میله فولادی به وزنه هفت کیلوگرمی و محکم کردن پیچ مربوطه، نوک تیز میله فولادی بر روی قطعه سنگ قرار داده شده و دسته دستگاه برای ایجاد ۱ سانتی متر خراش در مدت ۱ ثانیه کشیده می‌شود. پس از ایجاد خراش قطر ساییده شده بر روی میله فولادی در زیر میکروسکوپ قرائت می‌شود.

^۱ -Abrasion Value



شکل ۲-۶. نمونه‌ای از آزمایش سرشار به منظور به دست آوردن شاخص سایش سرشار (CAI)^۱ (Rostami 2005)

همانطور که قبلاً گفته شد محققین با استفاده از تست برش خطی شرایط واقعی خردایش سنگ به وسیله دیسک کاتر ها را در ابعاد کامل در آزمایشگاه شبیه‌سازی می‌کنند (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷. ماشین برش خطی (LCM) (Gertsch, Gertsch et al. 2007)

^۱-Cerchar Abrasivity Index

لازم به ذکر است که تنها آزمایشگاه‌های محدودی در سراسر دنیا به این تجهیزات مجهز هستند. همچنین نتایج این آزمایش‌ها تنها برای نمونه‌های تست شده یا شرایط سنگی شبیه آن صدق می‌کند و برای توده سنگ‌های دیگر باید اصلاحاتی صورت گیرد تا نتایج برای آن‌ها نیز صدق کند که ممکن است باعث ایجاد خطاهای زیادی در فرآیند پیش‌بینی شود. مشکل دیگری که وجود دارد استانداردسازی این آزمایش‌ها با توجه به شرایط نمونه‌ها بسیار مشکل است و استفاده از نتایج آزمایشگاه‌های دیگر با خطا همراه خواهد بود.

(Farrokh, Rostami et al. 2012)

۲-۳ پارامترهای هدف در پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM

مرور کلی بر روی مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ نشان‌دهنده این است که بسته به روش تحلیلی پارامترهای مختلفی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ در مدل‌های مختلف ارائه شده است. به ویژه پارامترهای از قبیل PR, PR_{ev} (نفوذ به ازای هر دور چرخش سر حفار) شاخص‌های دیگر در بعضی از مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است از قبیل نفوذ ویژه (SP), شاخص نفوذ میدانی (FPI), نرخ حفاری ویژه (SER) این پارامترها در جدول ۲-۲ نشان داده شده است.

جدول ۲-۲. پارامترهای مختلف نشان‌دهنده نرخ نفوذ TBM (Farrokh, Rostami et al. 2012)

پارامتر هدف	توصیف	واحد	فرمول
PR	نرخ نفوذ	(m/h)	
PR_{ev}	نرخ نفوذ به ازای هر چرخش	(mm/rev)	$(1000 \cdot PR) / (6 \cdot RPM)$
SP	نفوذ ویژه	(mm/rev)/(kN/cutter)	P_{Rev} / F_n
FPI	شاخص نفوذ میدانی	(kN/cutter)/(mm/rev)	F_n / P_{Rev}
SER	نرخ حفاری ویژه	(m ³ /rev)/(kN/cutter)	$A \cdot SP$

A: مساحت مقطع عرضی تونل F_n : نیروی عمودی به ازای هر کاتر

¹ -per revolution Penetration rate

² -Specific Penetration

³ -Field Penetration Index

⁴ -Specific Excavation Rate

۲-۳-۱ نفوذ ویژه (SP)

هدف از معرفی پارامتر نفوذ ویژه SP توسط آلبر (۲۰۰۰) (Alber 2000) ترکیب کردن نیروی پیشران^۱ و سرعت چرخش سر حفار (RPM^۲) با نرخ نفوذ است، به این ترتیب تغییرات پیشران و سرعت چرخش سر حفار در این شاخص ترکیب شده است تا در پروژه‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۳-۲ شاخص نفوذ میدانی (FPI)

شاخص FPI معرفی شد تا شاخص نیروی پیشران بر روی کاترها و همچنین میزان نفوذ به ازای هر دور چرخش (PR_{ev}) ترکیب کند و شاخصی برای شرایط مختلف زمین باشد، همیلتون (۱۹۷۹) (Hamilton 1979) در تحقیقات مختلف رابطه بین FPI و سختی و پارامترهای ماده سنگ، توده سنگ بررسی شده است اخیراً حسن پور وهمکاران (۲۰۰۹) و خادمی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از رگرسیون چند متغیره رابطه پارامترهای مختلف را با FPI به دست آورده و مدل‌های جدیدی ارائه داده‌اند.

۲-۳-۳ سرعت ویژه حفاری (SER)

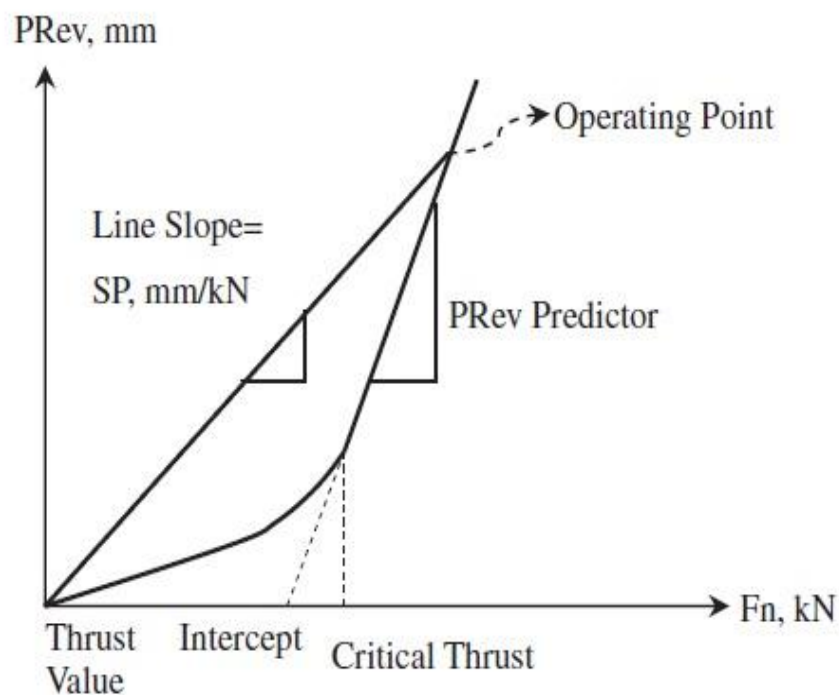
پارامترهای دیگر میزان سرعت چرخش سر حفار را بدون در نظر گرفتن قطر تونل، پارامتری که به طور مستقیم با سرعت چرخش سر حفار رابطه دارد در نظر گرفته اند؛ استیونسون^۳ (۱۹۹۹) شاخص جدیدی به نام سرعت ویژه حفاری (SER) معرفی کرد که از نسبت میزان حجم حفاری شده به ازای هر دور چرخش سر حفار تقسیم بر نیروی پیشران به ازای هر کاتر (F_n) به دست می‌آید؛ که در واقع ترکیبی از نفوذ ویژه (SP) و سطح مقطع تونل بود.

¹ - Trust

² -Rotation Per Minute

³ -Stevenson

یک مزیت استفاده از این پارامترها نشان دادن اندرکنش بین TBM و سنگ با یک شاخص است. لافتون^۱ (۱۹۹۸) نشان داد که SP پارامتر مناسبی برای پیش‌بینی عملکرد TBM نیست، زیرا نمی‌تواند طبیعت ساختار غیرخطی بین PR_{ev} و F_n را نشان دهد. شکل ۲-۸ رابطه غیرخطی میان PR_{ev} و ساختار SP را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود شیب این دو نمودار به شدت متفاوت است به همین دلیل مدل‌هایی که پیش‌بینی آن‌ها بر اساس واحدهای SP, FPI است ممکن است شامل مقادیر بالایی از خطا شود در نتیجه ترکیب پارامترها از یک طرف باعث سادگی و کاهش پارامترهای موجود می‌شود از طرفی هم نمی‌تواند تمام واقعیات موجود را برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه دهد.



شکل ۲-۸. رابطه واقعی میان نفوذ به ازای هر چرخش (PR_{ev}) و نیروی عمودی کاتر (F_n) و مقایسه با پارامتر SP (Laughton 1998)

¹-Laughton

۴-۲ تفاوت ظرفیت‌های اسمی و واقعی

حقیقت دیگر این است که پیش‌بینی‌ها بر اساس ظرفیت‌های اسمی ماشین صورت می‌گیرد، در صورتی که ممکن است در واقعیت از تمام ظرفیت ماشین استفاده نشود و همین عامل ممکن است باعث تفاوت بسیار بین مقادیر پیش‌بینی به وسیله مدل‌ها و مقادیر واقعی شود.

در جدول ۳-۲ چند نمونه از تفاوت‌های میان ظرفیت اسمی و ظرفیت عملیاتی ماشین حفار را در تونل‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۳-۲ پارامترهای عملیاتی TBM در شرایط مختلف (Farrokh, Rostami et al. 2012)

Fn (kN)		RPM		نوع سنگ	نام تونل
طراحی بیش‌ترین	عملیاتی	طراحی بیش‌ترین	عملیاتی		
۱۷۰	۲۲۰	۱۱	۱۲	سنگ آهک	قمرود قطعه ۳ و ۴
۹۰	۲۲۰	۶	۱۲	اسلیت	قمرود قطعه ۳ و ۴
۱۳۰	۲۲۰	۱۰.۳	۱۲	متا ولکانیک	قمرود قطعه ۳ و ۴
۱۰۰	۲۲۰	۸	۱۲	گرافیت شیست	قمرود قطعه ۳ و ۴
۱۵۰	۲۲۰	۷	۱۱	توف	کرج
۱۰۰	۲۲۰	۶	۱۱	سنگ آهک	زاگرس
۱۱۰	۲۲۰	۸.۶	۱۲	دیوریت	گلاب
۱۵۵	۲۲۰		۱۱	سرپانتینیت	Maen
۱۰۰	۱۹۵	۱۰	۱۳	گرانیت	Milyang
۲۵۰	۳۲۰	۸.۳	۸.۳	گرانیت	Queen

۵-۲ بررسی مدل‌های موجود پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM

هدف از مطالعه در این بخش بررسی قابلیت بعضی از مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ که بیش‌ترین استفاده را داشته و در محدوده وسیعی از قطرهای تونل و شرایط توده سنگ استفاده شده‌اند، بوده است، در جدول ۲-۴ خلاصه‌ای از مدل‌هایی که بیش‌ترین کاربرد را داشته‌اند آورده شده است. این مدل‌ها از سال ۱۹۷۰ گسترش پیدا کرده‌اند. از میان این مدل‌ها ۱۲ مدل بر اساس در دسترس بودن پارامترهای مورد استفاده در آن انتخاب شدند.

جدول ۲-۴. مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM (Farrokh, Rostami et al. 2012)

نویسنده/مدل	سال	توضیحات
Tarkoy	1973	برای سنگ آهک، شیل، ماسه‌سنگ، کوارتزیت، کوارتزیت، ارتوکوارتزیت، شلیست، دولومیت، با سختی ۲-۲۴ و نرخ نفوذ ۰.۰۷۶ تا ۳.۷۱۶ m/h
Graham	1976	$P_{Rev} = 3940 F_n/UCS$
Ozdemir et al.	1978	بر اساس داده‌های شرکت رابینز در گرانیست، کوارتزیت، شلیست و شیل
Farmer and Glossop	1980	بر اساس داده‌های شش پروژه $P_{Rev} = 624 F_n/TS$
Cassinelli et al.	1982	استفاده از RSR $PR = -0.0059 RSR + 1.59$
Snowdon et al.	1982	فرمولی که نشان‌دهنده رابطه بین نیروی عمودی کاتر، نیروی چرخشی کاتر و نرخ نفوذ به ازای هر چرخش سر حفار
Lislerud et al.	1983	بر اساس نتایج حفاری در کشور نروژ در شیل، سنگ آهک، گنایس و بازالت
Nelson et al.	1983	بر اساس اطلاعات چهار تونل در سنگ‌های رسوبی
Bamford	1984	بر اساس اطلاعات حفاری در پروژه تامپسون در استرالیا بافاصله لایه‌بندی بین ۰.۳ تا ۰.۵ متر
Sanio	1985	تأثیر لایه‌بندی بر نرخ نفوذ
Hughes	1986	برای ماسه‌سنگ و نرخ نفوذ بالای ۱۰ میلی‌متر در هر چرخش
Boyd	1986	بر اساس قدرت سر حفار، انرژی ویژه و مساحت مقطع عرضی تونل
Sato et al.	1991	بر اساس sanio و استفاده از روشی مشابه
Innaurato et al.	1991	اصلاح فرمول ارائه‌شده به وسیله Cassinelli با استفاده از اطلاعات ۱۱۲ مقطع هموزن، گزارشی از تعداد تونل‌های حفرشده منتشر نشده است. $PR = UCS - 0.437 - 0.047 RSR + 3.15$
Rostami and Ozdemir	1993	مدل CSM بر اساس آزمایش LCM
Sundin and Wanstedt	1994	برای میکاشیست، گرانیست، گنایس با مشخصات: UCS range 65–200 MPa, point load range 1–9 MPa, CAI = 1.9–5.9, toughness of 2.2–3.3
Howarth	1986	بر اساس اطلاعات حفاری در ماسه‌سنگ و مرمر RPM = 14 و $F_n = 3.16 \text{ kN}$

ادامه جدول ۲-۴			
$P_{Rev} = f(F_n, F_r) LCM$	به روز شده مدل CSM بر اساس نتایج آزمایش	1997	Rostami
$P_{Rev} = [M_{ekv}/M_1]^b$	مدل NTNU	1998	Bruland
$PR = 5 Q_{TBM}^{-0.2}$	مدل Q_{TBM}	1999	Barton
	بر اساس اطلاعات یک پروژه برای اصلاح CSM	1999	Cheema
	مدل نرو-فازی	2000	Alvarez
$PR = 0.859 + RFI + BI + 0.0969 P_{Rev} CSM; RFI = 1.44$ $Log(a) - 0.0187 JS$ $BI = 0.0157sP$	بر اساس اطلاعات یک پروژه برای اصلاح مدل CSM:	2002	Yagiz
$SP = 250 UCS_{cm}^{-0.66}$ $UCS_{cm} = UCS \exp((RMR - 100)/18)$		2005	Ribacchi and Lembo Fazio
$P_{Rev} = P_{Rev}^{0.37} \exp(1.8 - 0.0031 JS - 0.0065a)$	بر اساس اطلاعات ۱۱ پروژه برای اصلاح مدل CSM	2005	Ramezanzadeh et al
	بر اساس اطلاعات یک پروژه	2005	Gong
$FPI = 0.425 RMCI + 11.28$	بر اساس اطلاعات دو پروژه	2009a and 2009b	Hassanpour et al.
$FPI = 4.161 + 0.091 UCS + 0.077 RQD + 0.117 J_c + 1.077$ $Log(a)$	بر اساس اطلاعات یک پروژه	2010	Khademi et al
$For \sigma_{ci} < 45 MPa$ $ARA_T = 10 \ln RME - 13$		2008	Bieniawskiet al
	استفاده مستقیم از پارامترهای قطر و سرعت چرخش سر حفار در روابط ریاضی چند متغیره	2012	Farrokh et al

اصطلاحات: P_{Rev} : نرخ نفوذ، PR : نرخ نفوذ به ازای هر چرخش، SP : نرخ نفوذ ویژه، FPI : شاخص نفوذ میدانی، F_n : نیروی عمودی کاتر، F_r : نیروی چرخشی کاتر، UCS : مقاومت فشاری تک محوره ماده سنگ، TS : مقاومت کششی، UCS_{cm} : مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ، RSR^1 : امتیاز ساختار سنگ، RMR : امتیاز توده سنگ، RQD : شاخص کیفیت سنگ، M_{ekv} : نیروی پیشران به ازای هر کاتر (kn/cutter)، M_1 : نیروی پیشران بحرانی به ازای هر کاتر (تراست لازم برای (mm/re) b : ضریب نفوذ، P_s^2 : به دست آمده از آزمایش نفوذ پانچ، RFI^3 : شاخص شکستگی سنگ، BI^4 : شاخص تردی سنگ، J_c^5 : امتیاز شرایط درزه در RMR ، $RMCI^6$: شاخص برش توده سنگ، LCM : ماشین برش خطی

¹ -Rock Structure Rating

² -Peak Slope Index

³ -Rock Fracture Index

⁴ -Brittleness Index

⁵ -Condition Joint

⁶ -Rock Mass Cuttability Index

در گراف شکل ۲-۹ مقایسه میان مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده در مدل‌های مختلف نشان داده شده است. خط ۴۵ درجه نشان‌دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی برابر است. نقاط بالای این خط نشان‌دهنده تخمینی بیش از میزان واقعی است.

همان‌طور که دیده می‌شود در اکثر مدل‌ها تخمینی بیش از مقدار واقعی صورت گرفته است میزان اختلاف مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده گاهی اوقات به ۱۰۰٪ هم می‌رسد عمده دلایل تخمین بیش از مقدار واقعی در زیر آورده شده است:

- از اطلاعات تونل‌های محدودی برای گسترش این مدل‌ها استفاده شده است.

- نبود پارامترهای موثری از قبیل قطر تونل در این مدل‌ها، به علت عدم وجود تغییرات قطر تونل در حد نیاز در داده‌هایی که باعث گسترش این مدل‌ها شده‌اند و علاوه بر آن در نظر نگرفتن تأثیر تغییرات قطر تونل بر روی دیگر پارامترها

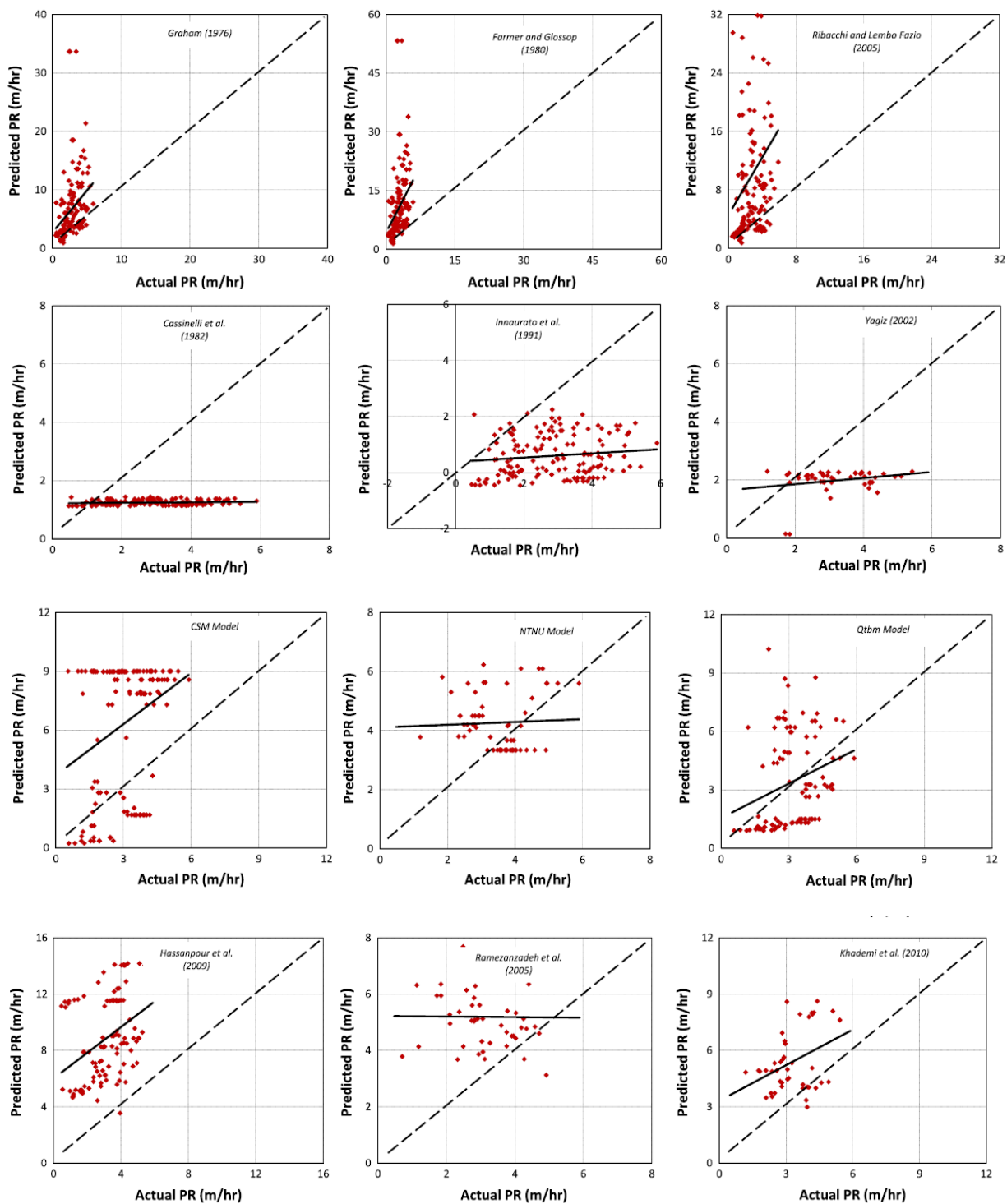
- استفاده از داده‌های نامناسب، تخمینی و غیر دقیق

- نبود اطلاعات پارامترهای عملیاتی TBM به ویژه در توده سنگ ضعیف

- استفاده از پارامترهای زیاد در مدل به طوری که ممکن است نتیجه خلاف واقع ارائه دهد؛ و همچنین به دلیل نبود برخی داده‌ها کاربر را مجبور به حدس برخی از پارامترها کند؛ که خود باعث به وجود آمدن خطاهای بسیار می‌شود.

- حقیقت دیگر این است که پیش‌بینی‌ها بر اساس ظرفیت‌های اسمی ماشین صورت می‌گیرد در صورتی که ممکن است در واقعیت از تمام ظرفیت ماشین استفاده نشود. (Farrokh, Rostami et al. 2012)

برای مثال در مدل معرفی‌شده توسط خادمی و همکاران (۲۰۱۰) (Khademi Hamidi, Shahriar et al. 2010) بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییرات UCS به تنهایی ۷۰٪ تغییرات شاخص نفوذ میدانی (FPI) را نشان می‌دهد؛ اضافه کردن سه پارامتر دیگر تنها برای بالا بردن میزان ضریب تعیین از ۰.۷ به ۰.۷۷ نشان‌دهنده آن است که پارامترهای دیگر نسبت به UCS در سایه قرار دارند و اضافه کردن آن‌ها به مدل ارزش چندانی ندارد.



شکل ۲-۹. مقایسه نتایج در مدل‌های انتخاب‌شده (Farrokh, Rostami et al. 2012)

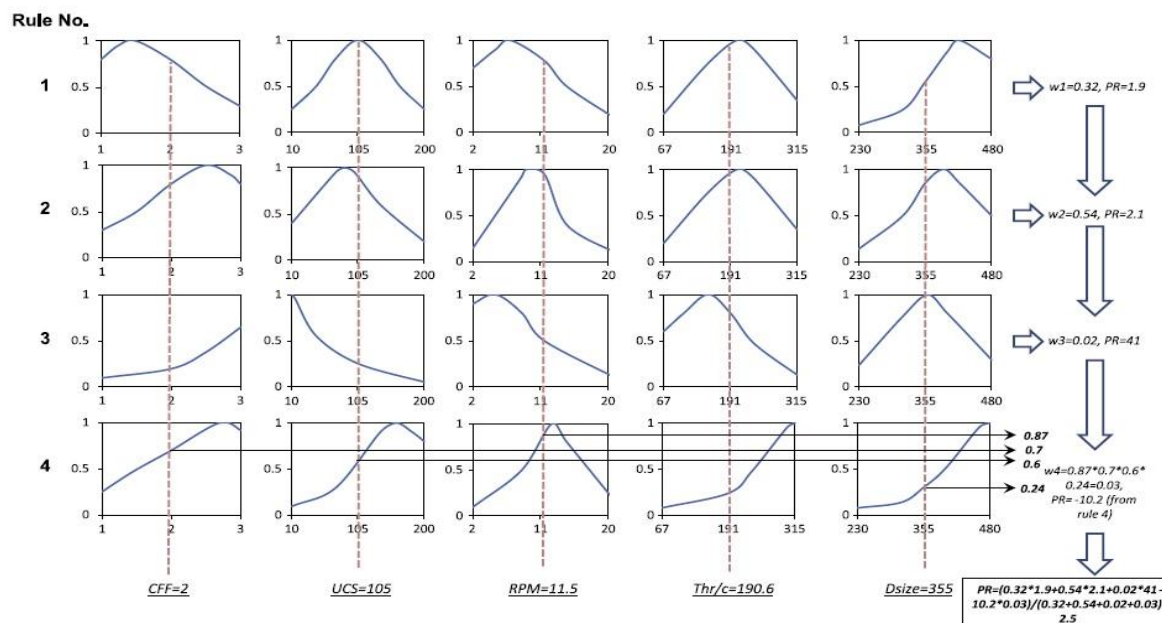
اگرچه برخی از این مدل ها به وسیله اطلاعات میدانی تنظیم شده‌اند؛ قدرت پیش‌بینی آن‌ها محدود است تنها در مواردی انتظار پیش‌بینی دقیق از آن‌ها می رود که شرایط تونل جدید شباهت بسیار زیادی به شرایط تونل‌هایی داشته باشد که مدل بر اساس آن گسترش پیدا کرده است.

۲-۵-۱ بررسی مدل های با اهمیت بالاتر

در ادامه به بررسی جامع سه مدل نرو-فازی، RME و فرخ پرداخته می‌شود، به این دلیل که از بعضی بخش ها و یا از روش‌های آن‌ها برای ارائه مدل جدید استفاده شده است؛ و به شناخت جامع تر این مدل ها به فهم بیشتر مدل جدید کمک می کند.

۲-۵-۱-۱ مدل نرو-فازی

مدل نرو فازی توسط آلوارز^۱ (۲۰۰۰) (Alvarez Grima 2000) برای پیش‌بینی PR ارائه است. این مدل از چهار قانون اصلی پیروی می‌کند. هر قانون از ترکیب خطی ۵ پارامتر تشکیل شده است. این قانون‌ها بر اساس روش فازی (Takagi 1985) و ترکیبی از روش حداقل مربعات به دست آمده‌اند. در شکل ۲-۱۰ مثالی از محاسبات مدل نرو-فازی انجام شده توسط فرخ (۲۰۱۲) برای پیش‌بینی نرخ نفوذ نشان داده شده است.

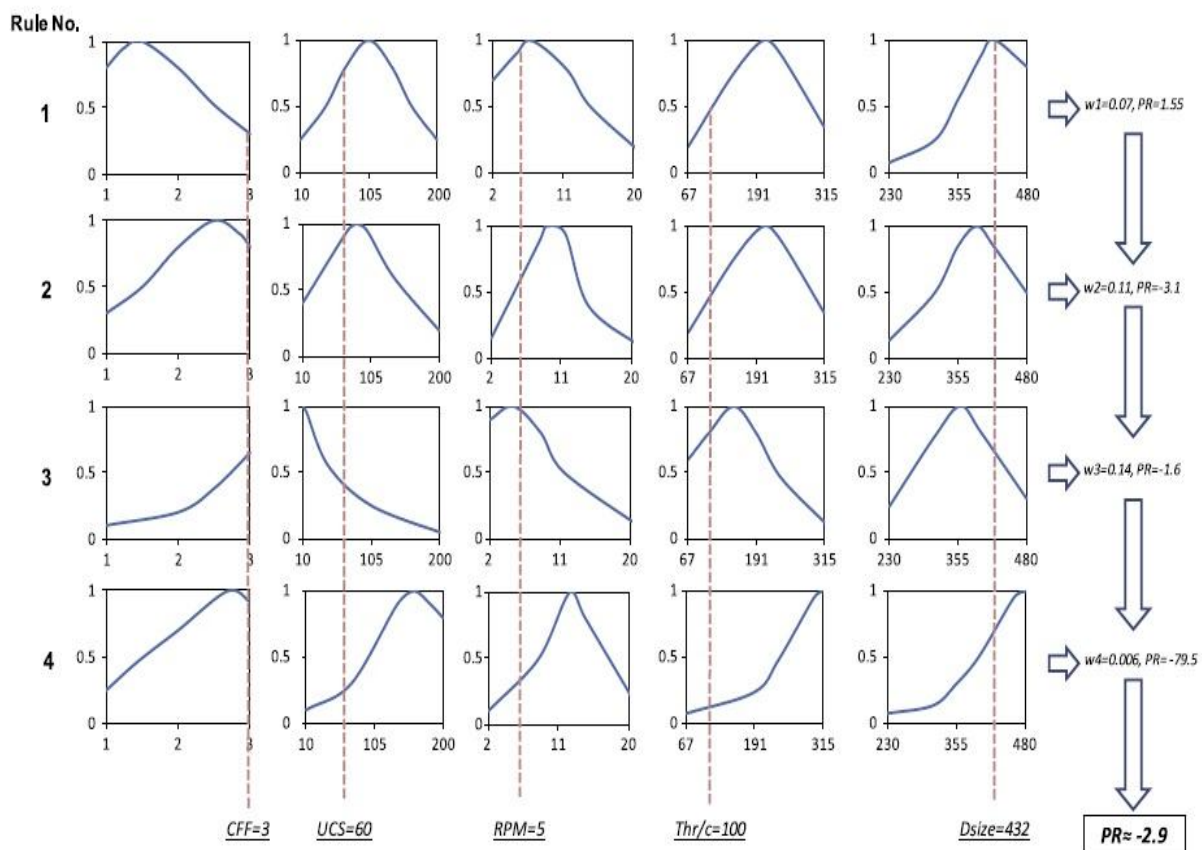


شکل ۲-۱۰. مثالی از مدل نرو-فازی ارائه‌شده به وسیله (Farrokh, Rostami et al. 2012)

¹-Alvarez

در این مدل¹ CFF: فراوانی درزه ها در مغزه؛ و UCS: مقاومت فشاری تک محوره، RPM: سرعت چرخش سرخفار در هر دقیقه، Th/c: میزان نیروی پیشران به ازای هر کاتر، D_{size}: قطر کاتر بر حسب mm می باشد، جزییات محاسبات در آوارز (۱۹۹۹) شرح داده شده است.

مشکلی که وجود دارد این است که بعضی از این قوانین مقدار منطقی برای PR به دست نمی آورند، همان طور که در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است، قوانین ۲ تا ۴ معمولاً برای PR مقادیر منفی را نشان می دهند. وجود این مقادیر منفی نشان دهنده این است که اگرچه این مدل با استفاده از منطق فازی باعث بالا رفتن دقت عملکرد در مجموع می شود، ولی تحلیل نتایج و استفاده از این مدل ها ممکن است مشکل زا باشد. مثالی از به دست آمدن مقدار منفی برای نرخ نفوذ در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۱. مثالی از مدل نرو-فازی با به دست آوردن مقادیر منفی برای PR (Alvarez Grima 2000)

¹- Core Fracture Frequency

۲-۵-۱-۲ مدل RME

در گذشته مطالعات بسیاری برای اصلاح شاخص‌های توده سنگ صورت گرفته تا به عنوان یک مدل برای پیش‌بینی عملکرد TBM از آن استفاده شود که مهم‌ترین آن‌ها می‌توان از:

RQD_{TBM} (Deere), N(Kirsten 1982), RMR_{TBM} (Bieniawski), RMI_{TBM} (Palmström 1995) and Q_{TBM} (Barton 1999)

نام برد که معروف‌ترین آن‌ها Q_{TBM} بوده که به علت استفاده از ۲۱ پارامتر بسیار پیچیده است و در بررسی‌ها نتایج خوبی از خود نشان نداده است. محققان در بررسی‌ها به این جمع‌بندی رسیدند که اصلاح شاخص‌های موجود توده سنگ به تنهایی نمی‌تواند شاخص مناسبی را برای پیش‌بینی عملکرد ماشین حفار ارائه دهد؛ در نتیجه نیاز به ابداع شاخص جدیدی احساس شد که علاوه بر پارامترهای توده سنگ نشان‌دهنده اندرکنش بین ماشین حفار و توده سنگ هم باشد؛ در نتیجه شاخص قابلیت حفاری توده سنگ RME به وسیله بنیایویسکی (۲۰۰۶) (Bieniawski 2006) معرفی شد (جدول ۲-۵).

جدول ۲-۵. نمونه‌ای از سیستم امتیازدهی ارائه شده برای RME (Bieniawski Z.T 2007)

مقاومت فشاری تک محوره ماده سنگ [۰-۲۵ امتیاز]									
۱۸۰<	۱۸۰-۹۰	۹۰-۳۰	۵-۳۰	۵>	(MPa) δ_c				
۰	۱۴	۲۵	۱۴	۴	میانگین امتیاز				
قابلیت حفاری [۰-۱۵ امتیاز]									
۴۰>	۴۰-۵۰	۵۰-۶۵	۶۵-۸۰	۸۰<	DRI				
۰	۳	۷	۱۰	۱۵	میانگین امتیاز				
ناپوستگی‌ها در جبهه کار [۰-۳۰ امتیاز]									
جهت درزه‌ها نسبت به راستای محور تونل			تعداد درزه‌ها در هر متر				هموزنیته		
موازی	متقاطع	عمود	>۳۰	۳۰-۱۵	۱۵-۸	۸-۴	۴-۰	ناهمگن	همگن
۰	۳	۵	۰	۱۰	۱۵	۷	۲	۰	۱۰
زمان خود نگهداری [۰-۲۵ امتیاز]									
>۱۹۲	۱۹۲-۹۶	۹۶-۲۴	۲۴-۵	<۵	ساعت‌ها				
۲۵	۱۵	۱۰	۲	۰	میانگین امتیاز				
جریان آب زیرزمینی [۰-۵ امتیاز]									
<۱۰	۳۰-۱۰	۷۰-۳۰	۱۰۰-۷۰	>۱۰۰	ثانیه/لیتر				
	۴	۲	۱	۰	میانگین امتیاز				

این مدل با استفاده از یک سری ضرایب اصلاحات مربوط به قطر TBM، میزان مهارت و تجربه تیم اپراتور در پروژه‌های مکانیزه و همچنین میزان تجربه آن‌ها در شرایط زمین‌شناسی تونل در حال حفاری را با اصلاحاتی در امتیاز اصلی در نظر گرفته است:

$$ARA^1_R = ARA^2_T * F_E * F_A * F_D \quad 1-2$$

ARA_R : متوسط نرخ پیشروی (واقعی)

ARA_T : متوسط نرخ پیشروی (تئوری)

F_E^3 : ضریب بازدهی تیم: که با توجه به مهارت، تجربه، توانایی تیم در حل از رابطه ۱-۲ محاسبه می‌شود.

F_A^4 : ضریب کارایی: که با استفاده از نمودار شکل ۱۲-۲ محاسبه می‌شود.

F_D^5 : ضریب قطر تونل: که با استفاده از نمودار شکل ۱۳-۲ محاسبه می‌شود.

نحوه محاسبه ضریب F_E در جداول ۶-۲ تا ۸-۲ شرح داده شده است.

$$F_E = 0.7 + F_{E1} + F_{E2} + F_{E3} \quad 2-2$$

جدول ۶-۲. ضریب مهارت تیم اپراتور (Bieniawski 2008)

مهارت تیم اجرایی	کم دوره‌دیده و عدم کار با TBM	دوره‌دیده و عدم کار با TBM	دوره‌دیده و کار با TBM
مقدار F_{E1}	۰	۰/۱	۰/۱۵

جدول ۷-۲. ضریب تجربه تیم اپراتور (Bieniawski 2008)

تجربه پیمانکار TBM	عدم تجربه	ساخت ۱ تا ۵ تونل	ساخت ۶ تا ۱۰ تونل با TBM	ساخت ۱۱ تا ۲۰ تونل با TBM	ساخت بیش از ۲۱ تونل با TBM
مقدار F_{E2}	۰	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۲

¹ - average rate of advance(Real)

² -average rate of advance(Theory)

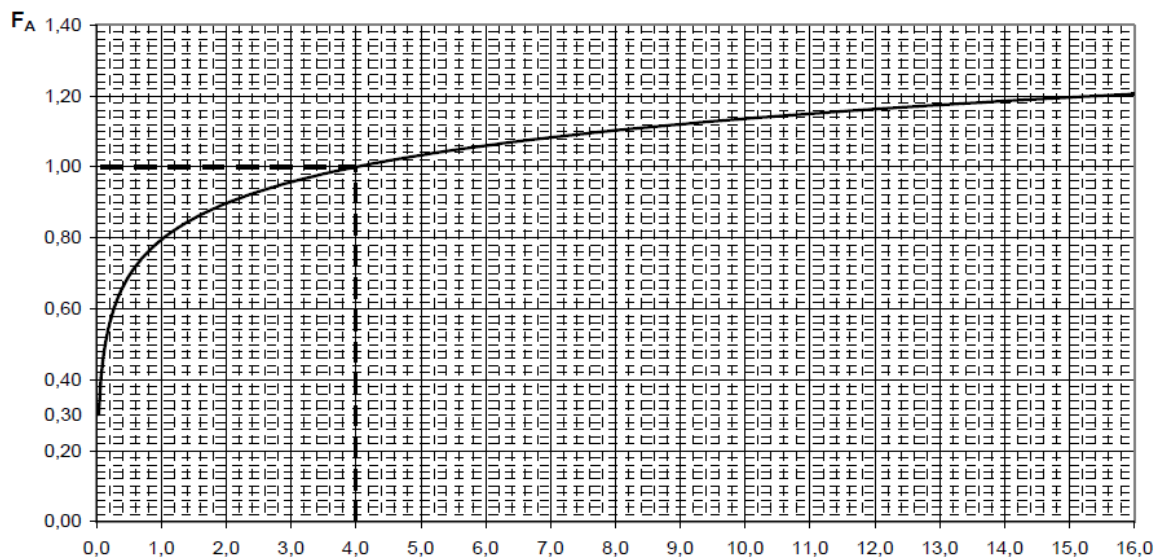
³ -factor of crew efficiency

⁴ -factor of team adaptation to the terrain

⁵ -factor of tunnel diameter

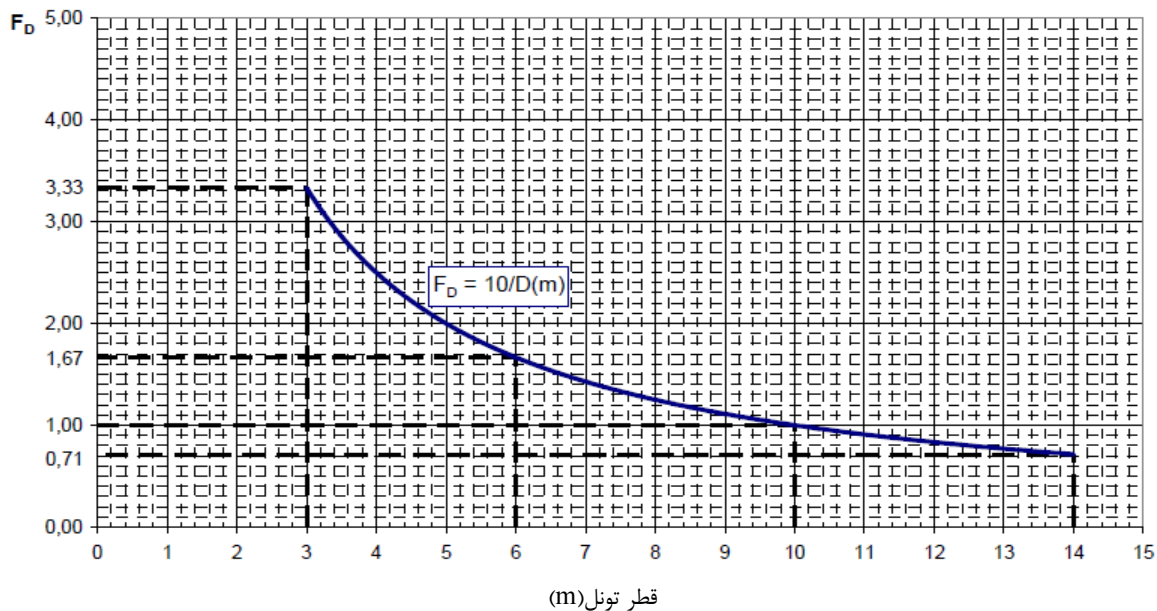
جدول ۲-۸. ضریب توانایی تیم اپراتور در حل مشکلات پیش آمده برای ماشین حفار (Bieniawski 2008)

توانایی حل مشکلات	حضور نماینده شرکت سازنده TBM در محل پروژه	عدم حضور نماینده شرکت سازنده TBM در محل پروژه	مدت زمان حل مشکلات زیر یک ماه	مدت زمان حل مشکلات بیش از یک ماه
مقدار F_{Er}	۰/۰۷۵	۰	۰/۰۷۵	۰



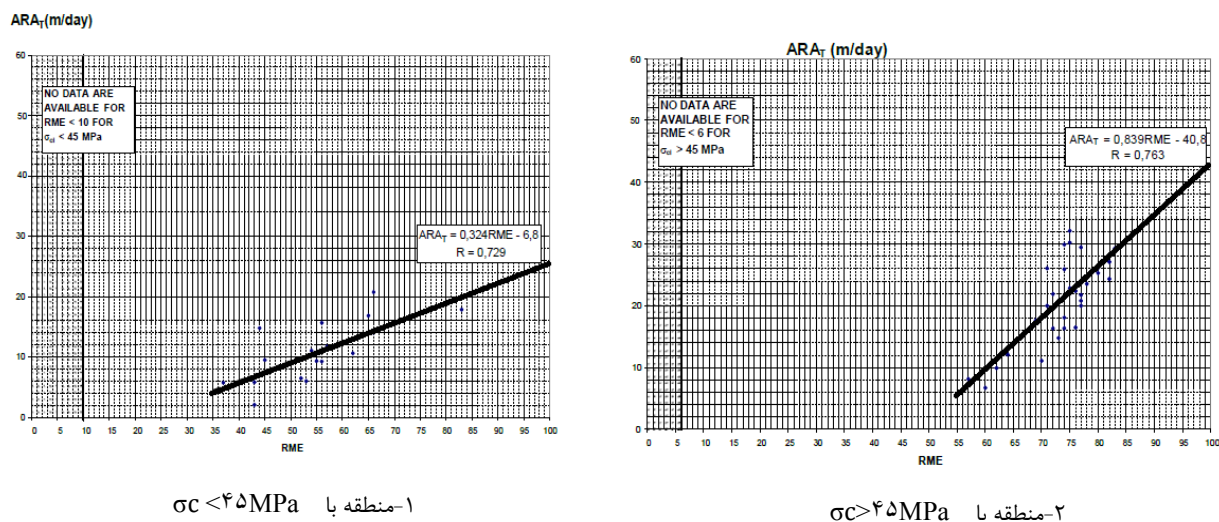
طول تونل (km)

شکل ۲-۱۲. تغییرات ضریب F_A با طول تونل حفاری شده (Bieniawski 2008)



شکل ۲-۱۳. تغییرات ضریب F_D با قطر تونل (Bieniawski 2008)

همچنین برای به دست آوردن ARA_T از نمودارهای ارائه شده توسط نویسنده در حالات مختلف استفاده می شود. به عنوان نمونه روابط میان ARA_T و RME در شکل ۲-۱۴ ارائه شده است.

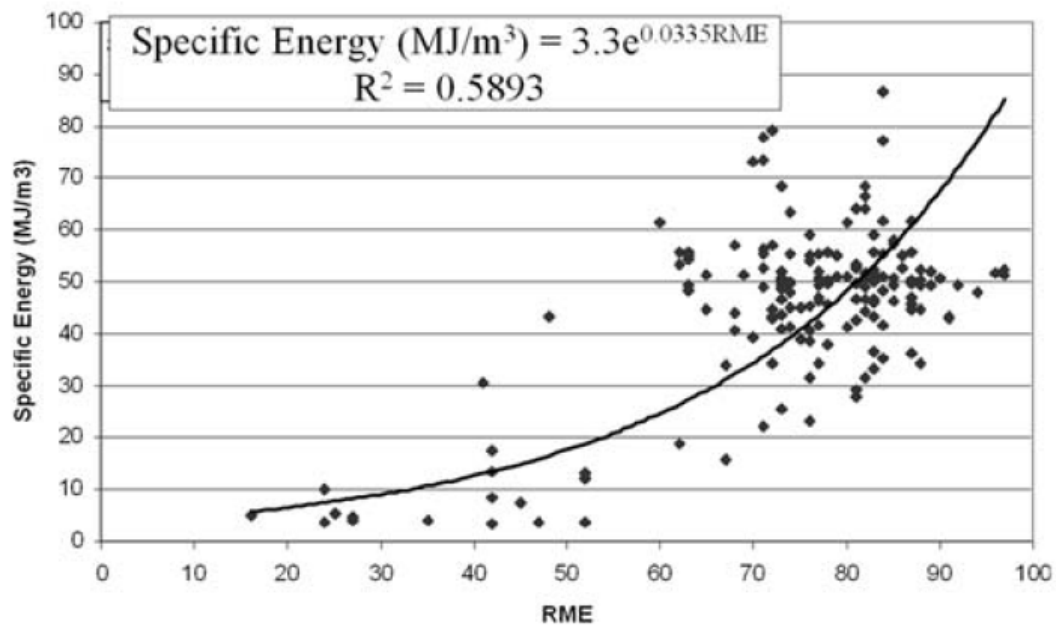


شکل ۲-۱۴. روابط ارائه شده بین ARA_T و RME در TBM باز (Bieniawski 2008)

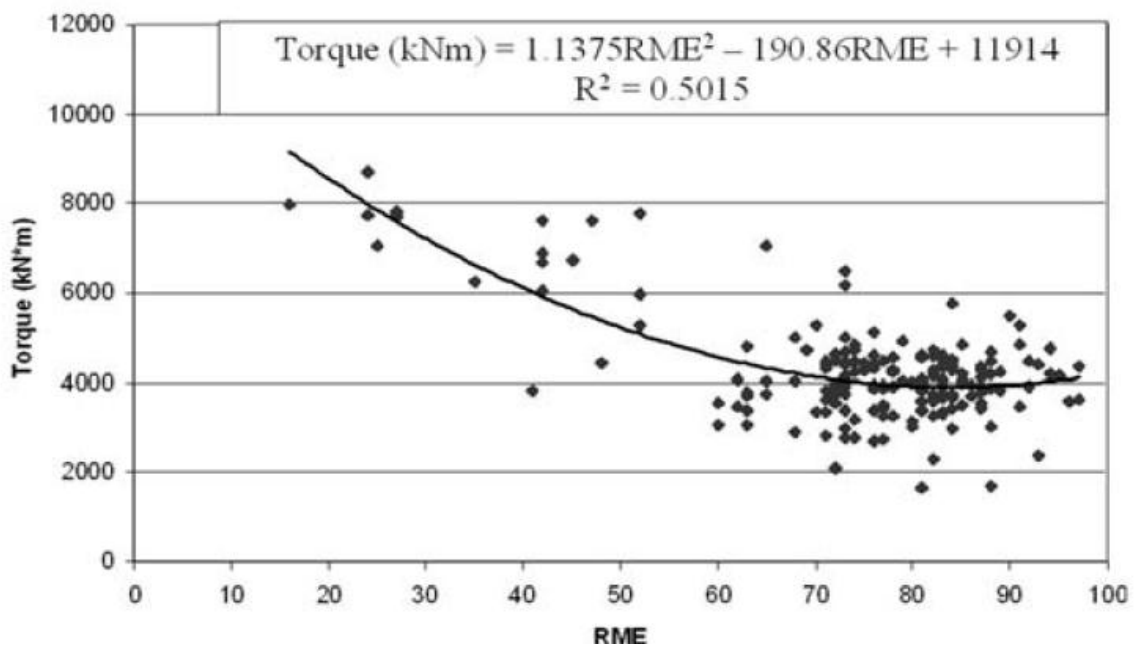
با استخراج مقادیر ضرایب و پارامترهای مختلف از روابط ریاضی و جداول ارائه شده مقدار ARA_R به دست می آید.

۲-۵-۱-۲-۱ کاربردهای شاخص RME

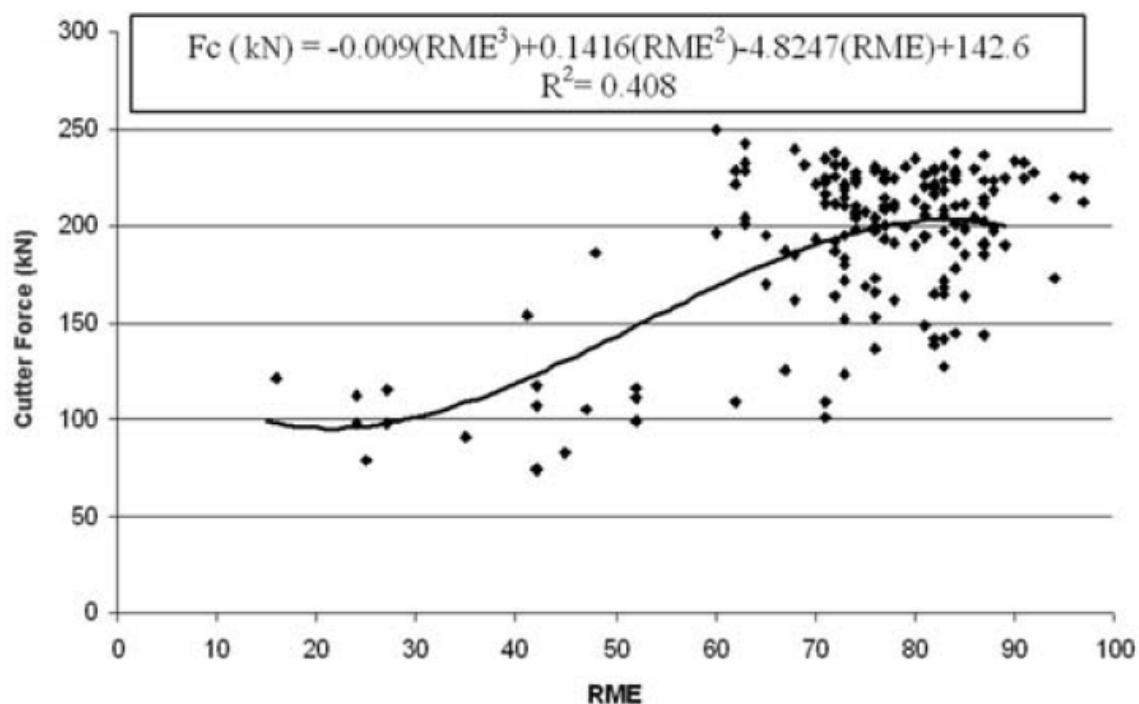
با استفاده از شاخص RME می توان روابط دیگری را میان پارامترهای مختلف و RME از جمله رابطه میان RME و انرژی ویژه، گشتاور، نیروی کاتر، نرخ مصرف دیسک کاتر به دست آورد. نمونه های از آن ها را در شکل هایی ۲-۱۵ تا ۲-۱۷، نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵. رابطه میان انرژی ویژه و RME (Bieniawski Z.T 2007)

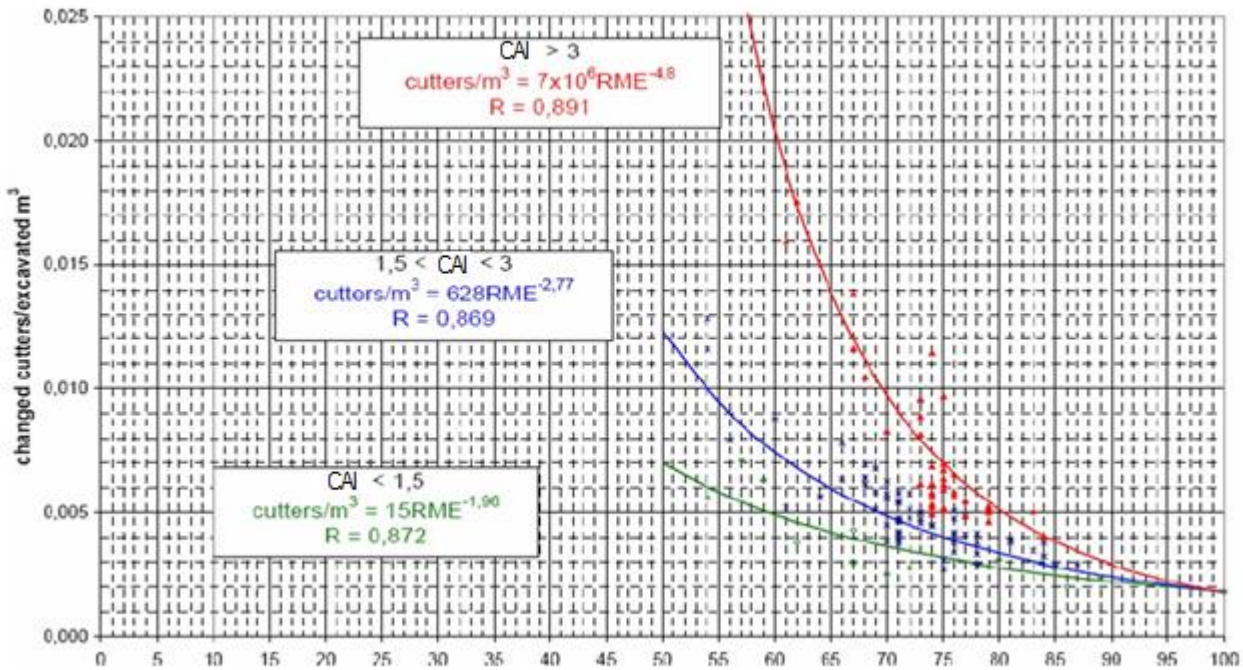


شکل ۲-۱۶. رابطه میان گشتاور و RME (Bieniawski Z.T 2007)



شکل ۲-۱۷. رابطه میان نیروی کاتر و RME (Bieniawski Z.T 2007)

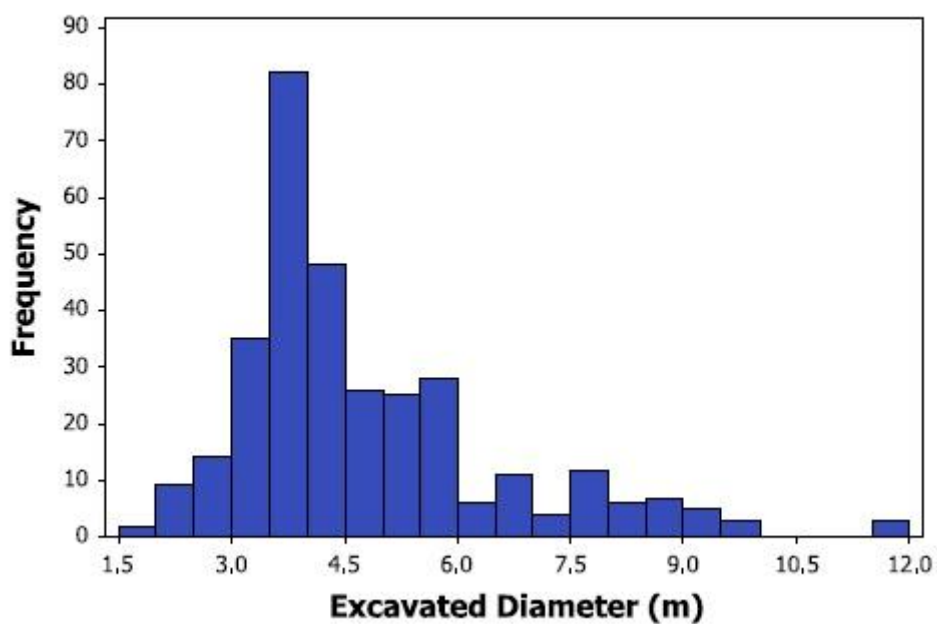
همچنین با کمک شاخص سرشار (CAI) که از آزمایش سرشار به دست می‌آید و امتیاز RME می‌توان با استفاده از نمودارهای شکل ۲-۱۸ میزان مصرف دیسک کاتر را پیش‌بینی کرد.



شکل ۲-۱۸. رابطه میان مصرف دیسک کاتر (Cutter/m^3) و RME با کمک شاخص سرشار (CAI) در محیط با مقاومت فشاری زیر Mpa (Bieniawski Z.T 2009) ۴۵

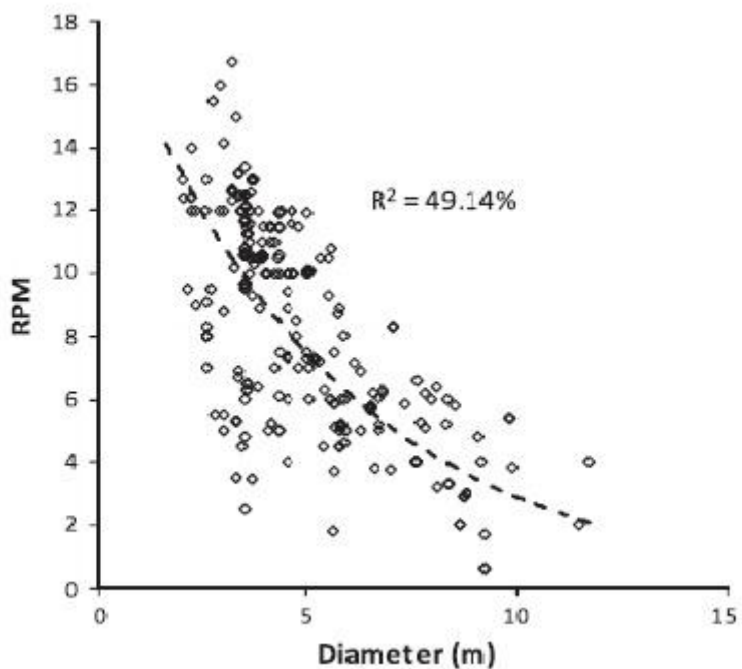
۲-۵-۱-۳ مدل فرخ

در میان مدل‌هایی که تاکنون معرفی شده تنها چند تا از آن‌ها قطر تونل و را به عنوان یک پارامتر موثر در مدل خود تأثیر داده‌اند به این دلیل که در داده‌هایی که برای گسترش مدل خود استفاده کرده‌اند، از تغییر قطرهای مناسبی برخوردار نبوده است؛ در مدلی که توسط فرخ (۲۰۱۲) ارائه شد از بانک اطلاعاتی متشکل از ۳۰۰ تونل برای گسترش مدل استفاده شده که از تغییر قطر مناسبی برخوردار بود. توزیع فراوانی قطر تونل‌ها در این بانک اطلاعاتی در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است، رابطه میان قطر تونل و دیگر پارامترها را در شکل‌های ۲-۲۰ تا ۲-۲۲ نشان داده شده است.

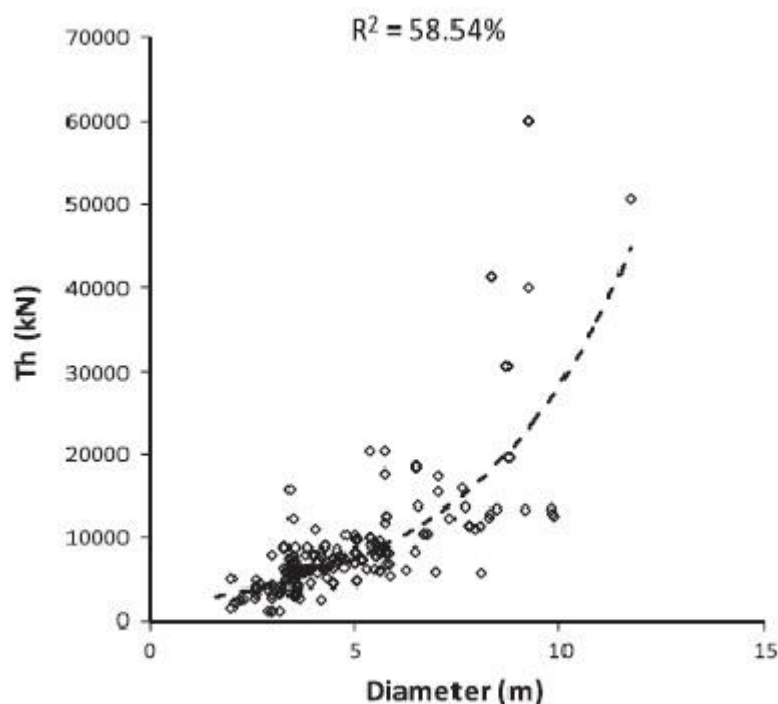


+

شکل ۲-۱۹. نحوه توزیع فراوانی قطرهای مختلف در بانک اطلاعات (Farrokh, Rostami et al. 2012)



شکل ۲-۲۰. رابطه میان قطر تونل با سرعت چرخش سرحفار (Farrokh, Rostami et al. 2012)



شکل ۲-۲۱. رابطه میان قطر تونل با نیروی پیشران (Farrokh, Rostami et al. 2012)

همان طور که در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده است، قطر تونل تأثیر زیادی را بر روی سرعت چرخش سر حفار دارد. در شکل ۲-۲۱ رابطه میان نیروی پیشران با قطر تونل بررسی شده است که به دلیل در دسترس نبودن تعداد دیسک ها در سر حفار اطلاعات زیادی را در اختیار ما قرار نمی‌دهد و بهتر است از پارامتر نیروی پیشران به ازای هر دیسک کاتر در مدل استفاده شود. در نتیجه قطر تونل بیشترین تأثیرش را بر روی سرعت چرخش سر حفار می‌گذارد؛ و با استفاده از این پارامتر در مدل می‌توان تا حد زیادی خطای ناشی از تغییرات قطر تونل را کاهش داد.

جزئیات این مدل در فرخ (۲۰۱۲) (Farrokh, Rostami et al. 2012) شرح داده شده است؛ و علاوه بر آن نشان داده شده است که استفاده از نرخ نفوذ نتایج بهتری از مقادیر نرمال شده نرخ نفوذ به ازای هر چرخش سر حفار (PREV) حتی زمانی که از RPM عملیاتی برای نرمال کردن استفاده شده باشد می‌دهد؛ زیرا به نظر می‌رسد مقادیر نرمال شده نمی‌توانند ساختار غیرخطی واقعی را نشان دهند. مدل فرخ (۲۰۱۲) (Farrokh,)

Rostami et al. 2012) طبق بیان نویسنده به دلیل عدم وجود مقدار واقعی RQD و دیگر شاخص‌های توده سنگ در فرمول مدل ممکن است، هنگام پیش‌بینی عملکرد در توده سنگ‌های ضعیف باعث مقادیر بالای خطا شود.

۲-۶ بحث و جمع بندی

- در این فصل ابتدا به دسته بندی مدل های موجود پرداخته شده است، سپس مدل های موجود به اختصار بیان شده است، انواع آزمایش های خاص برای پیش بینی نرخ نفوذ توضیح داده شده است، علاوه بر آن چند مدل بدلیل شباهت ساختار یا روش به مدل جدید به طور جامع تر توضیح داده شده است.

- از مزایای مدل RME این است که قطر تونل را در نظر گرفته ولی از معایب آن این است که از پارامتر AR برای پیش‌بینی استفاده کرده است که عوامل مختلفی در آن موثر است و همچنین در آن از شاخص DRI که از تست‌های نیروزی است و همه جا در دسترس نیست؛ استفاده شده است.

- اشکال عمده مدل‌هایی که از رگرسیون چند متغیره برای تولید فرمول مدل خود استفاده کرده‌اند، این است که بسیار به منبع اطلاعات مورد استفاده حساس بوده و ممکن است؛ با اضافه و یا کم کردن بخشی از منبع اطلاعات مورد استفاده ضرایب به شدت تغییر کنند، در نتیجه این فرمول ها خیلی زود کارایی خود را از دست داده یا تنها برای پروژه‌های که بسیار به منبع اطلاعاتی مورد استفاده برای گسترش مدل شباهت داشتند، نتایج قابل اطمینان قابل قبولی را به دست می‌آورند.

- همچنین در مورد مدل‌هایی که در نتایج خود از آزمایش‌های خاص استفاده می‌کنند؛ ایراد عمده این روش ها در دسترس نبودن وسایل این‌گونه آزمایش‌های خاص در سراسر دنیا است و دیگر اشکال عمده این آزمایش ها نحوه استاندارد کردن آن است که نتایج به دست آمده از آزمایشگاه‌های مختلف را قابل استفاده کند و بتوان با استفاده از آن ها و روابط ارائه شده نتایج قابل قبولی را ارائه داد.

- دیگر موضوع مهم استفاده حداقلی از پارامترهای نرمال شده در گسترش مدل است؛ زیرا پارامترهای نرمال شده اگرچه به سادگی مدل و گسترش کاربرد آن در شرایط مختلف ماشین حفار و زمین کمک می‌کنند،

ولی باعث می‌شوند، بعضی از واقعیات موجود نادیده گرفته شوند و در نتیجه مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله این مدل‌ها فاصله زیادی با واقعیت داشته باشند.

- به نظر بهترین مدل‌ها برای گسترش مدل‌های امتیازدهی می‌باشند زیرا کاربرد فراوانی در بخش‌های مختلف دارند و همچنین به علت سادگی استفاده از گسترش فراوانی در سایر نقاط دنیا با سطح فناوری‌های مختلف برخوردار می‌شوند؛ و دیگر عامل موفقیت و ماندگاری آن‌ها قابلیت اصلاح شدن آن‌ها برای شرایط مختلف و کاربردهای مختلف آن است و دیگر عامل بهبود یافتن آن‌ها با گسترش منابع اطلاعاتی و پروژه‌های جدید است.

بدین منظور تلاش برای ارائه مدل جدید که دارای مزایای مدل‌های پیشین و حداقل معایب آن‌ها باشد صورت گرفت که نتایج آن را در فصل‌های بعد ارائه خواهد شد.

۳. فصل سوم

پارامترهای پیشنهادی موثر در مدل جدید برای پیش‌بینی نرخ نفوذ

۳-۱ مقدمه

در این فصل انتخاب پارامترهای موثر در مدل جدید برای پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از ابزار تطبیقی جعبه ابزار شبکه عصبی نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است، ابتدا توضیحاتی در رابطه با تئوری شبکه عصبی ارائه شده است، سپس نحوه انتخاب پارامترهای موثر در مدل جدید برای پیش‌بینی نرخ نفوذ شرح داده شده است.

۳-۲ شبکه‌ی عصبی

ساختار کلی شبکه‌های عصبی مصنوعی از شبکه‌ی بیولوژیک انسان الهام گرفته شده است که ترکیبی از عناصر ساده‌ای به نام نرون^۱ بوده که به موازات یکدیگر عمل می‌کنند. شبکه‌های عصبی مصنوعی با پردازش داده‌های تجربی، دانش یا قانون نهفته‌ی رابطه‌ی بین داده‌های ورودی و خروجی را به ساختار شبکه منتقل می‌کند. یک شبکه‌ی عصبی شامل واحدهای ساختمانی به نام نرون است و این قابلیت را دارد که با به کار بردن یک دسته داده‌ی ورودی بتواند یک دسته داده‌ی خروجی دلخواه را تولید نماید. سلول‌های عصبی موجود در شبکه بسته به نوع عملکردشان در لایه‌های خاصی قرار می‌گیرند. هر شبکه‌ی عصبی حداقل دارای سه لایه‌ی ورودی، میانی یا پنهانی و خروجی است. لایه‌ی ورودی محل ورود اطلاعات مورد نظر شبکه است. انتخاب نوع و تعداد ورودی‌های شبکه در کیفیت عملکرد شبکه تأثیر زیادی دارد. لایه‌های پنهان نقش سازمان‌دهی عملکرد یک شبکه‌ی عصبی را دارند. در حالت کلی تعداد سلول‌های عصبی موجود در لایه‌ی پنهان به ساختار شبکه، تعداد ورودی‌ها، تعداد خروجی‌ها، تعداد دسته‌های آموزشی، میزان خطای داده‌ها، پیچیدگی توابع و الگوریتم آموزش شبکه بستگی دارد. لایه‌ی خروجی آخرین لایه‌ی هر شبکه است که نتیجه‌ی عملکرد شبکه‌ی عصبی و پارامترهای مورد نظر را ارائه می‌دهد. (منهاج، ۱۳۸۵)

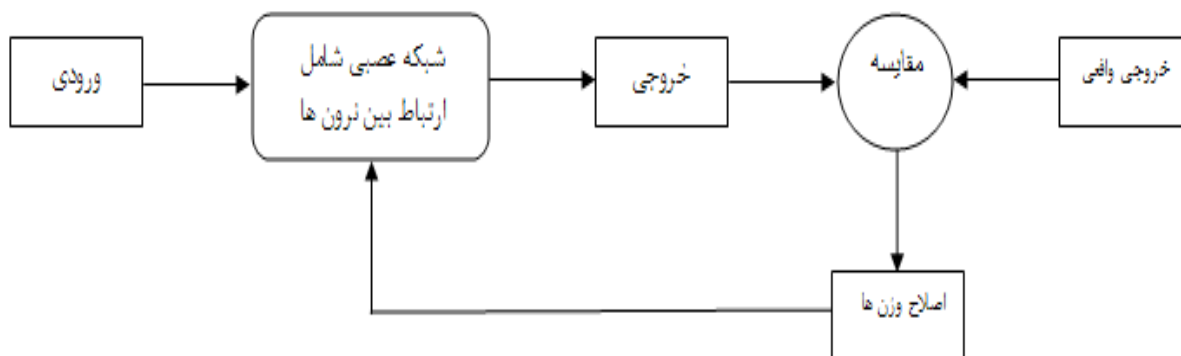
شبکه‌های عصبی از الگوریتم‌های مختلفی جهت یادگیری استفاده می‌نمایند ولی صرف‌نظر از روش استفاده‌شده، یادگیری به طور کلی یک عملیات تکراری است که طی آن مجموعه‌ای از مثال‌های آموزشی به شبکه نشان داده می‌شود تا کاملاً آموزش ببیند. به طور معمول شبکه‌ی عصبی، اصلاح یا آموزش داده می‌-

^۱ -Neuron

شود تا ورودی معینی به سمت خروجی مشخصی هدایت شود. شبکه بر اساس اختلاف بین خروجی شبکه و خروجی واقعی اصلاح می‌شود تا زمانی که خروجی شبکه با خروجی واقعی برابر شود. (منهاج، ۱۳۸۵)

۳-۲-۱ شبکه‌های چند لایه‌ی پرسپترون

همانگونه که در شکل ۱-۳ ملاحظه می‌شود در این نوع از شبکه، هر نرون در هر لایه، به تمامی نرون‌های لایه قبل متصل می‌شود. به چنین شبکه‌هایی، شبکه‌های کاملاً مرتبط گویند. شبکه فوق، عملاً از به هم پیوستن سه شبکه پرسپترون تک لایه ایجاد شده است. یکی لایه خروجی و دو قسمت دیگر لایه‌های میانی نامیده می‌شود. خروجی‌های لایه اول، بردار ورودی لایه دوم را تشکیل می‌دهند و به همین ترتیب بردار خروجی لایه دوم، ورودی‌های لایه سوم را می‌سازند و خروجی‌های لایه سوم، پاسخ واقعی شبکه را تشکیل می‌دهند. نحوه‌ی پردازش اطلاعات توسط نرون‌ها در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. (منهاج، ۱۳۸۵)



شکل ۱-۳. کارکرد شبکه عصبی مصنوعی

اطلاعات رسیده به نرون‌ها (P_1 تا P_R) در وزن‌هایی (W_{L1} تا W_{LR}) ضرب و سپس جمع می‌شوند (net_j) و بدین ترتیب مجموع کل ورودی به نرون حاصل می‌گردد.

وزن‌ها مبین شدت اتصال نرون‌ها به هم می‌باشند و طی فرآیند یادگیری این اوزان تعیین می‌گردند. شکل ریاضی عملیات بالا را می‌توان در رابطه‌ی (۴) مشاهده نمود.

$$\text{net}_j = \sum_{R=1}^R W_{LR} P_R \quad (4)$$

در بعضی موارد مقدار ثابتی در هر نرون به عبارت رابطه‌ی فوق به نام بایاس (Bias) یا وزن اریب نیز افزوده می‌شود. با اضافه شدن وزن اریب (bj) رابطه‌ی (۴) به صورت رابطه‌ی (۵) درمی‌آید.

$$\text{net}_j = \sum_{R=1}^R W_{LR} P_R + b_j \quad (5)$$

در مرحله‌ی بعد یک تابع که معمولاً غیرخطی است به نام تابع فعالیت به جمع ورودی‌ها در هر نرون اعمال می‌گردد که طی آن سطح خروجی از نرون تعیین می‌شود. در شبکه‌های عصبی نرون‌ها در لایه‌ها قرار می‌گیرند. در ساده‌ترین حالت از این شبکه‌ها یک لایه از نرون‌های ورودی وجود دارد که کاملاً به لایه‌ای از نرون‌های لایه‌ی خروجی متصل است. به این دلیل این شبکه پرسپترون تک لایه نامیده می‌شود؛ زیرا تنها در گره‌های لایه‌ی خروجی محاسبات انجام می‌شود. نوع دوم شبکه‌ها از یک یا چند لایه‌ی پنهان تشکیل شده است. وجود لایه‌ی پنهان در شبکه، قابلیت شبکه را در تخمین یک نگاشت غیرخطی افزایش می‌دهد. افزایش تعداد لایه‌ی پنهان شبکه را قادر می‌سازد تا اطلاعات آماری کامل‌تری در مورد مسئله کسب کند. تابع فعالیت می‌تواند خطی یا غیرخطی باشد. یک تابع محرک بر اساس نیاز حل یک مسئله (مسئله‌ای که قرار است به وسیله‌ی شبکه‌ی عصبی حل شود) انتخاب می‌شود. پرکاربردترین آن‌ها تابع سیگموئید و تابع تانژانت هیپربولیک است.

نرون‌های لایه‌ی ورودی هیچ محاسبه‌ای بر روی بردار ورودی انجام نمی‌دهند و خروجی این لایه به عنوان ورودی به لایه‌ی دوم (لایه‌ی پنهان) مد نظر قرار داده می‌شود و خروجی لایه‌ی دوم، ورودی لایه‌ی سوم (لایه‌ی پنهان دوم) می‌شود و تا آخر ادامه دارد. (منهاج، ۱۳۸۵)

۳-۲-۲ شبکه عصبی مصنوعی پس انتشار

در الگوریتم پس انتشار خطا بردارهای ورودی و خروجی متناظر با آن هابرای آموزش شبکه مورد استفاده قرار می گیرد تا جایی که رابطه مابین بردارهای ورودی و بردار های خروجی متناظر آن ها به وجود آید و یا اینکه بردارهای ورودی به طریق مناسبی که توسط ما تعریف می شوند دسته بندی شوند.

در حقیقت اصطلاح پس انتشار خطا به روشی گفته می شود که طی آن شیب شبکه های چندلایه غیرخطی محاسبه می گردد.

الگوریتم پس انتشار خطا^۱ (BP) برای آموزش شبکه های چند لایه ی پرسپترون^۲ (MLP) استفاده می شود. آموزش این شبکه ها با نظارت بوده و در سه مرحله ی زیر انجام می شود:

۱- ارائه ی زوج های آموزشی به شبکه در نرون های ورودی و خروجی شبکه

۲- محاسبه ی خطای شبکه و انتشار برعکس خطا در شبکه

۳- اصلاح وزن ها در جهت کاهش خطا

در الگوریتم پس انتشار دو مسیر محاسباتی موجود است. مسیر اول پیش خور یا رفت نامیده می شود که در این مسیر پارامترهای شبکه در خلال انجام محاسبات رفت، تغییر نمی کنند و توابع محرک روی تک تک نرون ها عمل می کنند. مسیر دوم، مسیر پس خور یا برگشت است که در آن بردارهای حساسیت از لایه ی آخر به لایه ی اول برگشت داده می شوند. در مسیر برگشت شروع کار از لایه ی آخر، لایه ی خروجی است؛ جایی که بردار خطا در اختیار است. سپس گرادیان محلی، نرون به نرون از لایه ی آخر تا لایه ی اول با الگوریتم برگشتی محاسبه می شود و بعد از آن با توجه به الگوریتم آموزشی، وزن ها و بایاس های هر لایه اصلاح می شوند.

به طور کلی می توان گفت که پارامترهای شبکه به گونه ای تنظیم می شوند که پاسخ شبکه به سمت پاسخ مطلوب نزدیک تر شود.

¹ - Back Propagation

² - Multi Layer Perceptron

هر شبکه در تعداد بهینه‌ای از دوره‌ها آموزش می‌بیند. یک دوره‌ی آموزش^۱ عبارت از یک مرحله ارائه‌ی تمام زوج‌های آموزشی به شبکه است. عموماً برای آموزش یک شبکه‌ی پس انتشار خطا نیاز به دوره‌های زیادی است که تعداد آن‌ها ممکن است به چند هزار برسد. (منهاج، ۱۳۸۵)

۳-۲-۱ الگوریتم آموزش شبکه‌های پس انتشار

تعیین این مسئله که کدام الگوریتم برای یک مسئله‌ی خاص سریع‌تر عمل می‌کند، کار بسیار دشواری است؛ زیرا این مسئله به عامل‌های زیادی از جمله پیچیدگی مسئله، تعداد داده‌های مجموعه‌ی آموزشی، تعداد وزن‌ها و بایاس‌ها در شبکه، مقدار خطای مجاز و اینکه شبکه برای تشخیص الگو استفاده می‌شود و یا برای تخمین تابع بستگی دارد.

عموماً در مسائل تخمین تابع با پارامترهای شبکه‌ی کمتر از ۱۰۰، الگوریتم لوبنبرگ-مارکوادت (LM^۲) کارایی بالایی از خود نشان داده و سرعت بالایی دارد. در مقابل در مسائل تشخیص الگو اصلاً کارایی مناسبی ندارد. (منهاج، ۱۳۸۵)

۳-۲-۲ الگوریتم لوبنبرگ - مارکوادت

این الگوریتم نوعی الگوریتم پس انتشار است که با الگوریتم بهینه‌سازی گوس-نیوتن متفاوت است. ترتیب جدید وزن‌ها در گام $k+1$ به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$W(k+1) = w(k) - (JTJ + \lambda I)^{-1} JT \cdot \varepsilon(k) \quad (۶)$$

J ماتریس ژاکوب می‌باشد که برای یک نرون به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial w_n} & \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial w_0} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial w_n} & \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial w_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{n1} & 1 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ x_{p1} & \dots & x_{np} & 1 \end{bmatrix}$$

^۱ - Epoch

^۲ - Levenbery - Marquardt

که در آن w بردار وزن، w بایاس نرون، ε بردار خطا (تفاوت بین خروجی شبکه و خروجی واقعی) است. پارامتر λ بر اساس تابع خطای E اصلاح می‌شود. اگر در هر گام E کاهش یابد مورد قبول است، در غیر این صورت λ تغییر می‌کند و $w(k+1)$ دوباره محاسبه می‌شود. (منهاج، ۱۳۸۵)

۳-۳ انتخاب پارامترها در مدل جدید

در این تحقیق انتخاب پارامترهای موثر در مدل جدید با استفاده از جعبه ابزار شبکه عصبی نرم افزار MATLAB صورت گرفته است. برای این منظور از داده های به دست آمده از پروژه تونل انتقال آب زاگرس (۹۵ ردیف داده) که نمونه آن‌ها در جدول ۳-۱ نشان داده شده است، استفاده شده است.

جدول ۳-۱. نمونه دادهای استفاده شده به عنوان ورودی در جعبه ابزار شبکه عصبی نرم افزار MATLAB

ردیف	Torque	Fn	RPM	overburden	UCS	Quartze Content	E	Dry Density	Porosity	Tensil strength	Joint spacing	RQD	RMR	RMR(adjusted)	PR
۱	871	117	3.95	3.84	22.5	4	5	2.45	7.5	2.5	50	72.5	48	43	1.5
۲	885	198	5.95	4.5	22.5	0.5	5	2.45	10	2	20	70	44	34	3.12
۳	735	172	5.76	4.9	40	2	6	2.45	7.5	3	30	77.5	50	40	2.46
۴	883	207	5.22	6	22.5	2	5	2.45	7.5	2	30	65	44	34	2.82
۵	940	207	6.00	4.8	75	0.5	6	2.45	4	5	50	80	49	39	2.58

نمونه‌ها از ۱۸ بخش زمین‌شناسی با خصوصیات ژئومکانیکی مختلف به دست آمده و با داده‌های ثبت شده توسط ماشین حفار ترکیب شده است. بدین صورت که ابتدا کلیه پارامترهایی که احتمال تأثیر آن‌ها در نرخ نفوذ TBM سنگ سخت وجود داشته و در بانک اطلاعاتی وجود دارند (لازم به ذکر است پارامترهایی از قبیل فاصله دیسک کاترها، قطر دیسک کاتر به دلیل عدم تغییرات در این پروژه در نظر گرفته نشده اند)، به عنوان پارامتر ورودی شبکه در نظر گرفته شدند؛ و امکان پیش‌بینی نرخ نفوذ توسط این پارامترها با بررسی پارامترهای خروجی جعبه‌ابزار شبکه عصبی نرم‌افزار MATLAB از قبیل ضریب همبستگی (R)، میانگین مربعات خطا (MSE)، در مراحل آموزش، امتحان، اعتبارسنجی بررسی شد؛ لازم به ذکر است که برای

¹ - Regression

² - Mean Squared Error

اطمینان از تصادفی نبودن نتایج مرحله آموزش چندین بار تکرار شده است؛ و به منظور ساده‌سازی مدل تا حد امکان و افزایش کاربرد آن تلاش برای کاهش پارامترهای موجود در مدل و همچنین حذف پارامترهایی که همپوشانی بسیاری با مدل‌های دیگر دارند صورت گرفت. در جدول شماره ۳-۲ خلاصه‌ای از کارهای صورت گرفته نشان داده شده است.

در ردیف اول ابتدا کلیه پارامترهای موجود در بانک اطلاعاتی که احتمال تأثیر آن‌ها در نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت وجود دارد به عنوان پارامترهای ورودی شبکه عصبی در نظر گرفته شدند و پارامتر خروجی نرخ نفوذ (PR) بر حسب (m/s) در نظر گرفته شد و نتایج بررسی شد. با توجه به این که ضریب همبستگی (R) بالای ۰.۹ و خطایی در حدود ۰.۰۱ نشان‌دهنده انتخاب پارامترهای مناسب است. در هر مرحله با حذف پارامترهای با اهمیت کمتر و همچنین پارامترهای دارای همپوشانی بالا و همچنین جایگزینی چند پارامتر ماده سنگ با امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده (مرحله ۳) و بررسی نتایج در نهایت ردیف ۷ با پارامترهای سرعت چرخش سرحفار، نیروی پیشران به ازای هر کاتر، امتیاز توده سنگ اصلاح‌شده، مقاومت کششی ماده سنگ (TS)، بهترین پارامترها تشخیص داده شدند. لازم به ذکر است پارامتر امتیاز توده سنگ اصلاح‌شده به دلیل تأثیر زوایای دسته درزه‌ها با محور تونل بر امتیاز توده سنگ (RMR) ارجحیت دارد. همچنین پارامتر مقاومت کششی ماده سنگ به دلیل ساختار برش سنگ توسط دیسک کاتر‌ها به طور مستقیم در مدل استفاده شده است.

برای بررسی امکان انتخاب بهترین پارامترها با کمترین همپوشانی و بیش‌ترین تأثیر بر نرخ نفوذ توده سنگ از ابزار تطبیق جعبه‌ابزار شبکه عصبی نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. با استفاده از این ابزار می‌توان رابطه بین چندین داده ورودی و خروجی را بررسی کرد و امکان پیش‌بینی پارامتر هدف و همچنین میزان خطای پیش‌بینی را بررسی کرد؛ بدین منظور این ابزار از یک شبکه پیش‌خور دو لایه با لایه‌های مخفی با تابع سیگموئید و لایه خروجی با تابع خطی استفاده می‌کند. برای آموزش شبکه از الگوریتم پس انتشار خطای لونیگ-مارکوات استفاده شده که سریع‌ترین پاسخ را در بین الگوریتم‌های موجود دارد.

جدول ۳-۱۲ انتخاب پارامترهای موثر در مدل جدید با استفاده از جمع‌بازار شبکه عصبی نرم‌افزار MATLAB

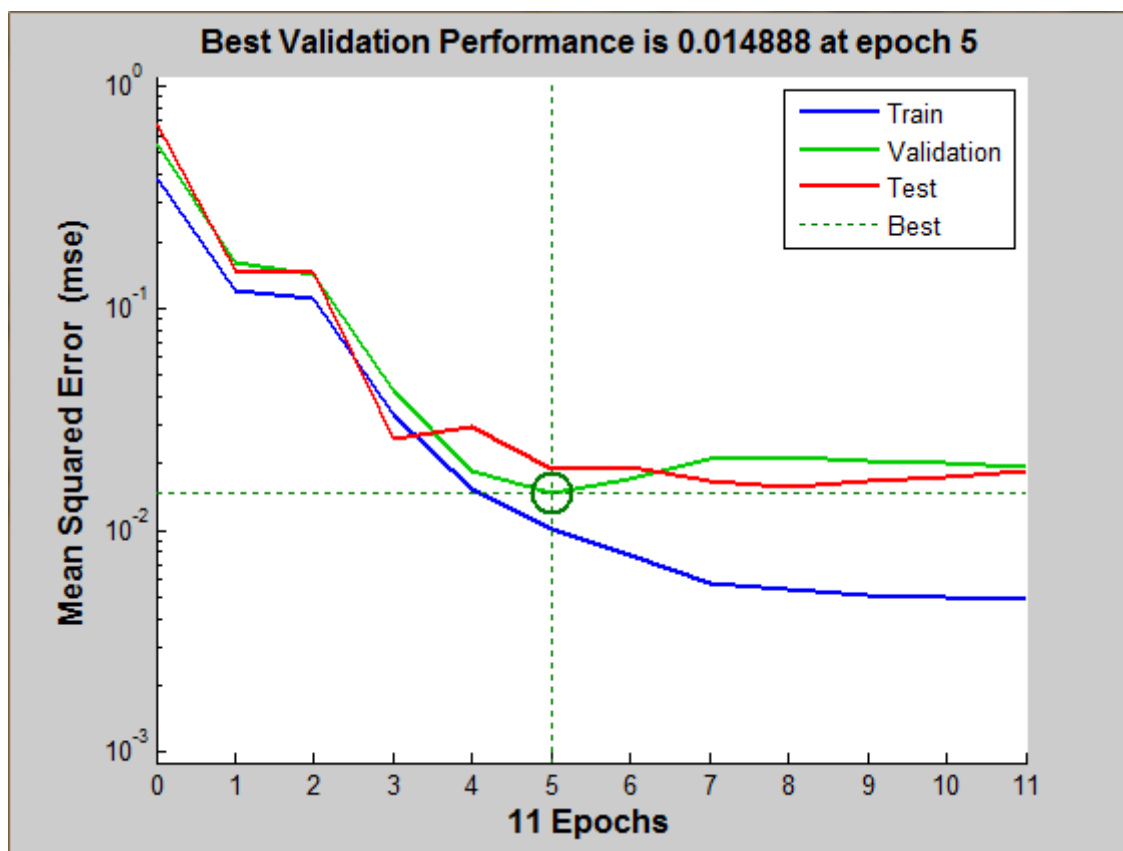
ردیف	Torque	Fn	RPM	overburden	UCS	Quartze Content	E	Dry Density	Porosity	Tensil strength	Joint spacing	RQD	RMR	RMR(adjusted)	Training		Validation		Testing		توضیحات
															R	MSE	R	MSE	R	MSE	
1															0.991	0.00348	0.975	0.01885	0.951	0.01792	استفاده از تمامی پارامترها
2															0.989	0.00522	0.958	0.01471	0.966	0.01523	حذف کمترین پارامترهای خطر از پارامترها
3															0.985	0.00783	0.962	0.01425	0.968	0.01333	حذف برخی چند پارامترها RMR(adj)
4															0.983	0.00863	0.974	0.01280	0.958	0.01491	حذف E porosity از پارامترها به دلیل هم پوشانی با Dry Density
5															0.977	0.01248	0.955	0.01425	0.967	0.01507	حذف Over burden
6															0.980	0.01002	0.973	0.01245	0.957	0.01498	حذف Dry Density به دلیل همپوشانی با پارامترهای دیگر
7															0.966	0.01865	0.947	0.01815	0.977	0.01473	حذف Quartze Content به دلیل تاثیر محدود روی نرخ همبستگی دیگر پارامترها
8															0.961	0.01859	0.973	0.01082	0.936	0.02052	حذف برخی RMR(adj) یا RMR
9															0.974	0.01203	0.974	0.01583	0.932	0.02857	حذف Tensil strength
10															0.609	0.01502	0.821	0.01399	0.497	0.02289	استفاده از پارامترهای مابقی خطر به تنهایی

Torque: ماشین حفار، Fn: نیروی تراست به ازای هر دیسک (MPa)، RPM: سرعت چرخش سرخفاز (دقیقه/دوره)، UCS: مقاومت فشاری تک محوره (MPa)،
 Quartze Content: کوارتز محتوی (%). E: مدول ارتجاعی ماده سنگ (MPa)، Dry Density: وزن مخصوص ماده سنگ (g/cm^3)، Porosity: تخلخل، Tensil strength: مقاومت کششی (MPa)، Joint spacing: فاصله حاری درزه ها (mm)، RQD: اندیس کیفی سنگ (%). RMR: امتیاز کیفی سنگ، RMR(adjusted): امتیاز کیفی سنگ اصلاح شده، R: ضریب همبستگی، Training: آموزش شبکه عصبی مصنوعی، Validation: اعتبار سنجی شبکه عصبی مصنوعی، MSE: میزان خطا

ورودی مدل از چهار پارامتر سرعت چرخش سرحفار، نیروی پیشران به ازای هر کاتر، امتیاز توده سنگ اصلاح شده، مقاومت کششی ماده سنگ تشکیل شده است؛ و پارامتر خروجی نرخ نفوذ (PR) بر حسب (m/s) در نظر گرفته شد.

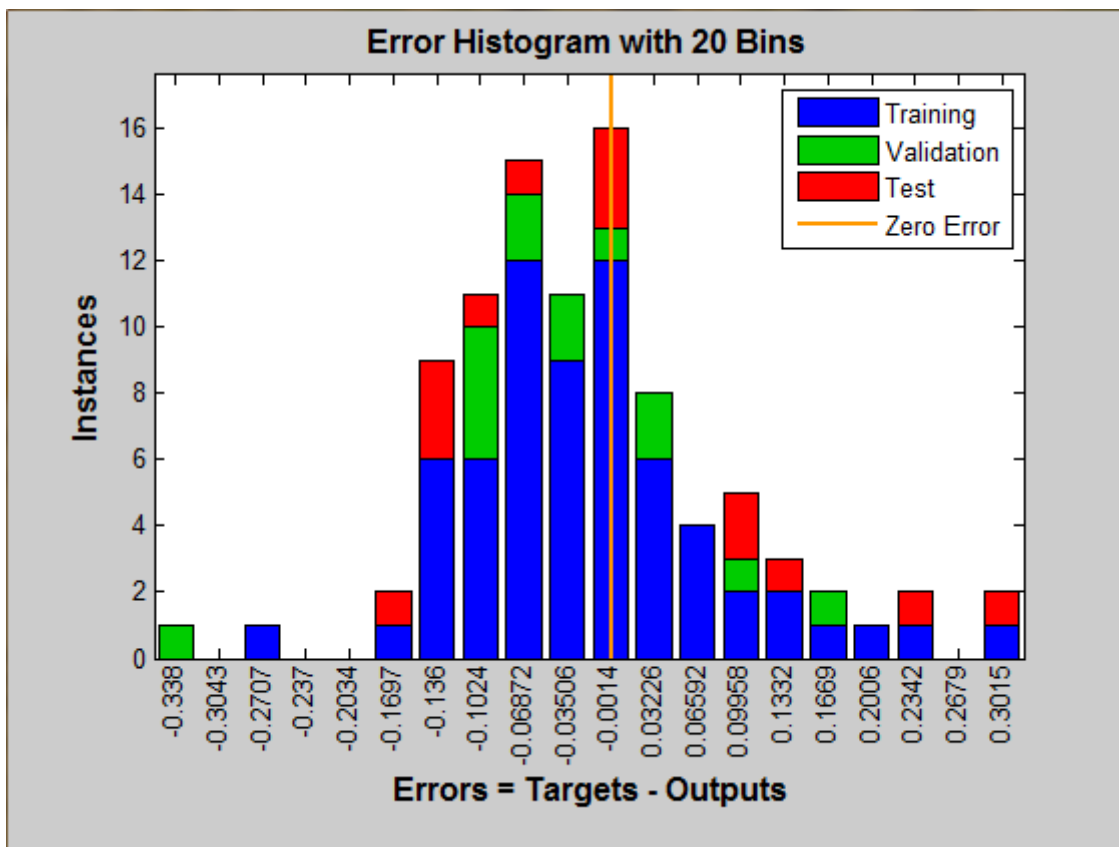
به طور تصادفی ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش، ۱۵٪ داده‌ها برای آزمون، ۱۵٪ داده‌ها برای اعتبارسنجی انتخاب شده اند.

همان طور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، بهترین عملکرد با خطای اعتبارسنجی ۰.۰۱۴۸۸۸ در دوره پنجم به دست آمده است. بهترین عملکرد با خطوط نقطه‌چین نشان داده شده است. خطوط آبی و سبز و قرمز به ترتیب نشان دهنده عملکرد در داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون می‌باشند که عملکرد هر سه به خطوط نقطه‌چین (بهترین عملکرد) نزدیک می‌باشد.



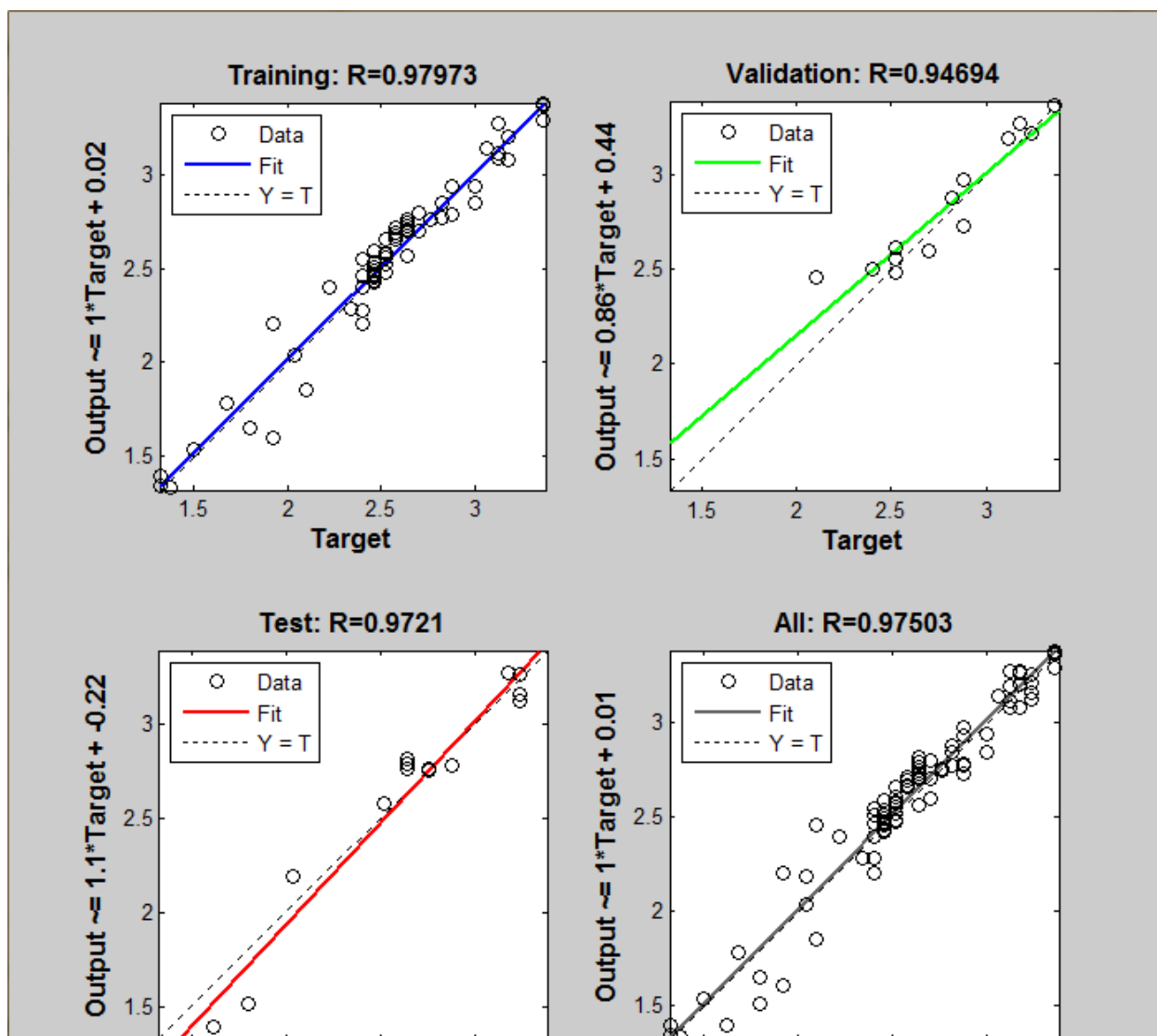
شکل ۲-۳. نمودار عملکرد شبکه در نرم‌افزار Matlab

نمودار هیستوگرام خطا در شکل ۳-۳ نشان داده شده است، هرچه تابع توزیع این نمودار به تابع توزیع نرمال نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر شبکه است.



شکل ۳-۳. نمودار هیستوگرام توزیع خطای شبکه در نرم‌افزار MATLAB

همان‌طور که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است، رابطه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده به وسیله شبکه عصبی و مقادیر واقعی نرخ نفوذ در هر سه مرحله آموزش، اعتبارسنجی و آزمون با ضریب همبستگی R نشان داده شده است و همچنین نیم‌ساز ربع اول به صورت نقطه‌چین مشخص شده است که نتایج در هر سه مرحله نشان‌دهنده دقت بالای مقادیر پیش‌بینی‌شده می‌باشند.



شکل ۳-۴. نمودار رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی در مراحل آموزش، آزمون، اعتبارسنجی، کلیه داده‌ها

۳-۴ بحث و نتیجه گیری

در این فصل ابتدا توضیحات مختصری راجع به شبکه عصبی داده شده است، سپس به شرح نحوه انتخاب پارامترهای موثر در مدل جدید با استفاده از ابزار تطبیقی جعبه ابزار شبکه عصبی نرم افزار MATLAB پرداخته شده است.

به منظور انتخاب پارامترهای موثر در مدل جدید با استفاده از شبکه عصبی ابتدا کلیه پارامترهای موجود در بانک اطلاعاتی از قبیل پارامترهای عملیاتی TBM، پارامترهای توده سنگ و پارامترهای ماده سنگ به عنوان

ورودی شبکه عصبی و پارامتر نرخ نفوذ به عنوان خروجی شبکه عصبی در نظر گرفته شد و قابلیت پیش بینی نرخ نفوذ به وسیله این پارامترها با استفاده از نتایج شبکه عصبی بررسی شد.

به تدریج با حذف پارامترهای با اثر کمتر و همپوشانی بالا و همچنین جایگزین کردن چندین پارامتر با امتیاز رده بندی توده سنگ و بررسی نتایج در هر مرحله بهترین پارامترها انتخاب شدند. این پارامترها عبارت اند از چهار پارامتر سرعت چرخش سرحفار، نیروی پیشران به ازای هر کاتر، امتیاز توده سنگ اصلاح شده، مقاومت کششی ماده سنگ

به منظور بررسی بیشتر جزییات در انتهای فصل نتایج شبکه عصبی با ورودی چهار پارامتر انتخاب شده ارائه شده است.

۴. فصل چهارم

ارائه مدل جدید برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت

۴-۱ مقدمه

تا کنون روش‌های مختلفی برای وزن دهی پارامترهای مختلف موثر در پدیده‌های مکانیک سنگ ارائه شده است. از جمله مشهورترین آن می‌توان به روش تجربی-مقایسه ای و نیز روش سیستم مهندسی سنگ (RES¹) اشاره نمود. در روش تجربی-مقایسه ای، با توجه به تجربیات و مشاهدات صحرایی وزن هر پارامتر به صورت اولیه تعیین می‌شود. سپس وضعیت اصلی و بر جای توده سنگ با وضعیت پیش‌بینی شده مقایسه می‌گردد. در صورت اختلاف بین واقعیت و پیش‌بینی، وزن پارامترها کم و زیاد می‌شود تا جایی که واقعیت با پیش‌بینی مطابقت نماید. در این صورت امتیازدهی نهایی به دست می‌آید. (سینگ و گوئل، ۱۳۸۲).

در سیستم مهندسی سنگ کلیه پارامترهای موثر در یک پدیده، در یک ماتریس اندر کنش به صورت کلی آورده می‌شوند. سپس هر یک از سلول‌های ماتریس فوق با توجه به تجربیات افراد محقق به ازای اهمیت نسبی یک پارامتر نسبت به کل پدیده با یک امتیاز مخصوص پر می‌شوند. با انجام محاسبات ریاضی مربوطه، یک نمودار اثر-تاثیر بین پارامترها رسم می‌شود. با استفاده از این نمودار، موثرترین، کم‌ترین، غالب‌ترین و بااهمیت‌ترین پارامتر یک پدیده مشخص می‌شود. پس از این مرحله و پس از تعیین اهمیت نسبی پارامترها وزن پیشنهادی به هر پارامتر اختصاص می‌یابد. (سینگ و گوئل، ۱۳۸۲)

از جمله جدیدترین روش‌های موجود برای وزن دهی به پارامترهای موثر در یک پدیده در مهندسی سنگ می‌توان به روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره از جمله روش وزن دهی ساده، روش شباهت به گزینه ایده آل، روش تحلیل سلسله مراتبی و روش تسلط تقریبی اشاره نمود.

روش تجربی-مقایسه ای و نیز روش سیستم مهندسی سنگ تا حد زیادی به تجربه و مشاهدات افراد بسیار معدودی وابسته بوده و لذا دایره تجربیات استفاده‌شده در ورای این روش‌ها محدودتر است. در این صورت، امکان اشتباه زیادی برای کاربر وجود دارد. در روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره از نظرات و تجربیات تعداد کثیری از متخصصان یک رشته استفاده می‌شود و لذا دایره تجربیات پشتوانه روش، بسیار بیشتر از سایر روش‌ها بوده و این سیستم‌ها از کارایی بالایی برخوردارند. همچنین وجود پارامتری به نام نرخ ناسازگاری که

¹ -Rock Engineering System

در ادامه توضیح داده می‌شود یک تدبیر بسیار خوب برای کنترل ارزش پارامترها نسبت به هم به شمار می‌رود که این تدبیر در سایر روش‌ها وجود ندارد. (عطایی و همکاران، ۱۳۸۹)

در این تحقیق با توجه به قابلیت و شهرت بیشتر، روش تحلیل سلسله مراتبی برای وزن دهی پارامترهای موجود در نرخ نفوذ و اصلاح آن مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به فصل شماره ۳ چهار عامل زیر به عنوان پارامترهای مورد استفاده در مدل جدید می‌باشند:

(۱) سرعت چرخش سر حفار (RPM)

(۲) نیروی پیشران به ازای هر کاتر (Fn)

(۳) امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده (RMR_{ad})

(۴) مقاومت کششی (TS)

لذا در این مدل با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی، این پارامترها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه ابتدا توضیحاتی در رابطه با تئوری تحلیل سلسله مراتبی فازی (FDAHP) داده شده است، سپس به شرح نحوه ارائه مدل جدید پرداخته شده است؛ و مراحل مختلف تعیین وزن‌ها پارامترهای فوق آورده شده است.

۴-۲ تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)^۱

در روش دلفی، پیش‌بینی‌های ارائه‌شده توسط افراد خبره در قالب اعداد قطعی بیان می‌گردند، درحالی‌که استفاده از اعداد قطعی برای پیش‌بینی‌های بلندمدت، آن‌را از دنیای واقعی دور می‌سازد. از طرفی افراد خبره از شایستگی‌های و توانایی‌های ذهنی خود برای پیش‌بینی استفاده می‌نمایند و این نشان می‌دهد که عدم قاطعیت حاکم بر این شرایط از نوع امکانی است نه احتمالی. امکانی بودن عدم قاطعیت، با مجموعه‌های فازی سازگاری دارد و بنابراین بهتر آن است که با استفاده از مجموعه‌های فازی (با به‌کارگیری اعداد فازی)

¹ . Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process

به پیش‌بینی بلندمدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخته می‌شود. بدین ترتیب اطلاعات لازم را در قالب زبان طبیعی از خبرگان اخذ نموده و مورد تحلیل قرار داده می‌شود. این روش تحلیل، روش دلفی فازی نامیده می‌شود. (عطایی، ۱۳۸۹)

گونه‌های مختلف از اعداد فازی را می‌توان برای اخذ نظرات خبرگان مورد استفاده قرارداد، اما در این تحقیق برای سهولت انجام محاسبات از اعداد فازی مثلثی استفاده خواهد شد. مراحل اجرای روش دلفی به شرح زیر است:

۴-۲-۱ نظرسنجی از متخصصان

در این مرحله ابتدا از متخصصان مختلف در مورد پارامترهای مؤثر بر یک پدیده یا تصمیم به صورت کیفی یا در صورت امکان کمی نظرسنجی به عمل می‌آید.

۴-۲-۲ محاسبه اعداد فازی

برای محاسبه اعداد فازی (\tilde{a}_{ij}) نظرات حاصل از نظرسنجی از متخصصان به طور مستقیم مد نظر قرار می‌گیرد. اعداد فازی در این مرحله را می‌توان بر اساس توابع عضویت مختلف همچون روش مثلثی و یا حالت دوزنقه‌ای محاسبه نمود. با توجه به کاربرد زیاد و سهولت محاسبه روش مثلثی محاسبه اعداد فازی در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

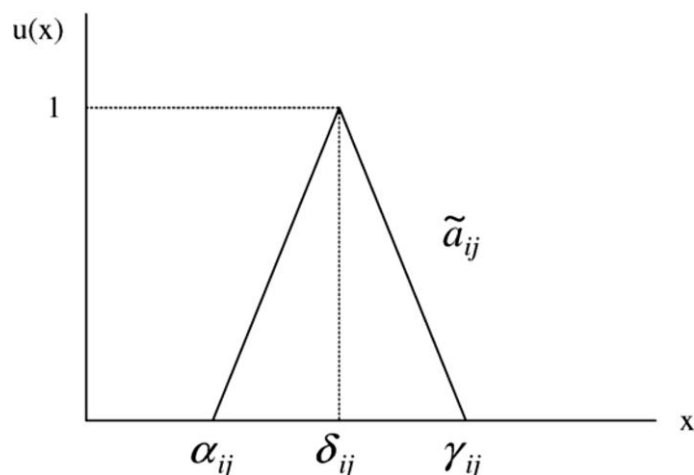
با توجه به شکل ۲-۳، در حالت کلی در روش فازی دلفی یک عدد فازی به صورت رابطه ۵-۱ تا ۴-۵ تعریف می‌شود (Ya-Ching liu 2007).

$$a_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (1-4)$$

$$\alpha_{ij} = \text{Min}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (2-4)$$

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n}, k = 1, \dots, n \quad (3-4)$$

$$\gamma_{ij} = \text{Max}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (4-4)$$



شکل ۴-۱. تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی (Liu & Chen, 2007)

در روابط فوق $\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij} \in [1/9, 1] \cup [1, 9]$ می باشد. با توجه به شکل ۴-۱، حد بالای نظرات داوران، α_{ij} حد پائین نظرات داوران و β_{ijk} نشان دهنده اهمیت نسبی پارامتر i بر پارامتر j دیدگاه متخصص k است.

۴-۲-۳ تشکیل ماتریس معکوس فازی

در این مرحله با توجه به اعداد فازی به دست آمده در مرحله قبل ماتریس مقایسه زوجی فازی بین پارامترها مختلف به شرح رابطه ۵-۵ تشکیل می شود (Ya-Ching liu 2007).

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}], \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} \approx 1, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5-4)$$

یا به صورت:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (\alpha_{12}, \delta_{12}, \gamma_{12}) & (\alpha_{13}, \delta_{13}, \gamma_{13}) \\ (1/\gamma_{12}, 1/\delta_{12}, 1/\alpha_{12}) & (1, 1, 1) & (\alpha_{23}, \delta_{23}, \gamma_{23}) \\ (1/\gamma_{13}, 1/\delta_{13}, 1/\alpha_{13}) & (1/\gamma_{23}, 1/\delta_{23}, 1/\alpha_{23}) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

۴-۲-۴ محاسبه وزن فازی نسبی پارامترها (Ya-Ching liu 2007)

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n}, \tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n) \quad (6-4)$$

که در آن $\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 = (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$ بوده و \otimes نماد ضرب اعداد فازی و \oplus نماد جمع اعداد فازی است. \tilde{W}_i یک بردار سطری است که نشان دهنده وزن فازی پارامتر \tilde{a}_i می‌باشد.

۴-۲-۵ غیر فازی کردن وزن پارامترها

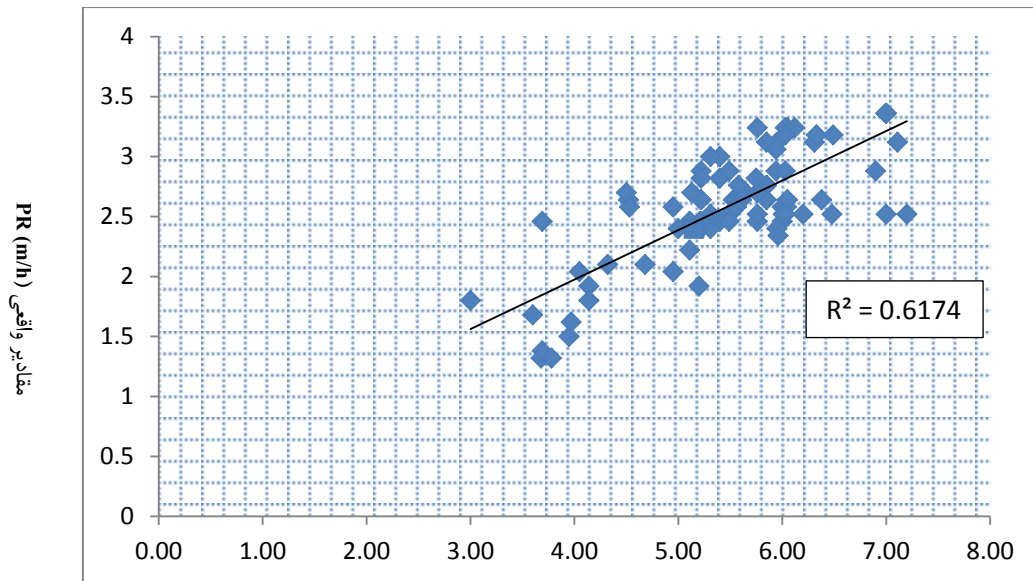
پس از یافتن وزن فازی نهایی هر یک از پارامترها، کلیه اعداد به دست آمده با استفاده از رابطه ۳-۱۰ به حالت غیر فازی تبدیل شده و تنها به صورت یک عدد بیان می‌شوند (Ya-Ching liu 2007).

$$W_i = (\prod_{j=1}^3 \omega_j)^{1/3} \quad (7-4)$$

همان طور که ملاحظه می‌شود، از آن جایی که تکنیک فازی دلفی بر مبنای تجربیات و نظرات تعدادی از متخصصان یک علم استوار است، لذا به نظر می‌رسد نتایج به دست آمده از این روش می‌تواند رهیافت مناسبی برای ارزیابی اهمیت پارامترهای مؤثر بر یک پدیده و یک مفهوم باشد. به استناد تمامی منطقی‌های ریاضی و به ویژه خاصیت فوق، در ادامه این تحقیق از این تکنیک برای ارزیابی پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری استفاده خواهد شد. (عطایی، ۱۳۸۹)

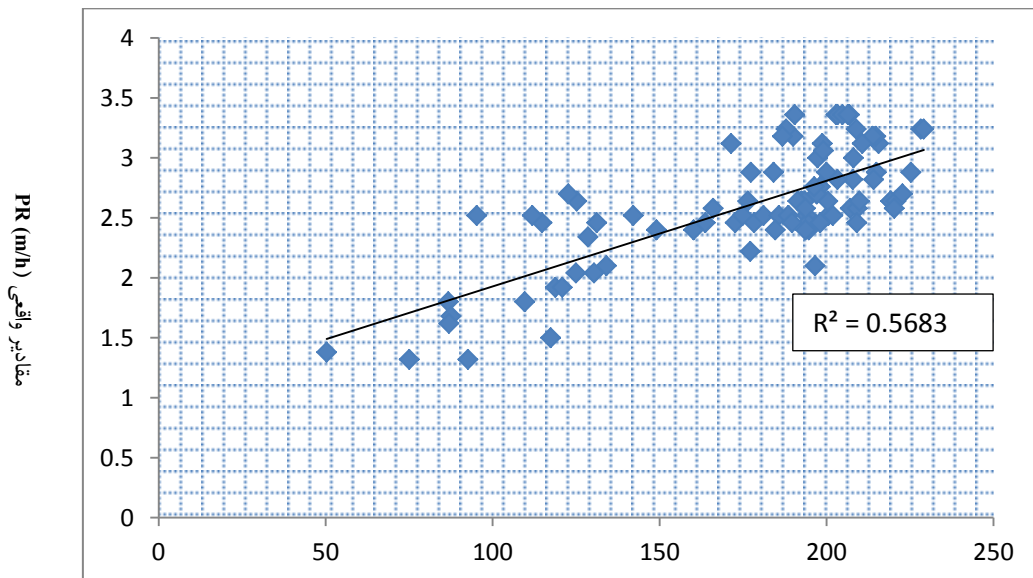
۴-۳ بررسی رابطه هریک از پارامترها با نرخ نفوذ

به منظور بررسی رابطه بین پارامترهای پیشنهادی برای مدل جدید با نرخ نفوذ، با استفاده از تحلیل رگرسیونی رابطه هریک از پارامترها به طور جداگانه با نرخ نفوذ بررسی شد. در محور قائم مقادیر واقعی نرخ نفوذ قرار دارد و در محور افقی هر یک از پارامترهای پیشنهادی به طور جداگانه قرار داده شده است. در شکل ۴-۲ رابطه بین سرعت چرخش سرحفار با نرخ نفوذ نشان داده شده است که نسبت به پارامترهای ورودی دیگر دارای ضریب تعیین بالاتری می‌باشد.



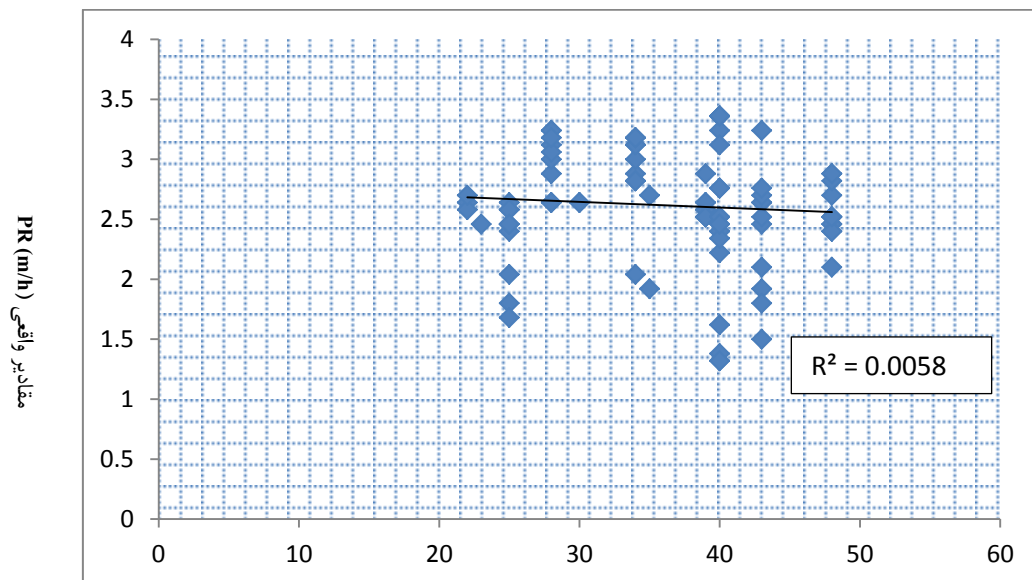
شکل ۲-۴. بررسی رابطه بین سرعت چرخش سرحفار با نرخ نفوذ

در شکل ۳-۴ رابطه بین نیروی پیشران به ازای هر کاتر با نرخ نفوذ نشان داده شده است که پس از سرعت چرخش سرحفار در جایگاه اهمیت دوم قرار می‌گیرد.



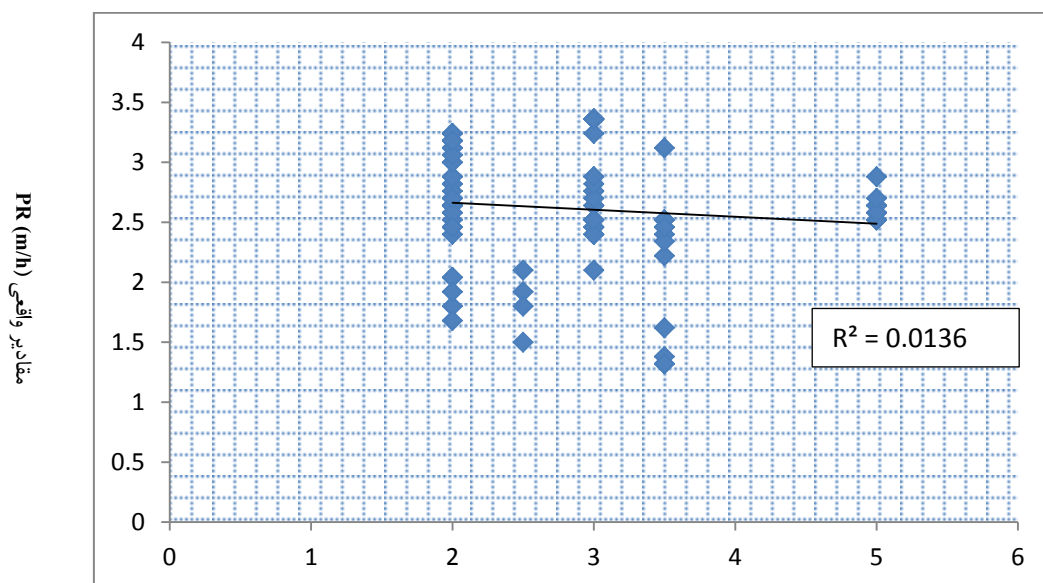
شکل ۳-۴. رابطه نیروی پیشران به ازای هر کاتر با نرخ نفوذ

در شکل ۴-۴ رابطه بین امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده با نرخ نفوذ نشان داده شده است که ضریب تعیین بسیار پایینی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴. رابطه بین امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده با نرخ نفوذ

و همچنین در شکل ۴-۵ رابطه بین مقاومت کششی ماده سنگ با نرخ نفوذ نشان داده شده است که ضریب تعیین بسیار پایینی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵. رابطه بین مقاومت کششی ماده سنگ با نرخ نفوذ

۴-۴ نظرسنجی از متخصصان

به منظور استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی جهت تعیین وزن پارامترها، فرم‌های نظرسنجی شامل پارامترهای چهارگانه مذکور تهیه شده و جهت تکمیل شدن برای اساتید برجسته داخل و خارج از کشور ارسال گردید. جدول زیر نمونه‌ای از فرم‌های نظرسنجی را نشان می‌دهد. در این فرم از متخصصان خواسته شده بود بسته به نظر شخصی خویش و به میزان اهمیت هر یک از پارامترها امتیاز ۱ تا ۹ را اختصاص دهند.

جدول ۱-۴. نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده

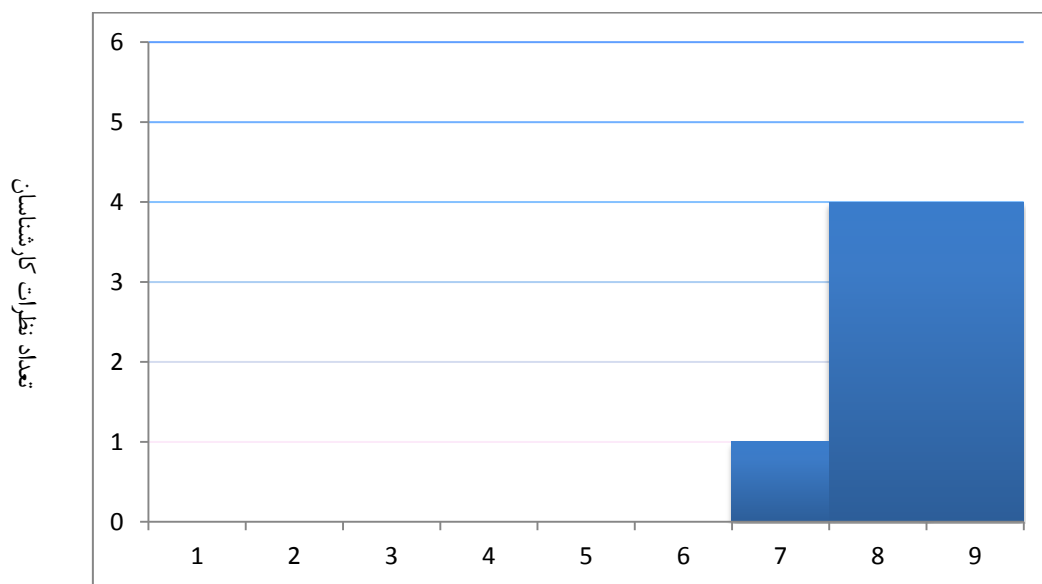
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	اهمیت هر یک از پارامترها
									سرعت چرخش سر حفار (RPM)
									نیروی پیشران به ازای هر کاتر (F_n)
									امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده (RMR_{ad})
									مقاومت کششی (TS)

با توجه به فرم‌های موجود، ۹ ماتریس مقایسه زوجی متناظر با هر یک از پارامترها بر اساس نظر متخصصان تشکیل شد. نتایج کلی نظرسنجی‌ها در جدول ۲-۴ آورده شده است. به منظور بررسی فراوانی امتیازات اختصاص یافته به پارامترهای موثر توسط متخصصان، هیستوگرام مربوط به هر پارامتر طبق شکل‌های ۴-۷ تا ۴-۱۰ رسم شده‌اند.

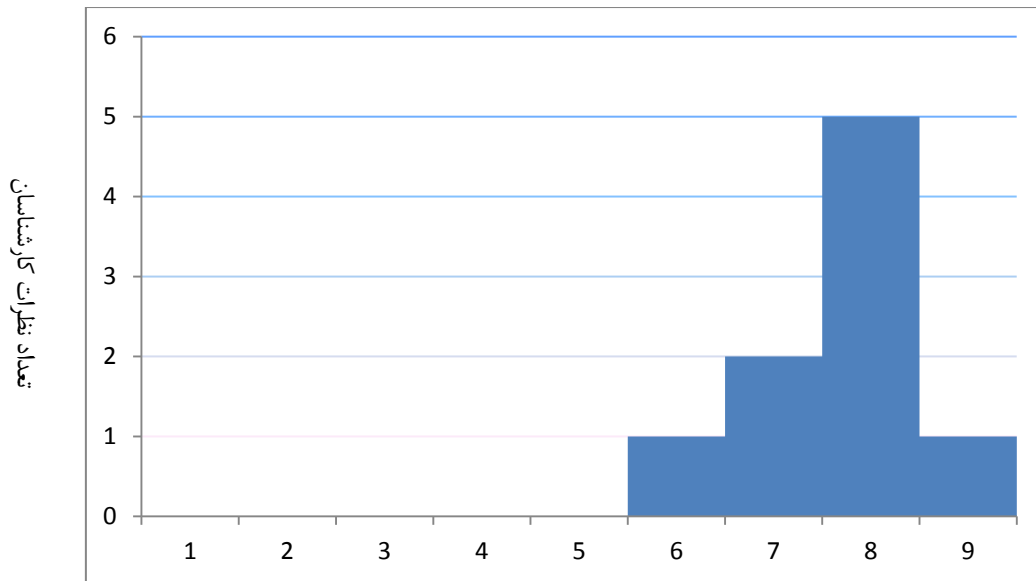
جدول ۲-۴. نتایج کلی نظرسنجی‌ها

۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ماتریس‌های مقایسه زوجی
9	9	9	8	7	8	8	9	8	سرعت چرخش سر حفار (RPM)
8	8	9	8	7	8	8	7	6	نیروی پیشران به ازای هر کاتر (F_n)
8	8	9	8	7	4	4	6	5	امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده (RMR_{ad})
3	3	6	5	4	4	4	7	5	مقاومت کششی (TS)

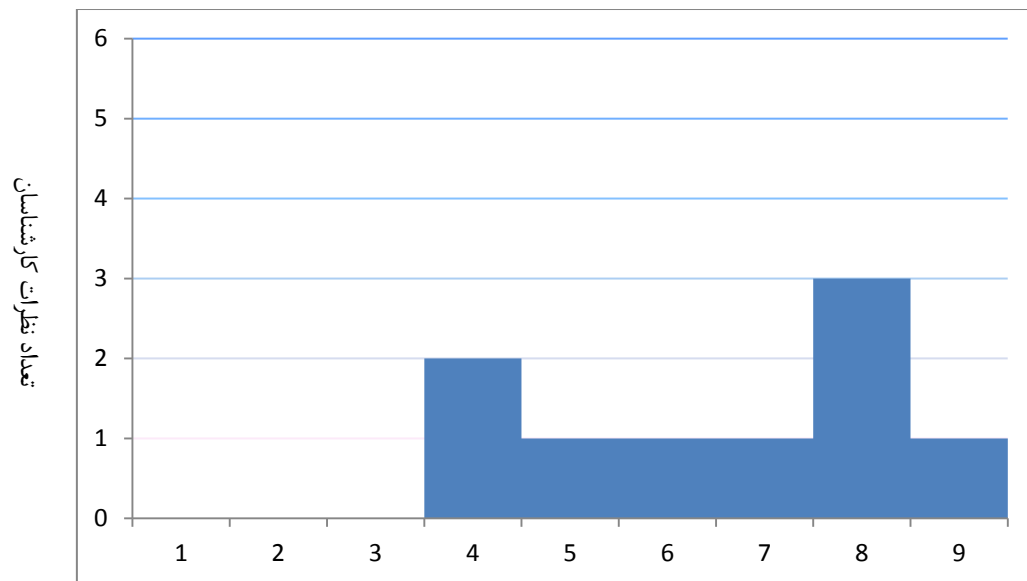
در شکل ۴-۶ فراوانی امتیاز ۸ و ۹ نشان‌دهنده اهمیت بسیار زیاد پارامتر سرعت چرخش سر حفار است. با توجه به شکل ۴-۷ مشخص می‌شود که هیستوگرام فراوانی امتیازات نیروی پیشران به ازای هر کاتر نسبت به امتیاز ۸ متقارن است و امتیاز ۸ بیش‌ترین فراوانی را به خود اختصاص داده و لذا تقریباً بیش از نیمی از متخصصان، نیروی پیشران به ازای هر کاتر را عامل با اهمیتی تشخیص داده‌اند. هیستوگرام متناظر با امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده، شکل ۴-۸ نشان می‌دهد نظرات متخصصان در مورد این پارامتر از پراکندگی بالایی برخوردار است. هیستوگرام متناظر با امتیازات مقاومت کششی شکل ۴-۹ بیش‌ترین فراوانی را در امتیاز ۴ دارد و چولگی مثبت موجود در هیستوگرام نشان‌دهنده اهمیت کمتر پارامتر مقاومت کششی است.



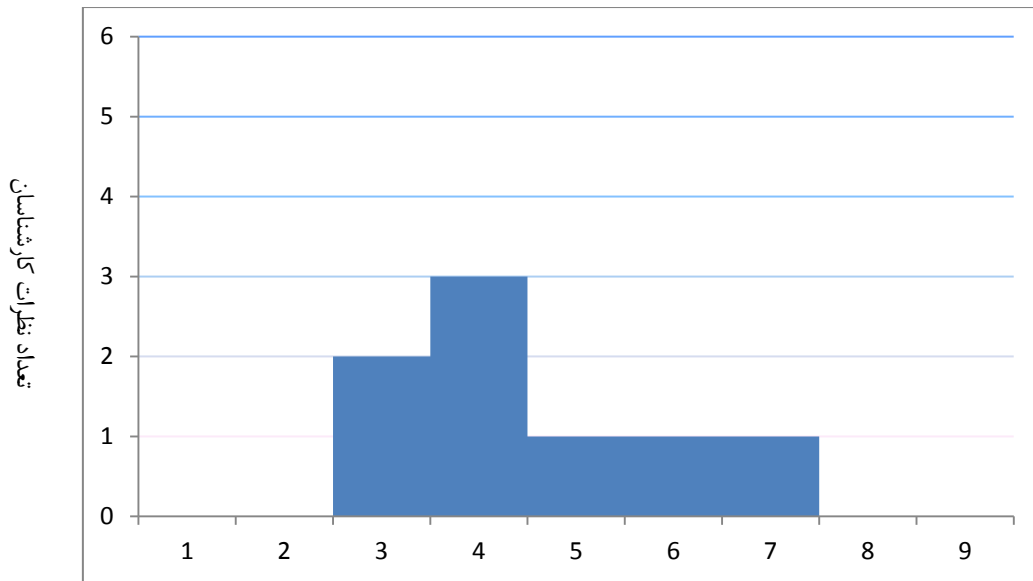
شکل ۴-۶. هیستوگرام فراوانی امتیاز سرعت چرخش سر حفار با توجه به نظر متخصصان



شکل ۴-۷. هیستوگرام فراوانی امتیاز نیروی پیشران به ازای هر کاتر با توجه به نظر متخصصان

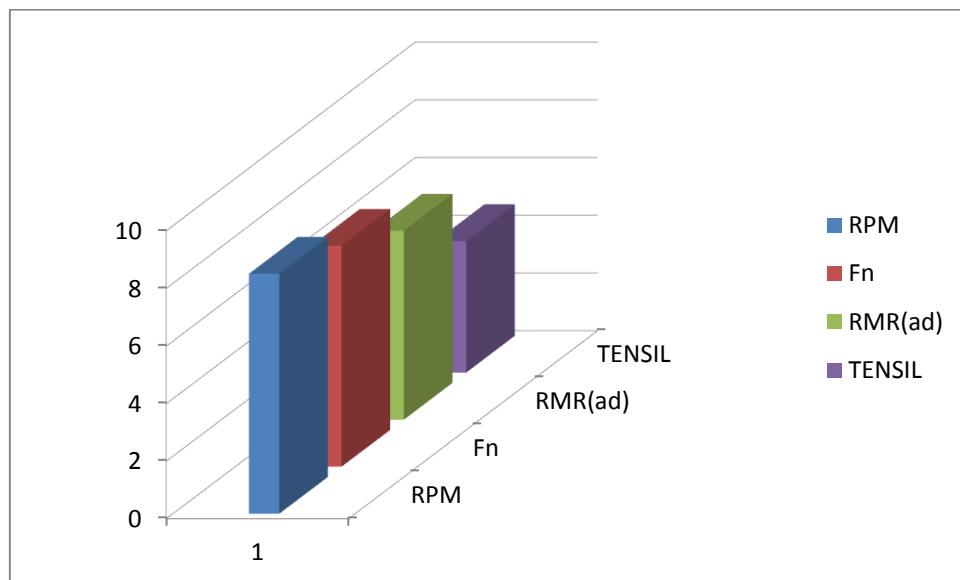


شکل ۴-۸. هیستوگرام فراوانی امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده با توجه به نظر متخصصان



شکل ۴-۹. هیستوگرام فراوانی مقاومت کششی با توجه به نظر متخصصان

چنانچه از شکل ۴-۱۰ نتیجه می‌شود سرعت چرخش سر حفار بیش‌ترین امتیاز و مقاومت کششی کمترین امتیاز را کسب نموده‌اند.



شکل ۴-۱۰. نمودار ستونی میانگین امتیاز هر یک از پارامترها با توجه به نظر متخصصان

۴-۵ یافتن وزن پارامترها با استفاده از روش FDAHP

پس از انجام نظرسنجی و ارزیابی نتایج حاصل از آن، کلیه نتایج حاصله برای تشکیل ماتریس مقایسه زوجی اصلی پارامترها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در تشکیل ماتریس مذکور با توجه به سابقه کاربرد روش FDAHP در طبقه‌بندی توده سنگ‌های شیروانی (Ya-Ching liu 2007)، از تابع عضویت مثلثی و در نتیجه اعداد فازی مثلثی طبق شکل ۵-۲ و روابط ریاضی ۵-۱ تا ۵-۴ استفاده شده است، توابع عضویت مثلثی با وجود سادگی، مفهوم فازی بودن کمیت‌ها را به صورت مطلوبی مدل می‌کنند. جدول ۴-۴ ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین چهار پارامتر نظرسنجی را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳. ماتریس مقایسه زوجی فازی-دلفی بین چهار پارامتر نظرسنجی شده

TENSIL	(RMR _{ad})	TRUST	RPM	
(1.285714, 1.930979, 3)	(1, 1.319801, 2)	(1, 1.089874, 1.333333)	(1, 1, 1)	RPM
(1, 1.771744, 2.666667)	(1, 1.210966, 2)	(1, 1, 1)	(0.75, 0.917537, 1)	TRUST
(0.857143, 1.463083, 2.666667)	(1, 1, 1)	(0.5, 0.825787, 1)	(0.5, 0.75769, 1)	(RMR _{ad})
(1, 1, 1)	(0.375, 0.697475, 1.166667)	(0.375, 0.575966, 1)	(0.333333, 0.597082, 0.777778)	TENSIL

کلیه محاسبات ریاضی مربوطه ذکر شده در بخش ۴-۲، در شکل ۴-۱۱ آورده شده است، وزنهای غیر فازی هر یک از پارامترها نشان داده شده است.

Z		
1.285714	2.777554	8
0.75	1.968596	2.666667
0.214286	0.915437	2.666667
0.046875	0.239861	0.907407

Z_i		
1.064844	1.290968	1.681793
0.930605	1.184511	1.277886
0.680375	0.978154	1.277886
0.465302	0.699826	0.976002

W_i		
0.204245	0.310818	0.535411
0.178497	0.310818	0.535411
0.130501	0.235503	0.406824
0.089248	0.168492	0.310717

W	
0.323928	RPM
0.3097	TRUST
0.232099	RMR(ad)
0.167179	TENSIL

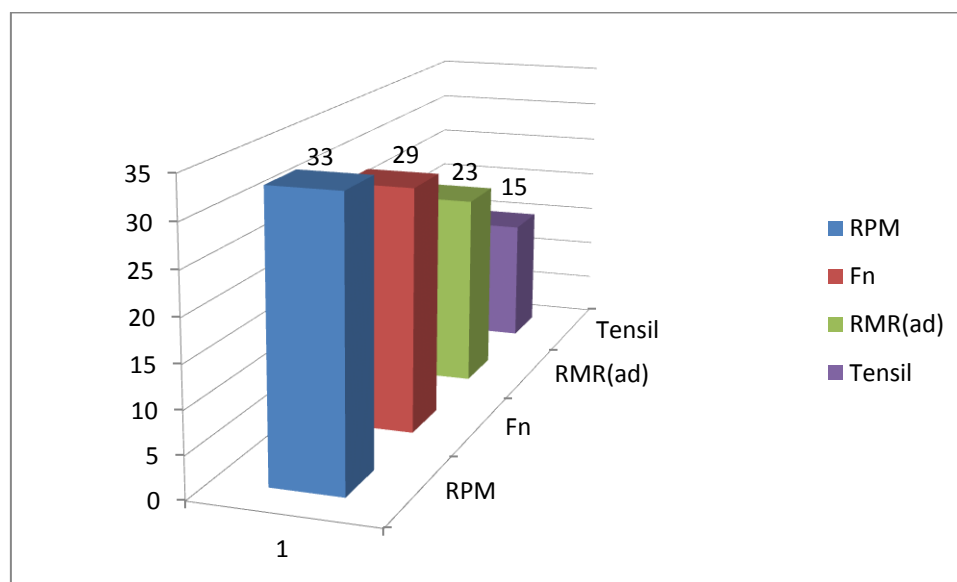
شکل ۴-۱۱. محاسبات ریاضی مربوط به تعیین وزن با استفاده از FDAHP

امتیاز نهایی پارامترها در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴-امتیاز هر یک از پارامترها

امتیاز	
RPM	33
Fn	29
RMR(ad)	23
Tensil	15
جمع امتیازات	100

چنانچه در شکل ۴-۱۲ دیده می‌شود چهار پارامتر مذکور دارای امتیازهای متفاوتی هستند. در این میان سرعت چرخش سر حفار دارای بیشترین امتیاز و مقاومت کشش دارای کمترین امتیاز است.



شکل ۴-۱۲. نمودار ستونی امتیاز هر یک از پارامترها

۴-۶ پیشنهاد مدلی جدید برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت

یکی از بهترین روش‌ها برای در نظر گرفتن وزن پارامترها در یک مسئله مهندسی سنگ، استفاده از طبقه بندی مهندسی است. لذا در این تحقیق چهار پارامتر مذکور به عنوان پارامترهای ورودی یک سیستم طبقه‌بندی جدید مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

برای ارائه طبقه‌بندی جدید نیاز است تا هر چهار پارامتر سرعت چرخش سر حفار، نیروی پیشران به ازای هر کاتر، امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده، مقاومت کششی، به تنهایی طبقه‌بندی گردیده و مورد امتیازدهی قرار گیرند. با توجه به اهمیت نسبی پارامترهای مورد استفاده مجموع امتیازات ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. امتیازات بالاتر دلیل بر امکان نفوذ بیشتر TBM در سنگ سخت است.

هوک و براون دریافتند که یک سیستم طبقه‌بندی باید غیرخطی باشد تا به طور واقعی بتوان به طبقه‌بندی توده سنگ‌های ضعیف پرداخت؛ بنابراین در سیستم طبقه‌بندی جدید، به منظور امتیازدهی به دسته‌های مختلف هر پارامتر، به ترتیب ۷۰٪، ۵۰٪، ۲۵٪، ۱۰٪ امتیاز ماکزیمم، اختصاص یافته است (اعداد بسته به شرایط گرد شده‌اند). با ترتیب امتیازدهی فوق، سعی شده سیستم طبقه‌بندی غیرخطی باشد. امتیازدهی در پارامترهای سرعت چرخش سر حفار، نیروی پیشران به ازای هر کاتر به صورت صعودی بوده است و در پارامترهای امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده، مقاومت کششی به صورت نزولی بوده است.

برای طبقه‌بندی سرعت چرخش سر حفار بازه ۰ تا ۸ به پنج بازه مساوی ۲۰٪ تقسیم شده است. برای طبقه‌بندی نیروی پیشران به ازای هر کاتر بازه ۰ تا ۳۰۰ به پنج بازه مساوی ۲۰٪ تقسیم شده است. برای طبقه‌بندی امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده بازه ۰ تا ۱۰۰ به پنج بازه مساوی ۲۰٪ تقسیم شده است. برای طبقه‌بندی مقاومت کششی از طبقه‌بندی پیشنهادی عطایی و همکاران (۱۳۸۹) استفاده شده است.

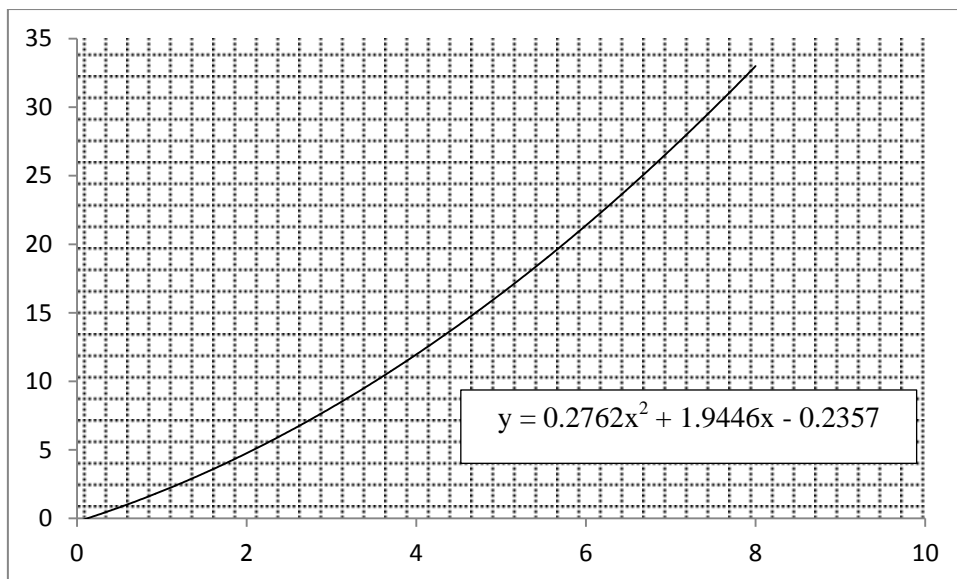
با توجه به تمامی مطالب ارائه‌شده در بالا در مجموع ساختار کلی طبقه‌بندی مدل جدید پیشنهادی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت به صورت جدول ۴-۵ قابل ارائه است.

جدول ۴-۵. ساختار کلی طبقه‌بندی پیشنهادی مدل جدید

ردیف‌های ارزش					پارامترها	
۰-۱.۶	۱.۶-۳.۲	۳.۲-۴.۸	۴.۸-۶.۴	۶.۴-۸	RPM	۱
۳.۳	۸.۲۵	۱۶.۵	۲۳.۱	۳۳	امتیاز	
۰-۶۰	۶۰-۱۲۰	۱۲۰-۱۸۰	۱۸۰-۲۴۰	۲۴۰-۳۰۰	Fn	۲
۲.۹	۷.۲۵	۱۴.۵	۲۰.۳	۲۹	امتیاز	
۰-۲۰	۲۰-۴۰	۴۰-۶۰	۶۰-۸۰	۸۰-۱۰۰	RMR _{ad}	۳
۲۳	۱۶.۱	۱۱.۵	۵.۷۵	۲.۳	امتیاز	
۰-۲	۲-۴	۴-۸	۸-۱۲	۱۲<	TS	۴
۱۵	۱۰.۵	۷.۵	۳.۷۵	۰	امتیاز	

به منظور سهولت کاربرد و نیز رفع اشکال امتیازدهی گسسته در طبقه‌بندی فوق یک سری محاسبات رگرسیونی انجام گرفت تا روابط ریاضی بین مقدار پارامترها و امتیاز کسب‌شده ارائه شود. اشکال ۴-۱۳ تا ۴-۱۶ منحنی‌های امتیازدهی پیوسته به پارامترهای مختلف مورد استفاده را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد.

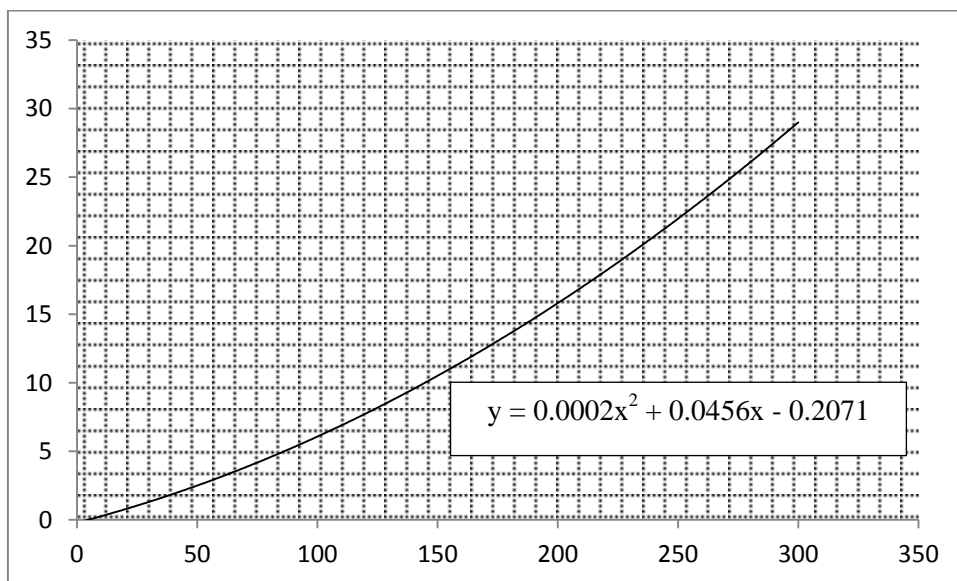
امتیاز



سرعت چرخش سر حفار (دقیقه / دور)

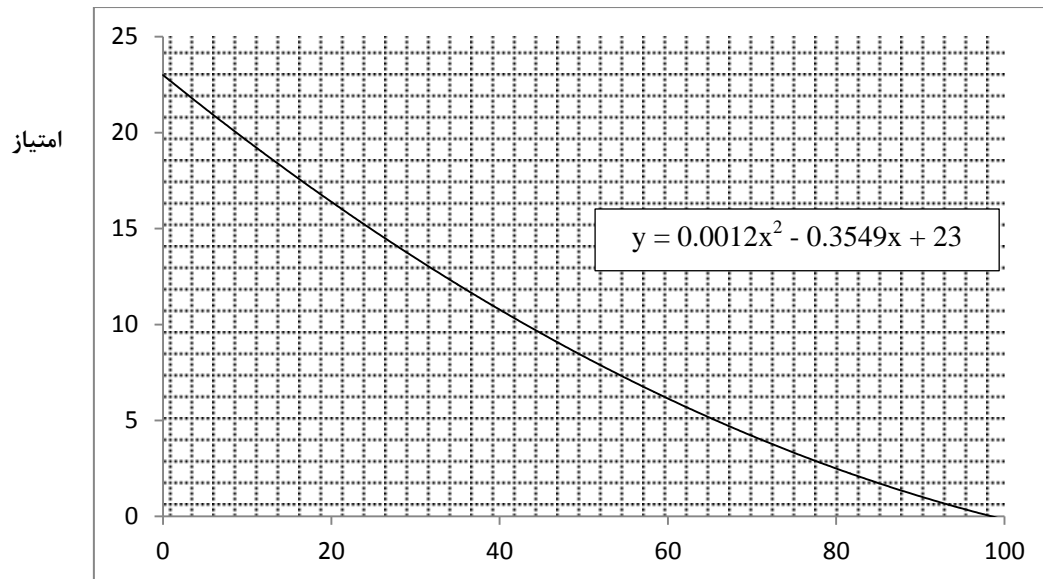
شکل ۴-۱۳. منحنی امتیازدهی پیوسته به سرعت چرخش سر حفار

امتیاز



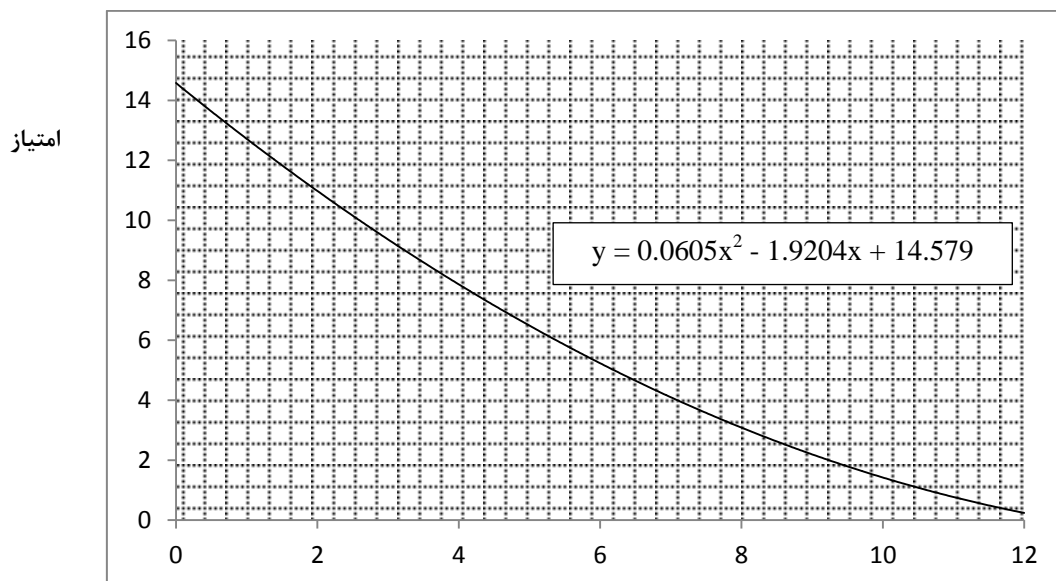
نیروی پیشران به ازای هر کاتر (KN)

شکل ۴-۱۴. منحنی امتیازدهی پیوسته به نیروی پیشران به ازای هر کاتر



امتیاز رده بندی توده سنگ اصلاح شده

شکل ۴-۱۵. منحنی امتیازدهی پیوسته به امتیاز رده بندی توده سنگ اصلاح شده



مقاومت کششی (MPa)

شکل ۴-۱۶. منحنی امتیازدهی پیوسته به طبقه بندی مقاومت کششی

چنانچه در این منحنی ها ملاحظه می شود با در دست بودن مقادیر مربوط به هر یک از پارامترها به راحتی می توان امتیاز هر پارامتر را تعیین نمود. با جمع امتیازهای به دست آمده از این منحنی ها میزان شاخص مدل جدید و نیز کلاس آن مشخص می شود.

۴-۷ بحث و نتیجه گیری

- در این فصل ابتدا توضیحاتی درباره روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی داده شده است. سپس به بدست آوردن وزن هر پارامتر و بازه بندی هر کدام از آن ها پرداخته شده است؛ و امتیاز دهی هر پارامتر به طور جداگانه به دو طریق گسسته و پیوسته صورت گرفته است.

- همچنین رابطه مقادیر هریک از پارامترهای موثر در مدل جدید به طور جداگانه با نرخ نفوذ بررسی شد؛ که پارامترهای سرعت چرخش سرحفار و نیروی پیشران به ازای هر کاتر رابطه متوسطی با مقادیر واقعی نرخ نفوذ از خود نشان دادند. و پارامترهای مقاومت کششی و امتیاز توده سنگ اصلاح شده رابطه بسیار پایینی را از خود نشان دادند؛ که خود نشان دهنده پیچیده بودن مساله پیش بینی نرخ نفوذ می باشد.

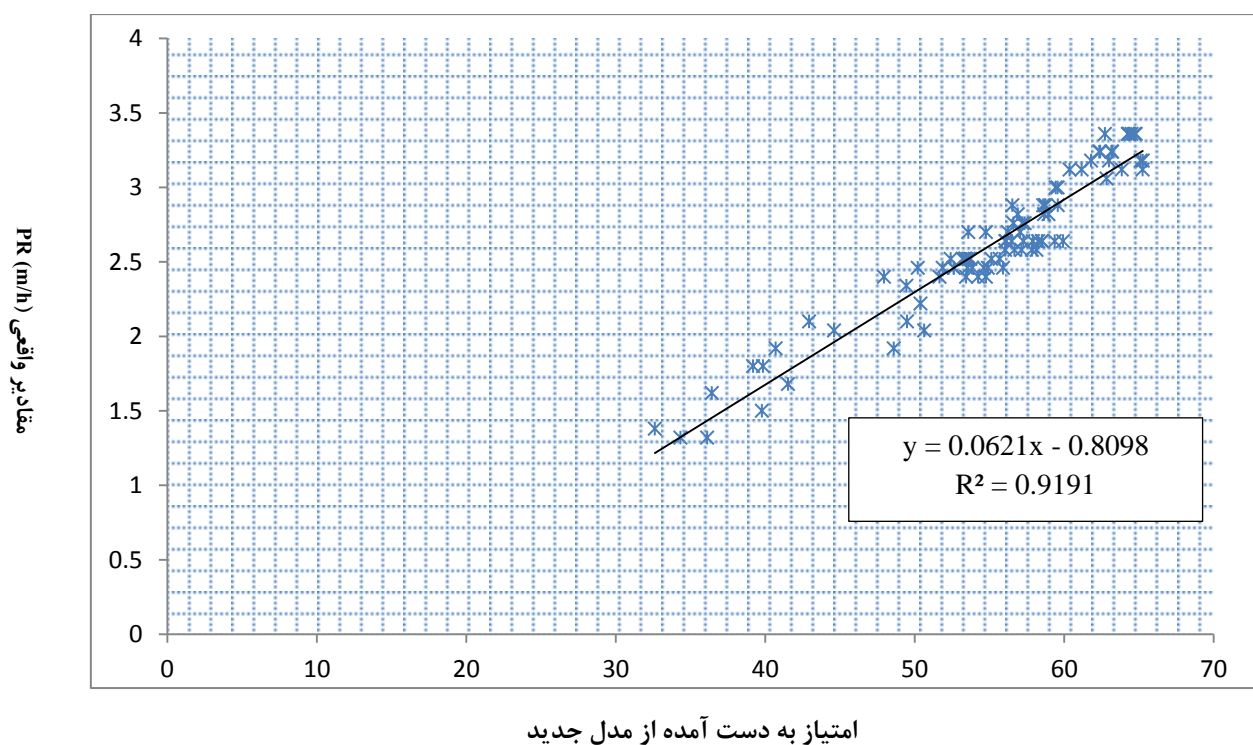
۵. فصل پنجم

اعتبارسنجی مدل جدید و مقایسه با مدل‌های دیگر

۱-۵ اعتبارسنجی مدل جدید

به منظور اعتبارسنجی مدل جدید از تعدادی داده جمع‌آوری شده از ۱۸ منطقه با خصوصیات ژئومکانیکی مختلف استفاده شد و با اطلاعات ثبت‌شده عملکرد ماشین حفار ترکیب شد. با استفاده از مدل ارائه‌شده امتیاز هر یک از پارامترهای موثر در مدل توسط نمودار امتیازدهی پیوسته مربوطه به دست آمد و با یکدیگر جمع گردید؛ و با استفاده از تحلیل رگرسیونی رابطه ریاضی بین امتیاز به دست آمده توسط مدل و مقادیر ثبت‌شده نرخ نفوذ به دست آورده شد. در شکل رابطه ریاضی و همچنین ضریب تعیین تعیین بین امتیاز به دست آمده از مدل و مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM نشان داده شده است.

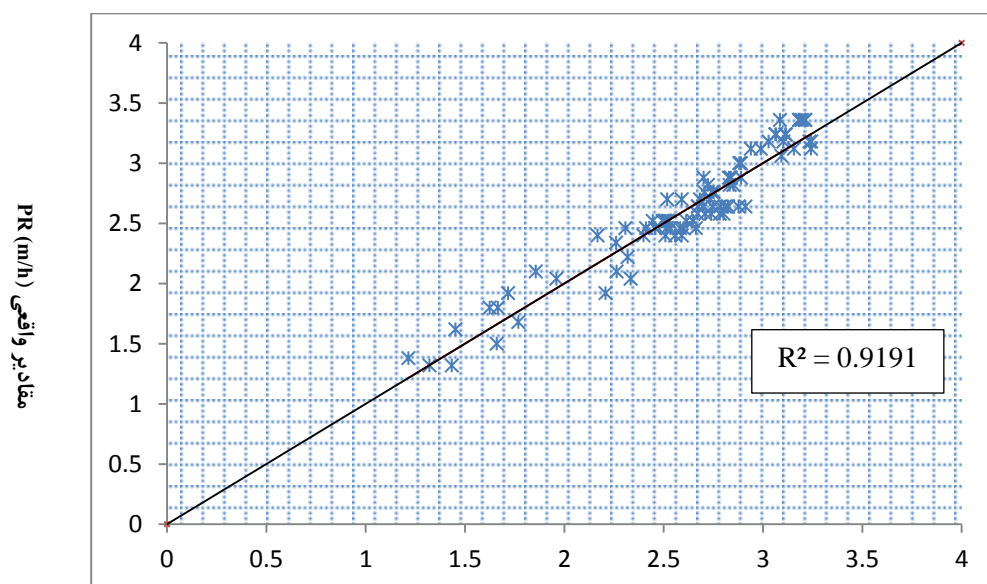
همان طور که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است، رابطه امتیاز به دست آمده به وسیله مدل جدید با مقادیر واقعی نرخ نفوذ به صورت خطی است و با افزایش امتیاز، نرخ نفوذ TBM هم افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱-۵. رابطه بین امتیاز به دست آمده از مدل جدید با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM

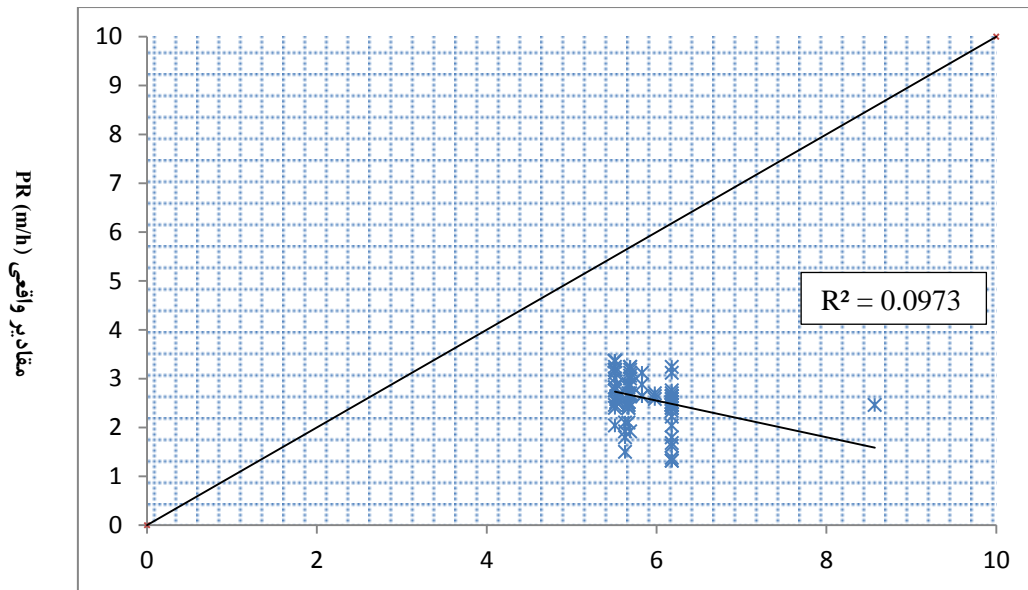
۲-۵ مقایسه مدل جدید با مدل های دیگر پیش بینی نرخ نفوذ TBM

به منظور مقایسه نتایج پیش بینی شده توسط مدل جدید با مدل های دیگر همان طور که در شکل های ۲-۵ تا ۸-۵ نشان داده شده است. در هر نمودار مقادیر پیش بینی شده توسط مدل در محور افقی و مقادیر واقعی ثبت شده نرخ نفوذ در محور قائم قرار دارد، با استفاده از تحلیل های رگرسیونی، ضریب تعیین R^2 در هر نمودار به دست آمد و هرچه خط به دست آمده به نیم ساز ربع اول نزدیک تر باشد مناسب تر است و مدل دارای دقت بالاتری در پیش بینی نرخ نفوذ TBM در توده سنگ است. به روابط و فرمول های مدل های مورد استفاده در فصل دوم اشاره شده است.



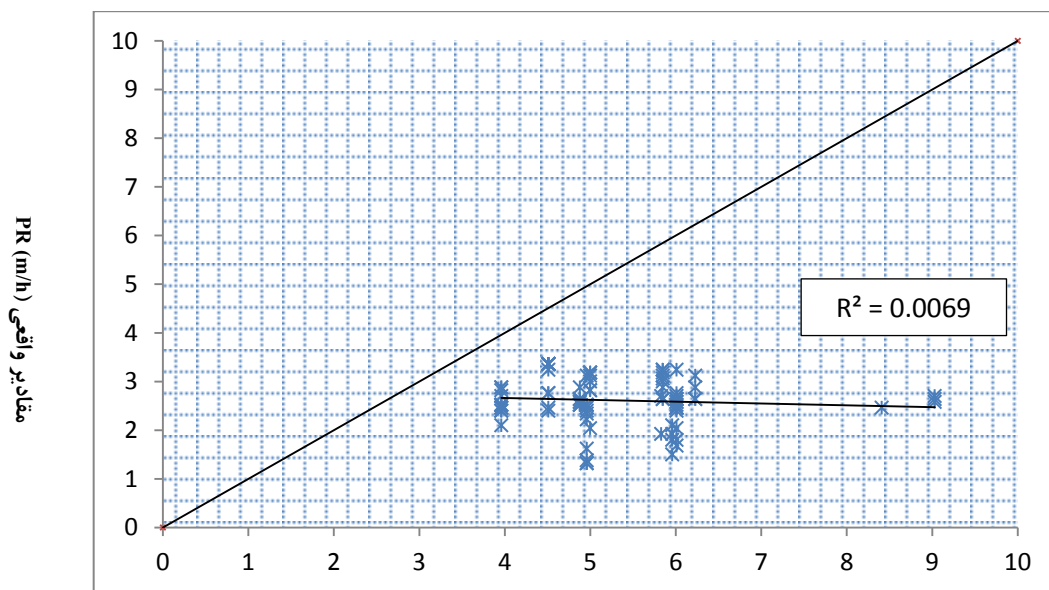
مقادیر پیش بینی شده PR (m/h)

شکل ۲-۵. رابطه بین مقادیر پیش بینی شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل جدید



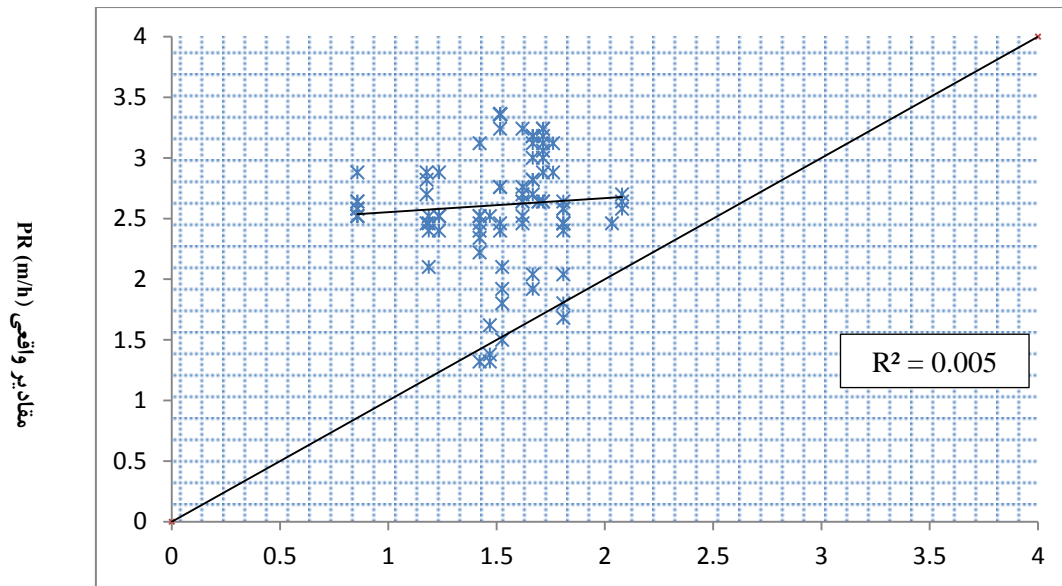
مقادیر پیش‌بینی شده PR (m/h)

شکل ۳-۵. رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل NTNU

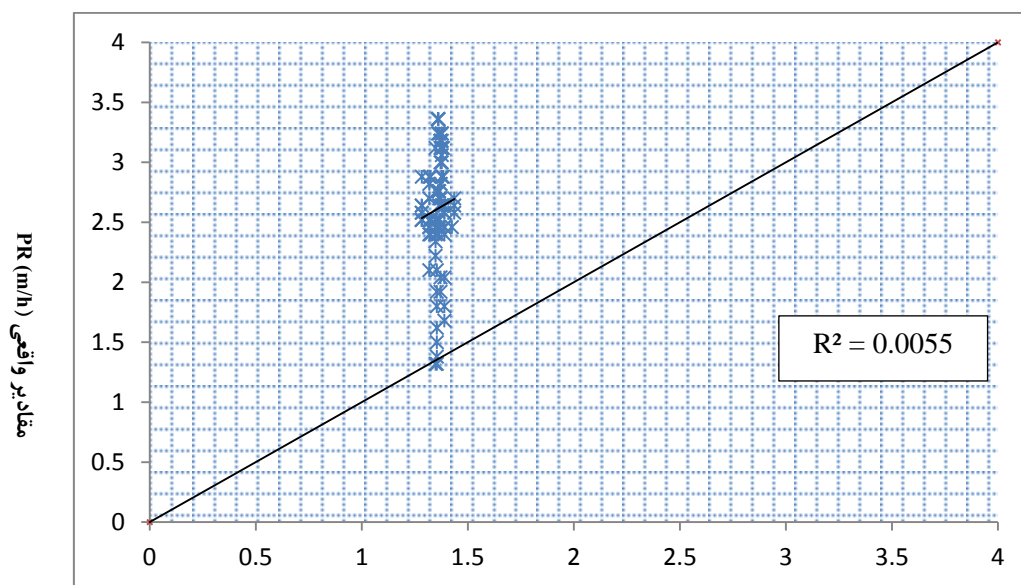


مقادیر پیش‌بینی شده PR (m/h)

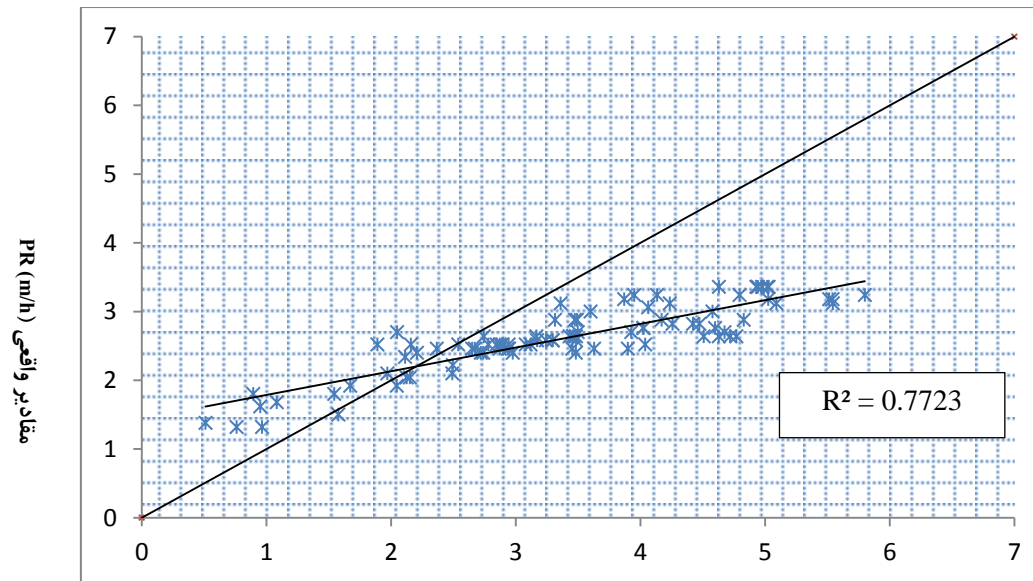
شکل ۴-۵. رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل Q_{TBM}



شکل ۵-۵. رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل Innaurato

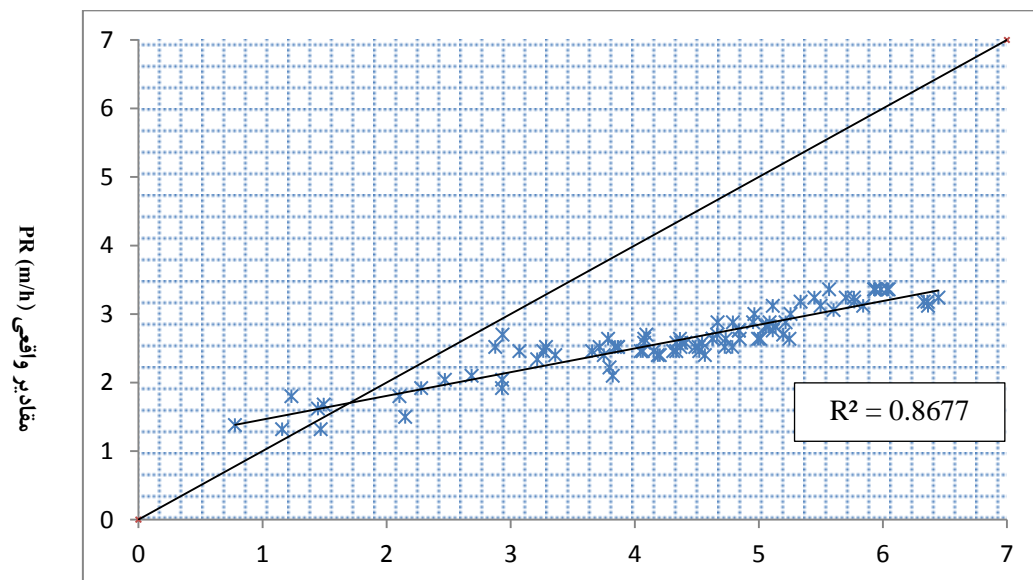


شکل ۵-۶. رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل Caselini



مقادیر پیش‌بینی شده PR (m/h)

شکل ۵-۷. رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل خادمی



مقادیر پیش‌بینی شده PR (m/h)

شکل ۵-۸. رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی نرخ نفوذ TBM در مدل حسن پور

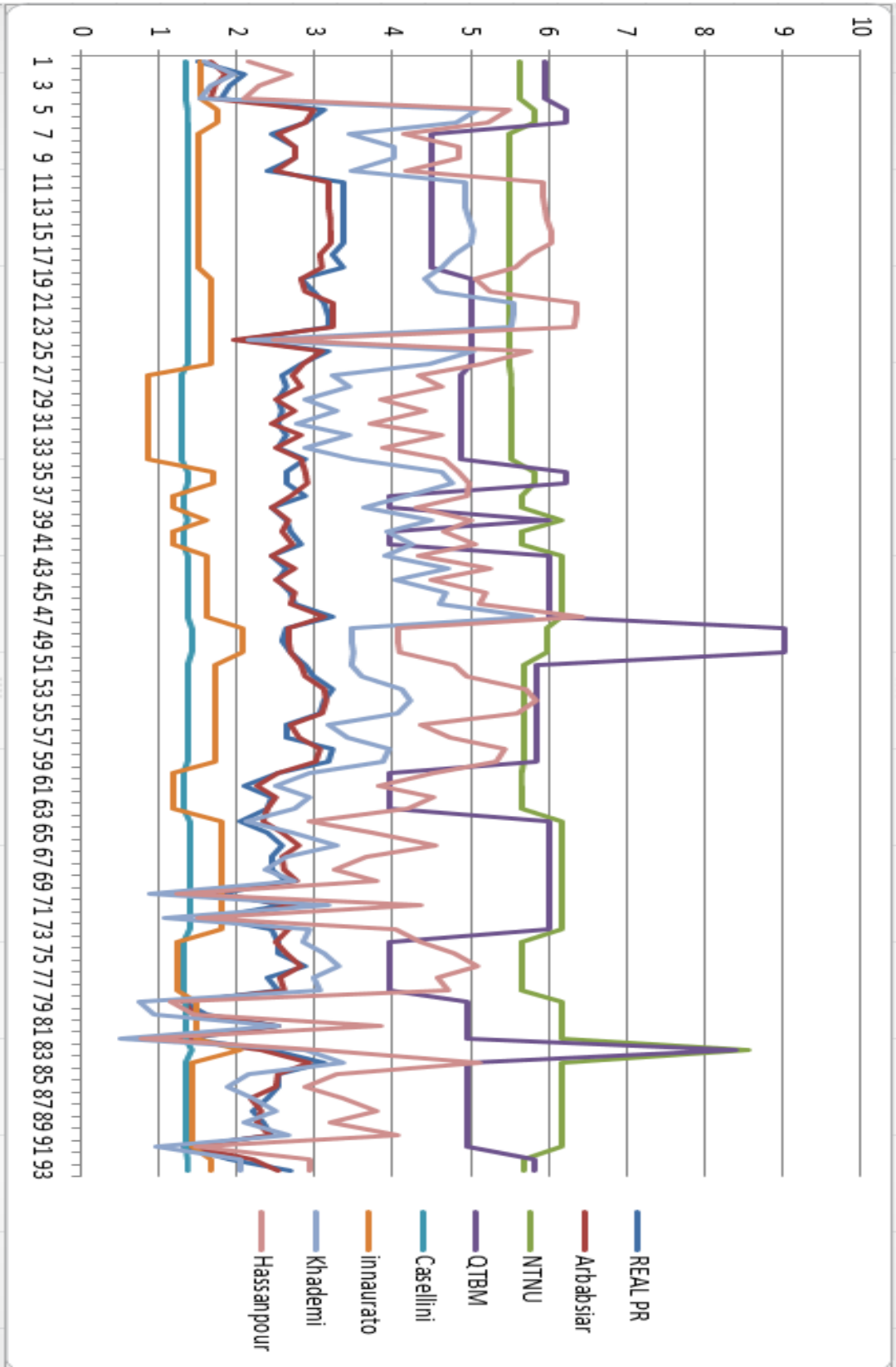
همان طور که در اشکال شکل های ۵-۲، ۵-۸ نشان داده شده است. بهترین نتایج را مدل جدید و مدل های حسن پور و خادمی داشته‌اند. لازم به ذکر است پارامتر هدف در این دو مدل اندیس نفوذ میدانی (FPI) بوده و برای تبدیل آن به نرخ نفوذ (PR) از سرعت چرخش سر حفار واقعی استفاده شده است که نشان‌دهنده اهمیت بسیار زیاد این پارامتر است؛ که بهتر است به طور مستقیم در مدل تأثیر داده شود، با این وجود بهترین نتایج را نسبت به مدل‌های بررسی‌شده، مدل جدید به دست آورده است.

به منظور بررسی نتایج مدل های مختلف به صورت یکجا همان طور که در شکل ۵-۹ نشان داده شده است. مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل های NTNU, Q_{TBM} بسیار بیشتر از مقادیر واقعی هستند و مقادیر پیش‌بینی‌شده در مدل های ایناورتو^۱ و کسلینی^۲ بسیار کمتر از مقادیر واقعی هستند، مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل های حسن پور و خادمی نزدیکی بیشتری با مقادیر واقعی دارند که بخش مهمی از آن به دلیل تبدیل پارامتر اندیس نفوذ میدانی به نرخ نفوذ با استفاده از مقادیر واقعی سرعت چرخش سر حفار است. با مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل جدید می‌توان دریافت بیش‌ترین نزدیکی را با مقادیر واقعی نرخ نفوذ دارند و علاوه بر آن از سادگی کاربرد و عدم استفاده از پارامترهای نامعمول و همچنین نتایج آزمایش های خاص برخوردار است.

¹ -innauarto

² -Caselini

مقادیر PR (m/h)



داده‌ها به ترتیب زون‌های ژئومکانیکی

شکل ۵-۹- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل‌های مختلف با مقادیر واقعی

۵-۳ کاربردهای دیگر مدل جدید

مدل جدید همچنین این امکان را فراهم می‌کند که پس از اتمام پروژه مدت زمان تکمیل آن را با استفاده از اطلاعات عملیاتی پروژه توسط کارفرما کنترل شود.

تا کنون مدلی با ساختار ساده و قابل کاربرد در حین حفاری ارائه نشده است. با استفاده از مدل جدید در هر دوره حفاری اپراتور می‌تواند برای رسیدن به نرخ نفوذ مشخص با استخراج امتیاز مدل از نمودار مربوطه و همچنین استخراج امتیازات مربوط به رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده و مقاومت کششی ماده سنگ که معمولاً در دسترس هستند، حدود امتیاز مورد نیاز از طریق ماشین حفار از نمودارهای متناظر امتیاز مربوط به عملکرد ماشین را به دست آورده و حدود مقادیر پارامترهای عملیاتی مورد نیاز را به دست آورد؛ و با استفاده از آن مقادیر سرعت چرخش سر حفار و نیروی پیشران ماشین حفار را تنظیم کند.

۶. فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه گیری:

- برای بررسی امکان انتخاب بهترین پارامترها با کمترین همپوشانی و بیشترین تأثیر بر نرخ نفوذ توده سنگ از ابزار تطبیق جعبه‌ابزار شبکه عصبی نرم‌افزار Matlab شد و در نهایت پارامترهای سرعت چرخش سر حفار، نیروی پیشران به ازای هر کاتر، امتیاز توده سنگ اصلاح‌شده، مقاومت کششی ماده سنگ، بهترین پارامترها تشخیص داده شدند.

- در این تحقیق سعی شد تا با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) وزن هر یک از چهار پارامتر سرعت چرخش سر حفار، نیروی پیشران به ازای هر کاتر، امتیاز توده سنگ اصلاح‌شده، مقاومت کششی ماده سنگ موثر بر نرخ نفوذ به دست آید، برای طبقه‌بندی سرعت چرخش سر حفار بازه ۰ تا ۸ به پنج بازه مساوی ۲۰٪ تقسیم شده است. برای طبقه‌بندی نیروی پیشران به ازای هر کاتر بازه ۰ تا ۳۰۰ به پنج بازه مساوی ۲۰٪ تقسیم شده است. برای طبقه‌بندی امتیاز رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده بازه ۰ تا ۱۰۰ به پنج بازه مساوی ۲۰٪ تقسیم شده است. برای طبقه‌بندی مقاومت کششی از طبقه‌بندی پیشنهادی عطایی و همکاران (۱۳۸۹) استفاده شده است.

- به منظور اعتبارسنجی مدل جدید از تعدادی داده جمع‌آوری شده از ۱۸ منطقه با خصوصیات ژئومکانیکی مختلف در تونل انتقال آب نوسود استفاده شد و با استفاده از تحلیل رگرسیونی رابطه ریاضی بین امتیاز به دست آمده به وسیله مدل جدید و مقادیر ثبت‌شده نرخ نفوذ TBM صورت خطی است و با افزایش امتیاز، نرخ نفوذ TBM هم افزایش پیدا می‌کند؛ و این رابطه از ضریب تعیین (R^2) بالایی برخوردار است.

- با مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل جدید با مدل‌های دیگر می‌توان دریافت مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل جدید بیشترین نزدیکی را با مقادیر واقعی نرخ نفوذ دارند و علاوه بر آن از سادگی کاربرد و عدم استفاده از پارامترهای نامعمول و نتایج آزمایش‌های خاص برخوردار است.

- مدل جدید همچنین این امکان را فراهم می‌کند که پس از اتمام پروژه مدت زمان تکمیل پروژه با استفاده از اطلاعات عملیاتی پروژه توسط کارفرما کنترل شود.

- همچنین در هر دوره حفاری اپراتور می‌تواند برای رسیدن به نرخ نفوذ مشخصی با استخراج امتیاز مدل از نمودار مربوطه و همچنین استخراج امتیازات مربوط به رده‌بندی توده سنگ اصلاح‌شده و مقاومت کششی ماده سنگ از نمودار متناظر امتیاز مربوط به عملکرد ماشین را به دست آورده و حدود مقادیر پارامترهای عملیاتی مورد نیاز را به دست آورد.

۶-۲ پیشنهادها

- پیشنهاد می‌شود به منظور گسترش مدل جدید نمونه‌هایی از پروژه‌های نقاط مختلف جهان با ویژگی‌های ژئومکانیکی مختلف و همچنین ماشین‌های حفار (TBM) با ویژگی‌های مختلف جمع‌آوری شود. تا رابطه به دست آمده را بهبود بخشد.

- پیشنهاد می‌شود رابطه بین امتیاز به دست آمده از مدل جدید با پارامترهای مختلفی از قبیل نرخ مصرف دیسک کاتر، دسترسی ماشین حفار، انرژی ویژه و غیره بررسی شود و در صورت نیاز برای هر کاربرد پارامترهایی اضافه شود.

- همچنین با توجه به گسترش حفاری مکانیزه با ماشین‌های حفاری تمام مقطع (TBM) در سنگ سخت در کشور ما پیشنهاد می‌شود از مدل جدید در پروژه‌های مختلف برای کاربردهایی همچون کنترل مدت زمان تکمیل پروژه توسط کارفرما، تخمین پارامترهای عملیاتی ماشین حفار به منظور رسیدن به نرخ نفوذ (PR) مشخص و همچنین پیش‌بینی نرخ نفوذ با مقادیر متغیر پارامترهای عملیاتی ماشین حفار استفاده شود.

۷. منابع

منابع فارسی

سینگ بهاوانی، آر، ک، گوئل (۱۳۸۲) طبقه بندی توده سنگ، ترجمه سیاوش تقی پور، مهدی رخشنده، انتشارات جهاد دانشگاهی امیرکبیر.

عطایی، محمد، (۱۳۸۹) تصمیم گیری چند معیاره فازی، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

عطایی، محمد، میکائیل، رضا، حسینی، سید هادی (۱۳۸۹) اصلاح شاخص شیمازک به منظور بهبود کاربردهای آن در مهندسی سنگ، طرح پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود.

مذاکرات شفاهی با مهندس مسعود بیانی، (۱۳۹۲)

منهاج، م.ب. (۱۳۸۵) هوش محاسباتی، جلد اول، مبانی شبکه های عصبی، ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

موسسه مهندسی مشاور ساحل (۱۳۸۵) گزارش نهایی مطالعات زمین شناسی مهندسی مسیر تونل زاگرس، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران

منابع لاتین

Alber, M., 2000. Advance rates of hard rock TBMs and their effects on projects economics. Tunnell. Undergr. Space Technol. 15 (1), 55–84. (2000).

Alvarez Grima, M., Babuslka, R., (2000). "Neuro-Fuzzy Modeling in Engineering Geology: Applications to Mechanical Rock Excavation, Rock Strength Estimation and Geological Mapping." Balkema, Rotterdam.

Alvarez Grima, M. P. A., Bruines, P.A., Verhoef, P.N.W., (2000). " Modeling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods." *Tunnell. Undergr. Space Technol.* 15 (3), 259–269.

Barton, N. (1999). "TBM performance in rock using QTBM." *Tunnels Tunnell. Int.* 31, 41–48.

Bieniawski Z.T, C., B and Galera, J.M, (2009). "PREDICTION OF CUTTER WEAR USING RME".

Bieniawski Z.T, C., B and Galera, J.M, (2007)" . " Predicting TBM Excavability." *Tunnel &Tunnelling International*, September, p. 25.

Bieniawski Z.T, C., B. and Galera, J.M, (2007). "TBM Excavability and machine-Rock Interaction." *Proc. RETC, Toronto*, p. 1118.

Bieniawski, Z. T., Celada, B., Galera, J.M (2008). New applications of the excavability index for selection of TBM types and predicting their performance. *World Tunnel Congress. India.*

Bieniawski, Z. T., Celada, B., Galera, J.M. and M. Álvares (2006). "Rock Mass Excavability (RME) index: a New Way to Selecting the Optimum Tunnel Construction Method." *Proc. ITA World Tunneling Congress, Seoul.*

Bruland, A. (1998). " Hard Rock Tunnel Boring." Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Dahl, F., et al. (2012) ."Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method." *Tunnelling and Underground Space Technology* 28: 150-158.

Farrokh, E., et al. (2012). "Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs." *Tunnelling and Underground Space Technology* 30: 110-123.

Gertsch, R., et al. (2007). "Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44(2): 238-246.

Graham, P. C. (1976). "Rock exploration for machine manufacturers. ." In: Bieniawski, Z.T. (Ed.), *Exploration for Rock Engineering*. Balkema, Johannesburg,

Hamilton, W. H., , Dollinger, G.L., (1979). "Optimizing tunnel boring machine and cutter design for greater boreability." In: *RETC Proceedings, Atlanta*, vol. 1, pp.280–296.

Khademi Hamidi, J., et al. (2010). "Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system." *Tunnelling and Underground Space Technology* 25(4): 333-345.

Kirsten, H. A. D. (1982). "A classification for excavation in natural materials." *Civil Engr inS. Africa*, July.

Laughton, C., 1998. *Evaluation and Prediction of Tunnel Boring Machine Performance in Variable Rock Masses*. Ph.D. Thesis, The University of Texas, Austin, USA. (1998).

Palmström, A. (1995). "RMi—a rock mass classification system for rock engineering purposes." Ph.D. thesis, University of Oslo.

Rostami, J. (2005). " Review of Issues Related to Cerchar A brasivityTesting and Their Implication on Geotechnical Investigation and Cutter Cost Estimates." RETC Proceedings

Rostami, J., Ozdemir, L., (1993). "A new model for performance prediction of hard rock TBM." In: Bowerman, L.D., et al. (Eds.), *Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling Conference*, pp. 793–809.

Takagi, T., Sugeno, M., 1985. (1985). "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control." *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 15 (1), 116–132.

Ya-Ching liu, C.-S. C. (2007). "A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment." *Engineering Geology* 89: 129-143.

Abstract

Predicting penetration rates in hard rock TBM's Tunnelling projects has a real impact on the estimating project's cost and Time. Many models have been introduced to predict the penetration rate of TBM each one of them has their own advantages and disadvantages .Reviews shows that rating models are the best models to predict the penetration rate .past reaserchese have shown that correct parameters of rock mass classification alone is not a good index to predict the penetration rate .so introduction of a new model that includes machine's parameters as well as the Geomechanic's parameters is necessary .in this study we tried to use neural network toolbox in MATLAB software to choose TBM's parameters affecting the penetration rate with maximum effect and minimum overlap. these parameters are the rotational speed of Cutter head, trust force per cutter, $RMR_{adjusted}$, tensile strength. then based on expert's opinion and Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy the parameters have been wighted so that the new model is more comprehensive and less data dependent. then given to the relative importance of parameters used a maximum rate of 100 was considered. also in The new classification all four parameters were classified separately and rated nonlinearly, in the next step for validation of the method, the new Rating system was applied on data obtained from 18 zone of Zagros tunnel with different geomechanical characteristics. after that penetration rate with a correlation coefficient of $R^2 = 0.9191$ obtained using regression analysis of the mathematical equation $y = 0.0621x - 0.8098$ between the rates obtained from the new model and the actual penetration rate then . the values predicted by the new model, the values predicted by the other models and the actual peneteration rate values were analyzed and compared .values predicted by the new model are closest to the actual penetration rate compared to other models.

Keywords: TBM - penetration rate - Rating - new model - Zagros tunnel



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

submission a model to predict penetration rate of hard rock TBM

Mohammad Hosein Arbabsiar

Supervisors:

Dr.Mohammad Ataei
Dr.Kourosh Shariar

August, 2013