

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

پیش‌بینی عملکرد ماشین حفار تمام مقطع (TBM) سنگ سخت مبتنی  
بر رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

رامین کریمی دستگردی

اساتید راهنما:

دکتر سید رحمان ترابی

دکتر حسین میرزایی

استاد مشاور:

دکتر مسعود زارع نقدهی

شهریور ۱۳۹۴

شماره: ۱۵۷۸  
تاریخ: ۹۴-۵-۱۲  
پروانه:

باسمه تعالی



وزارت تحصیلات عالی  
گروه شماره (۶)

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خاتمه شده و با استعدادت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم آقای رحمن ترمین دستگویی به شماره دانشجویی ۹۱۰۴۱۶۶ رشته معارف گرایش ملکیت سنگ تحت عنوان پیش بینی عملکرد ماشین حفار تمام مقطع (TBM) در سنگ سخت ناشی از رویکرد سیستم های مهندسی سنگ (RES) که در تاریخ ۱۳۹۲۰۲۲۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول در رتبه:  ممتاز (۱۷)  دفاع مجدد  مردود

۲- سیمین عرب (۱۵۹۶ - ۱۶)

۱- عالی (۳ - ۱۹)

۳- عالی قبول (۱۵۹۹ - ۱۶) - ۵- نمره کمتر از ۱۲ شو فلا قبول

۳- نمره (۱۶۹۶ - ۱۶)

ردیف	عنوان عبارت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر سید رحمت الله	دکتر سید رحمت الله	استاد	
۲	دکتر حسین میرزایی	دکتر حسین میرزایی	استادیار	
۳	دکتر سعید سنجابی	دکتر سعید سنجابی	استادیار	
۴	دکتر شکرالله رابع	دکتر شکرالله رابع	استادیار	
۵	دکتر محمد ترکخواه	دکتر محمد ترکخواه	استادیار	
۶	دکتر ناصر عزیزی	دکتر ناصر عزیزی	استادیار	

رئیس دانشکده:

## تعهد نامه

اینجانب رامین کریمی دستگرددی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته معدن- مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع (TBM) سنگ سخت با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) تحت راهنمایی دکتر سید رحمان ترابی- دکتر حسین میرزایی متعهد می‌شوم.

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

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها 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:

یکی از پارامترهای مهم در تخمین هزینه و زمان احداث یک پروژه تونل‌سازی، پیش‌بینی عملکرد ماشین حفار تمام مقطع (TBM) می‌باشد. در پژوهش حاضر به پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM بر اساس رویکرد قطعی و سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) - احتمالاتی در پروژه تونل انتقال آب کرج - تهران پرداخته شده است. بدین منظور از ۹ پارامتر زمین، شامل مقاومت تراکمی تک محوره سنگ، مقاومت کششی سنگ، تعداد درزه‌ها در واحد حجم، زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل، هوازدگی، شاخص شکنندگی سنگ، وجود آب زیرزمینی، کانی‌های ساینده (محتوی کوارتز)، سینه‌کار مختلط و ۵ پارامتر ماشین، شامل سرعت چرخش راس حفار، فاصله‌داری دیسک‌ها، نیروی تراست، گشتاور و توان برشی راس حفار استفاده شده است. نتایج حاصل از روش قطعی و روش RES احتمالاتی برای تخمین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و مقایسه آن با مقادیر واقعی میدانی به ترتیب ضرایب همبستگی ۰/۴۸۸۵ و ۰/۴۵۵۴ را نشان می‌دهند. با بررسی جداگانه نرخ نفوذ برای پهنه‌های مختلف طول مسیر، در بعضی از پهنه‌ها تطابق خوبی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و واقعی وجود دارد. در حالت کلی بررسی عملکرد TBM یک امر پیچیده و غیرخطی است.

کلمات کلیدی: پیش‌بینی عملکرد، پارامترهای زمین و ماشین، نرخ نفوذ، روش قطعی،

روش سیستم‌های مهندسی سنگ - احتمالاتی.

## فهرست مطالب

### فصل اول

۱	کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- هدف از پژوهش
۳	۳-۱- روش انجام پژوهش
۵	۴-۱- نوآوری پژوهش
۵	۵-۱- سازماندهی پایان نامه

### فصل دوم

	رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ
۸	۱-۲- مقدمه
۸	۲-۲- تفکر سیستمی
۹	۳-۲- رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ
۱۱	۴-۲- کدگذاری ماتریس اندرکنش
۱۳	۵-۲- نمودار علت-اثر
۱۶	۶-۲- سابقه استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ
۲۰	۷-۲- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM
۲۱	۱-۷-۲- مدل CSM
۲۶	۲-۷-۲- مدل NTNU
۲۸	۳-۷-۲- مدل Q <sub>TBM</sub>
۳۰	۸-۲- تلاش‌های انجام شده جهت بهبود رویکرد RES
۳۱	۱-۸-۲- استفاده از نظریه سیستم‌های خاکستری
۳۳	۲-۸-۲- استفاده از نظریه گراف
۳۵	۳-۸-۲- استفاده از شبکه عصبی
۳۷	۹-۲- جمع بندی

معرفی پروژه تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه خانه شماره شش تهران

۳-۱- مقدمه

۳-۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

۳-۳- مشخصات مسیر تونل

۳-۳-۱- زمین‌شناسی مسیر تونل

۳-۴- روش حفاری تونل

۳-۵- پهنه‌بندی مسیر تونل

۳-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

## فصل چهارم

عوامل موثر بر عملکرد ماشین حفار تمام مقطع تونل در سنگ سخت

۴-۱- مقدمه

۴-۲- انواع ماشین‌های حفر تونل در سنگ سخت

۴-۲-۱- ماشین‌های حفر تونل از نوع باز (Open TBM)

۴-۲-۲- ماشین‌های حفر تک سپره

۴-۲-۳- ماشین حفر تونل با سپر تلسکوپی

۴-۳- عوامل تاثیرگذار بر عملکرد TBM

۴-۴- طبقه‌بندی عوامل تاثیرگذار بر عملکرد TBM

۴-۵- عوامل مربوط به زمین

۴-۵-۱- مقاومت تراکمی تک محوره

۴-۵-۲- مقاومت کششی سنگ

۴-۵-۳- وجود سینه‌کار مختلط

۴-۵-۴- محتوی کوارتز

۴-۵-۵- وجود درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها

۴-۵-۶- درجه هوازدگی

۴-۵-۷- وجود آب زیرزمینی

۷۶	۴-۵-۸- زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل
۷۹	۴-۵-۹- شکنندگی سنگ
۸۱	۴-۶- عوامل ماشین TBM
۸۱	۴-۶-۱- سرعت چرخش کله حفار
۸۶	۴-۶-۲- فاصله‌داری تیغه‌های برشی
۸۸	۴-۶-۳- نیروی پیشران ماشین TBM
۹۳	۴-۶-۴- گشتاور
۹۵	۴-۶-۵- توان راس حفار
۹۸	۴-۷- جمع‌بندی
۹۹	فصل پنجم
	برآورد ضریب عملکرد ماشین حفر تمام مقطع در سنگ سخت مبتنی بر روش قطعی
۱۰۰	۵-۱- مقدمه
۱۰۰	۵-۲- روش‌های قطعی و پدیدار شدن روش‌های احتمالاتی
۱۰۰	۵-۳- روش قطعی در تخمین عملکرد ماشین حفر تمام مقطع
۱۰۷	۵-۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۰۹	فصل ششم
	برآورد ضریب عملکرد ماشین حفار تمام مقطع در سنگ سخت مبتنی بر رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ
۱۱۰	۶-۱- مقدمه
۱۱۰	۶-۲- تحلیل اندرکنش عوامل با استفاده از رویکرد RES
۱۱۰	۶-۲-۱- کدگذاری ماتریس اندرکنش
۱۳۲	۶-۲-۲- تعیین وزن عوامل
۱۴۹	۶-۳- برآورد شاخص عملکرد
۱۶۱	۶-۴- اعتبارسنجی
۱۶۳	۶-۵- جمع‌بندی
۱۶۵	فصل هفتم
	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری



۱۶۶	۱-۷- مقدمه
۱۶۶	۲-۷- نتیجه‌گیری
۱۶۷	۳-۷- پیشنهادات
۱۶۹	منابع
۱۷۷	پیوست

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: مراحل انجام پژوهش ۴
- شکل ۱-۲: مفهوم تفکر سیستمی ۹
- شکل ۲-۲: مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها ۹
- شکل ۳-۲: مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی با دو عامل A و B ۱۰
- شکل ۴-۲: روش سوم کدگذاری ماتریس اندرکنش با استفاده از شیب خط نمودار  $P_1-P_1$  ۱۲
- شکل ۵-۲: نحوه شکل‌گیری نمودارهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش ۱۴
- شکل ۶-۲: نمونه‌ای از یک ماتریس اندرکنش کدگذاری شده  $۲*۲$  و نمودار علت-اثر آن ۱۴
- شکل ۷-۲: نمونه‌ای از نحوه کدگذاری ماتریس اندرکنش  $۴*۴$  ۱۵
- شکل ۸-۲: شدت اثر متقابل و تسلط پارامتر ۱۶
- شکل ۹-۲: نیروهای وارده و عکس‌العمل سنگ ۲۴
- شکل ۱۰-۲: تخمین اولیه M با استفاده از Q توده سنگ ۳۰
- شکل ۱۱-۲: مقایسه نتایج حاصل از کدگذاری (الف) ESQ و (ب) CQC ۳۳
- شکل ۱۲-۲: خط سیرهای مکانیزم برای یک ماتریس با ۵ پارامتر ۳۴
- شکل ۱۳-۲: شبکه مکانیزم‌های میان چند پارامتر در مدل تمام مرتبط ۳۴
- شکل ۱۴-۲: نحوه قرارگیری پارامترهای مانریس اثر متقابل در یک شبکه عصبی ۳۵
- شکل ۱۵-۲: شبکه عصبی در نظر گرفته شده در صورت وجود اندرکنش میان تمام پارامترهای ماتریس ۳۶
- شکل ۱-۳: موقعیت قطعه دوم مسیر تونل و راه‌های اصلی مرتبط با آن ۴۱
- شکل ۲-۳: پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل ۴۳
- شکل ۳-۳: سیکل حفاری در D.S.TBM ۴۵
- شکل ۱-۴: محدوده کاری ماشین‌های حفر تونل ۵۱
- شکل ۲-۴: قسمت‌های مختلف ماشین حفار از نوع باز ۵۲
- شکل ۳-۴: ماشین حفار تمام مقطع تک سپری ۵۳
- شکل ۴-۴: ماشین حفار تمام مقطع دو سپری ۵۴
- شکل ۵-۴: توزیع آماری مقاومت تراکمی تک محوره در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۳-۴ ۵۸
- شکل ۶-۴: توزیع آماری مقاومت تراکمی تک محوره در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴ ۵۹

- شکل ۴-۷: توزیع آماری مقاومت تراکمی تک محوره در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۵ ۶۰
- شکل ۴-۸: توزیع آماری مقاومت کششی سنگ در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۶ ۶۱
- شکل ۴-۹: توزیع آماری مقاومت کششی سنگ در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۷ ۶۲
- شکل ۴-۱۰: توزیع آماری مقاومت کششی سنگ در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۸ ۶۲
- شکل ۴-۱۱: توزیع آماری سینه کار مختلط در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۹ ۶۴
- شکل ۴-۱۲: توزیع آماری سینه کار مختلط در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۰ ۶۴
- شکل ۴-۱۳: توزیع آماری سینه کار مختلط در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۱ ۶۵
- شکل ۴-۱۴: توزیع آماری محتوی کوارتز در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۲ ۶۶
- شکل ۴-۱۵: توزیع آماری محتوی کوارتز در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۳ ۶۷
- شکل ۴-۱۶: توزیع آماری محتوی کوارتز در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۴ ۶۸
- شکل ۴-۱۷: توزیع آماری تعداد درزه‌ها در واحد حجم در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۵ ۶۹
- شکل ۴-۱۸: توزیع آماری تعداد درزه‌ها در واحد حجم در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۶ ۷۰
- شکل ۴-۱۹: توزیع آماری تعداد درزه‌ها در واحد حجم در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۷ ۷۰
- شکل ۴-۲۰: توزیع آماری میزان هوازدگی مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۸ ۷۲
- شکل ۴-۲۱: توزیع آماری میزان هوازدگی مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۹ ۷۲
- شکل ۴-۲۲: توزیع آماری میزان هوازدگی مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۰ ۷۳
- شکل ۴-۲۳: توزیع آماری میزان جریان آب زیرزمینی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۱ ۷۴
- شکل ۴-۲۴: توزیع آماری میزان جریان آب زیرزمینی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۲ ۷۵
- شکل ۴-۲۵: توزیع آماری میزان جریان آب زیرزمینی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۳ ۷۶
- شکل ۴-۲۶: روند نرخ نفوذ با افزایش زاویه ناپیوستگی‌ها ۷۶
- شکل ۴-۲۷: توزیع آماری زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۴ ۷۷
- شکل ۴-۲۸: توزیع آماری زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۵ ۷۸
- شکل ۴-۲۹: توزیع آماری زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس ۴-۲۶ ۷۸
- شکل ۴-۳۰: توزیع آماری شاخص شکنندگی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۷ ۸۰

- شکل ۴-۳۱: توزیع آماری شاخص شکنندگی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۸
- شکل ۴-۳۲: توزیع آماری شاخص شکنندگی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۹
- شکل ۴-۳۳: تاثیر سرعت چرخش کله حفار بر نرخ نفوذ در هر چرخش
- شکل ۴-۳۴: تاثیر سرعت چرخش بر نرخ نفوذ
- شکل ۴-۳۵: تاثیر سرعت چرخش بر نرخ نفوذ در هر چرخش
- شکل ۴-۳۶: توزیع آماری سرعت چرخش پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۰
- شکل ۴-۳۷: توزیع آماری سرعت چرخش پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۱
- شکل ۴-۳۸: توزیع آماری سرعت چرخش پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۲
- شکل ۴-۳۹: توزیع آماری فاصله‌داری تیغه‌های برشی در پهنه‌های مختلف مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۳
- شکل ۴-۴۰: توزیع آماری فاصله‌داری تیغه‌های برشی در پهنه‌های مختلف مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۴
- شکل ۴-۴۱: توزیع آماری فاصله‌داری تیغه‌های برشی در پهنه‌های مختلف مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۵
- شکل ۴-۴۲: تاثیر نیروی پیشران در نرخ نفوذ کله حفار در هر چرخش
- شکل ۴-۴۳: تغییر شکل شیارهای ایجاد شده در دو کاتر مجاور همزمان با افزایش نیروی پیشران
- شکل ۴-۴۴: توزیع آماری نیروی پیشران در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۶
- شکل ۴-۴۵: توزیع آماری نیروی پیشران در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۷
- شکل ۴-۴۶: توزیع آماری نیروی پیشران در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۸
- شکل ۴-۴۷: توزیع آماری گشتاور پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۹
- شکل ۴-۴۸: توزیع آماری گشتاور پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴۰
- شکل ۴-۴۹: توزیع آماری گشتاور پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴۱
- شکل ۴-۵۰: توزیع آماری توان پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴۲
- شکل ۴-۵۱: توزیع آماری توان پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴۳
- شکل ۴-۵۲: توزیع آماری توان پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴۴
- شکل ۵-۱: منحنی و معادله منحنی برازش شده بر روی شاخص نفوذ و میزان نفوذ واقعی مربوط به طبقه‌بندی نوع اول
- شکل ۵-۲: منحنی و معادله منحنی برازش شده بر روی شاخص نفوذ و میزان نفوذ واقعی مربوط به طبقه‌بندی

نوع دوم

- شکل ۳-۵: منحنی و معادله منحنی برازش شده بر روی شاخص نفوذ و میزان نفوذ واقعی مربوط به طبقه‌بندی نوع سوم ۱۰۵
- شکل ۴-۵: منحنی برازش شده بین مقادیر نرخ نفوذ پیش بینی شده و نرخ نفوذ واقعی ۱۰۶
- شکل ۱-۶: شدت اندرکنش عوامل موثر بر نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت ۱۱۶
- شکل ۲-۶: نمودار علت-اثر عوامل موثر بر نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت ۱۱۷
- شکل ۳-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل (سرعت چرخش پیشانی برشی) ۱۱۸
- شکل ۴-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (فاصله‌داری تیغه‌های برشی) ۱۱۹
- شکل ۵-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (نیروی پیشران) ۱۲۰
- شکل ۶-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (گشتاور) ۱۲۱
- شکل ۷-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (توان برشی کله حفار) ۱۲۲
- شکل ۸-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (مقاومت تراکمی تک محوره) ۱۲۳
- شکل ۹-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (مقاومت کششی) ۱۲۴
- شکل ۱۰-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (تعداد درزه‌ها در واحد حجم) ۱۲۵
- شکل ۱۱-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (درجه هوازدگی) ۱۲۶
- شکل ۱۲-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل) ۱۲۷
- شکل ۱۳-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (شاخص شکنندگی) ۱۲۸
- شکل ۱۴-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (جریان آب زیرزمینی) ۱۲۹
- شکل ۱۵-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (محتوی کوارتز) ۱۳۰
- شکل ۱۶-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (سینه‌کار مختلط) ۱۳۱
- شکل ۱۷-۶: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۱) برای عامل سرعت چرخش ۱۳۵
- شکل ۱۸-۶: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۲) برای عامل فاصله‌داری تیغه‌های برشی ۱۳۶
- شکل ۱۹-۶: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۳) برای عامل نیروی پیشران ۱۳۷
- شکل ۲۰-۶: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۴) برای عامل گشتاور ۱۳۸

- شکل ۶-۲۱: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۵) برای عامل توان پیشانی برشی ۱۳۹
- شکل ۶-۲۲: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۶) برای عامل مقاومت تراکمی تک محوره ۱۴۰
- شکل ۶-۲۳: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۷) برای عامل مقاومت کششی ۱۴۱
- شکل ۶-۲۴: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن (A۸) برای عامل ناپیوستگی‌ها ۱۴۲
- شکل ۶-۲۵: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۹) برای عامل هوازدگی ۱۴۳
- شکل ۶-۲۶: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۱۰) برای عامل زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل ۱۴۴
- شکل ۶-۲۷: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۱۱) برای عامل شاخص شکنندگی ۱۴۵
- شکل ۶-۲۸: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۱۲) برای عامل آب زیرزمینی ۱۴۶
- شکل ۶-۲۹: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۱۳) برای عامل کانی‌های ساینده ۱۴۷
- شکل ۶-۳۰: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (A۱۴) برای عامل وجود سینه‌کار مختلط ۱۴۸
- شکل ۶-۳۱: توزیع احتمال شاخص نرخ نفوذ (PI) حاصل از روش مونت کارلو به همراه مقادیر متوسط برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل (الف-س) ۱۵۸
- شکل ۶-۳۲: نمودار برازش شده بین شاخص نرخ نفوذ (PI) و نرخ نفوذ واقعی ۱۶۰
- شکل ۶-۳۳: رابطه منحنی برازش شده بین شاخص نرخ نفوذ (PI) و نرخ نفوذ واقعی ۱۶۰
- شکل ۶-۳۴: مقایسه مقادیر نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ واقعی برای ۱۵ پهنه مسیر تونل ۱۶۲
- شکل ۶-۳۵: میزان همبستگی میان نرخ نفوذ پیش‌بینی شده با نرخ نفوذ واقعی ۱۶۲

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM ۲۰
- جدول ۲-۲: تاخیرات مربوط به تخلیه مواد حفاری با توجه به شیب تونل ۲۶
- جدول ۳-۲: تاخیرات ناشی از نصب نگهداری موقت در ارتباط با RMR ۲۶
- جدول ۴-۲: پارامترهای مورد استفاده در روش NTNU ۲۷
- جدول ۵-۲: مقادیر M1 با توجه به مقدار Q ۳۰
- جدول ۱-۳: مشخصات کلی تونل انتقال آب کرج-تهران ۴۲
- جدول ۲-۳: واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل ۴۴
- جدول ۳-۳: پهنه‌بندی مسیر تونل انتقال آب کرج-تهران ۴۶
- جدول ۱-۴: نرخ نفوذ و نرخ پیشروی واقعی در پهنه‌های مختلف ۵۵
- جدول ۲-۴: عوامل موثر بر عملکرد TBM در سنگ سخت ۵۶
- جدول ۳-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت تراکمی تک محوره ۵۸
- جدول ۴-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت تراکمی تک محوره ۵۹
- جدول ۵-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت تراکمی تک محوره ۵۹
- جدول ۶-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت کششی ۶۱
- جدول ۷-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت کششی ۶۱
- جدول ۸-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت کششی ۶۲
- جدول ۹-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس سینه‌کار مختلط ۶۳
- جدول ۱۰-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس سینه‌کار مختلط ۶۴
- جدول ۱۱-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس سینه‌کار مختلط ۶۵
- جدول ۱۲-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس محتوی کوارتز ۶۶
- جدول ۱۳-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس محتوی کوارتز ۶۷
- جدول ۱۴-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس محتوی کوارتز ۶۷
- جدول ۱۵-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس تعداد درزه‌ها در واحد حجم ۶۹

۶۹	جدول ۴-۱۶: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس تعداد درزه‌ها در واحد حجم
۷۰	جدول ۴-۱۷: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس تعداد درزه‌ها در واحد حجم
۷۱	جدول ۴-۱۸: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس درجه هوازدگی
۷۲	جدول ۴-۱۹: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس درجه هوازدگی
۷۳	جدول ۴-۲۰: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس درجه هوازدگی
۷۴	جدول ۴-۲۱: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس میزان جریان آب
۷۵	جدول ۴-۲۲: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس میزان جریان آب
۷۵	جدول ۴-۲۳: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس میزان جریان آب
۷۷	جدول ۴-۲۴: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس زاویه ناپیوستگی با محور تونل
۷۷	جدول ۴-۲۵: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس زاویه ناپیوستگی با محور تونل
۷۸	جدول ۴-۲۶: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس زاویه ناپیوستگی با محور تونل
۷۹	جدول ۴-۲۷: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس شاخص شکنندگی سنگ
۸۰	جدول ۴-۲۸: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس شاخص شکنندگی سنگ
۸۱	جدول ۴-۲۹: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس شاخص شکنندگی سنگ
۸۴	جدول ۴-۳۰: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس سرعت چرخش پیشانی برشی
۸۴	جدول ۴-۳۱: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس سرعت چرخش پیشانی برشی
۸۵	جدول ۴-۳۲: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس سرعت چرخش پیشانی برشی
۸۶	جدول ۴-۳۳: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس فاصله داری تیغه‌های برشی
۸۷	جدول ۴-۳۴: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس فاصله داری تیغه‌های برشی
۸۸	جدول ۴-۳۵: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس فاصله داری تیغه‌های برشی
۹۱	جدول ۴-۳۶: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس نیروی پیشران
۹۱	جدول ۴-۳۷: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس نیروی پیشران
۹۲	جدول ۴-۳۸: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس نیروی پیشران
۹۳	جدول ۴-۳۹: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس گشتاور پیشانی برشی



- جدول ۴-۴۰: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس گشتاور پیشانی برشی ۹۴
- جدول ۴-۴۱: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس گشتاور پیشانی برشی ۹۴
- جدول ۴-۴۲: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس توان پیشانی برشی ۹۵
- جدول ۴-۴۳: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس توان پیشانی برشی ۹۶
- جدول ۴-۴۴: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس توان پیشانی برشی ۹۷
- جدول ۵-۱: مقادیر قطعی شاخص نفوذ مربوط به طبقه بندی نوع اول برای ۱۵ پهنه مسیر تونل انتقال آب کرج - تهران ۱۰۱
- جدول ۵-۲: مقادیر قطعی شاخص نفوذ مربوط به طبقه بندی نوع دوم برای ۱۵ پهنه مسیر تونل انتقال آب کرج - تهران ۱۰۳
- جدول ۵-۳: مقادیر قطعی شاخص نفوذ مربوط به طبقه بندی نوع سوم برای ۱۵ پهنه مسیر تونل انتقال آب کرج- تهران ۱۰۴
- جدول ۵-۴: مقادیر نرخ نفوذ پیش بینی شده برای طبقه بندی نوع سوم مبتنی بر روش قطعی ۱۰۶
- جدول ۶-۱: ماتریس اندرکنش  $M_1$  برای احتمال کد صفر ۱۱۲
- جدول ۶-۲: ماتریس اندرکنش  $M_1$  برای احتمال کد ۱ ۱۱۲
- جدول ۶-۳: ماتریس اندرکنش  $M_2$  برای کد ۲ ۱۱۳
- جدول ۶-۴: ماتریس اندرکنش  $M_2$  برای کد ۳ ۱۱۴
- جدول ۶-۵: ماتریس اندرکنش  $M_2$  برای کد ۴ ۱۱۴
- جدول ۶-۶: ماتریس اندرکنش متوسط ۱۱۶
- جدول ۶-۷: شدت اندرکنش و وزن عامل سرعت چرخش پیشانی برشی ۱۳۴
- جدول ۶-۸: پارامترهای آماری حاصل از مدل سازی احتمالاتی برای محاسبه ی شاخص بهره وری برای پهنه های مسیر تونل ۱۵۹
- جدول ۶-۹: مقادیر شاخص نرخ نفوذ پیش بینی شده و واقعی برای ۱۵ پهنه مسیر تونل انتقال آب کرج- تهران ۱۶۱



فصل اول

کلیات

## ۱-۱- مقدمه

امروزه به طور گسترده از ماشین‌های حفار تمام مقطع (Tunnel Boring Machine) در پروژه‌های تونل‌سازی استفاده می‌شود. اولین تلاش برای ساخت ماشین‌های حفاری تونل قبل از سال ۱۸۵۰ انجام شد. تکنولوژی این ماشین‌ها به سرعت پیشرفت کرد به طوری که امروزه می‌توان آن‌ها را در شرایط متنوعی از سنگ‌ها با نرخ پیشروی بالا به کار برد. در حال حاضر نرخ پیشروی TBM‌ها به بیش از ۱۰۰۰ متر در ماه رسیده است. با این وجود هنوز نیز در برخی از پروژه‌های حفاری مکانیزه، نرخ پیشروی بسیار پایین و حتی توقفات طولانی مدت به علت شرایط نامناسب زمین به چشم می‌خورد. از آغاز حفاری مکانیزه، مطالعات زیادی برای پیش‌بینی عملکرد TBM انجام شده است. پیش‌بینی نرخ پیشروی TBM یک امر مهم در تخمین هزینه‌های یک پروژه مکانیزه است. شناخت عوامل موثر بر عملکرد ماشین‌های حفار از این نظر که می‌تواند تخمین دقیق‌تری از مدت زمان اجرای تونل را نشان دهد، دارای اهمیت است. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای توده سنگ، ماشین و شرایط نامناسب زمین شناسی در حفاری مکانیزه می‌باشد.

برای این منظور ابتدا شرایط نامناسب توده سنگ و نحوه تاثیر آن بر عملیات تونلسازی مورد بررسی قرار گرفته و سپس داده‌های مربوط به توده سنگ و ماشین حفار جمع‌آوری شده، سپس تاثیر این پارامترها بر روی یکدیگر و عملکرد TBM مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تاثیر شرایط توده سنگ بر عملکرد TBM با استفاده از روش‌های سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و قطعی مدلسازی شده و نتایج آنها با مقادیر نرخ نفوذ واقعی مقایسه می‌شود، در مدلسازی RES از پارامترهای توده سنگ همچون مقاومت تراکمی تک محوره، مقاومت کششی، وضعیت درزه

ها، میانگین فاصله داری درزه‌ها، جهت ناپیوستگی‌ها با محور تونل، شاخص شکنندگی، وجود کانی‌های ساینده، سینه‌کار مختلط و آب زیرزمینی و پارامترهای ماشین حفاری همچون، سرعت چرخش راس حفار، فاصله داری تیغه‌های برشی، نیروی تراست، گشتاور و توان برشی راس حفار استفاده شده است.

در این تحقیق به بررسی تاثیر پارامترهای توده سنگ و ماشین حفر تمام مقطع در حفاری مکانیزه و ارایه رابطه‌ای بین عملکرد دستگاه، شرایط توده سنگ و پارامترهای ماشین حفار پرداخته می‌شود.

### ۲-۱- هدف از پژوهش

تاکنون تحقیقات نسبتاً گسترده‌ای در زمینه‌ی پیش‌بینی عملکرد TBM در محیط‌های سنگی انجام شده و مدل‌هایی توسط برخی از محققین ارایه گردیده است. شناخت عوامل موثر بر عملکرد ماشین حفار که می‌توان تخمین دقیق‌تری از عملکرد و به دنبال آن زمان اجرای تونل را به دست آورد، اهمیت دارد.

در این پژوهش با تمرکز بر زمین‌های سخت و عوامل تاثیرگذار بر فرایند تونل‌سازی، به بررسی عملکرد TBM پرداخته می‌شود.

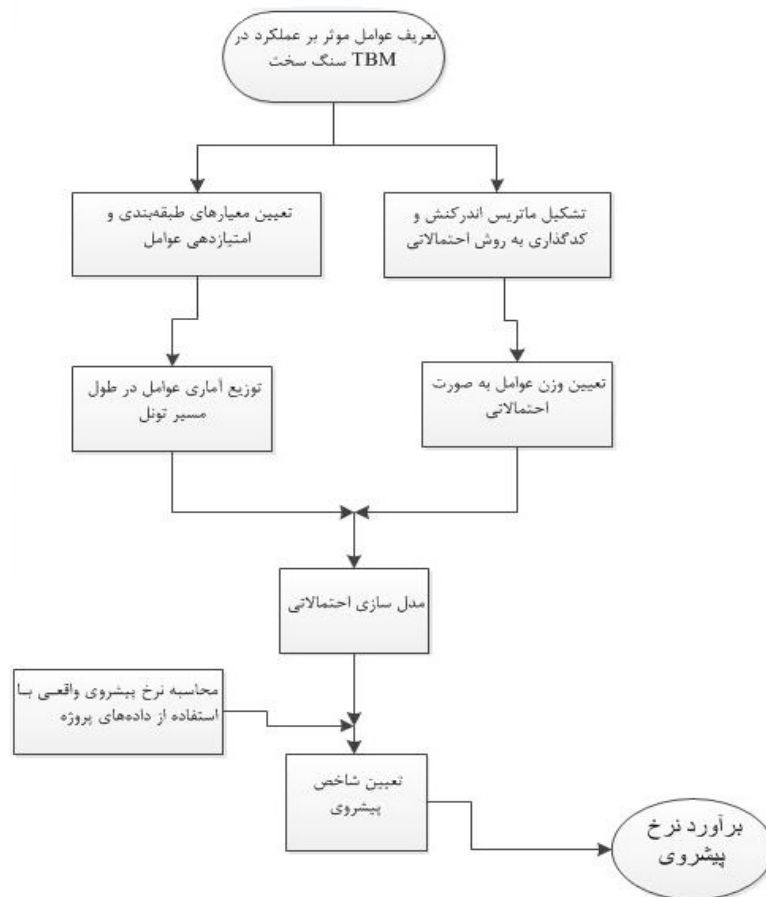
### ۳-۱- روش انجام پژوهش

در این پژوهش به منظور برآورد عملکرد TBM در شرایط سنگ سخت، از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES<sup>۱</sup>) استفاده می‌شود. رویکرد RES اولین بار در سال ۱۹۹۲ توسط هادسون ارایه شده که تا به امروز کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی مسایل ژئوتکنیکی پیدا کرده است. (Hudson, ۱۹۹۲)

---

<sup>۱</sup> Rock Engineering Systems

در شکل ۱-۱ مراحل انجام پژوهش حاضر نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود، پس از تعیین عوامل موثر بر تونل سازی در زمین های سخت، معیارهایی برای طبقه بندی بندی اطلاعات هر عامل در طول مسیر تونل مورد مطالعه تعیین می گردد.



شکل ۱-۱: مراحل انجام پژوهش

از طرفی نیز وزن عوامل با استفاده از رویکرد RES و روش کدگذاری PESQ، به صورت احتمالی تعیین شده است. علت این امر کاهش خطای قضاوت مهندسی در تعیین وزن عوامل است با توجه به ثابت نبودن و عدم قطعیت مقادیر در طول مسیر، برای مقادیر عوامل تابع توزیع احتمال تعیین شده است. با در نظر گرفتن این که اطلاعات عوامل در طول مسیر به صورت توزیع آماری و وزن عوامل نیز به طور احتمالی تعیین می شود، نتایج حاصله به صورت احتمالی خواهد بود. با مدل سازی احتمالاتی (بهره گیری از روش مونت کارلو) به تعیین شاخص عملکرد پرداخته شده است. این امر

موجب کاهش خطاهای ناشی از محاسبه مقادیر عوامل و خطاهای قضاوت مهندسی در تعیین وزن عوامل می‌شود.

شاخص عملکرد یا شاخص نرخ حفاری با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ و مدل سازی احتمالاتی تعیین می‌شود. سپس با توجه به شاخص نرخ حفاری واقعی و شاخص محاسبه شده رابطه‌ای منطقی بین این دو عامل ارایه می‌شود.

## ۴-۱- نوآوری پژوهش

نوآوری‌های اصلی پایان‌نامه‌ی حاضر شامل موارد ذیل است:

✓ برآورد نرخ پیشروی و نرخ نفوذ با توجه به سازندهای منطقه مورد بررسی برای اولین بار با استفاده از رویکرد RES.

✓ بهره‌گیری از روش کدگذاری احتمالی PESQ برای تشکیل ماتریس اندرکنش در رویکرد RES. و تولید شاخص احتمالی (شاخص نفوذ) از مقادیر و وزن‌های احتمالی عوامل به کمک رویکرد مدل‌سازی احتمالاتی.

## ۵-۱- سازماندهی پایان‌نامه

به طور کلی مطلب این پایان‌نامه در هفت فصل گردآوری شده است.

فصل اول- کلیات پژوهش: در این فصل به ضرورت تحقیق در مورد عملکرد TBM در سنگ سخت و به ویژه تونل‌های انتقال آب و نحوه‌ی انجام تحقیق پرداخته شده است.

فصل دوم- رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ: در این فصل به معرفی این رویکرد و پیشینه‌ی کاربردش در علوم مختلف پرداخته شده است. همچنین پیشرفت‌های صورت گرفته در نحوه‌ی کدگذاری ماتریس اندرکنش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل سوم- معرفی پروژه تونل انتقال آب کرج- تهران: این تونل به طول ۱۳۴۴۰ متر احداث

گردیده است، زمین شناسی مسیر و خصوصیات ژئومکانیکی عوامل مختلف در طول مسیر احداث تونل مورد بررسی قرار می گیرد.

فصل چهارم- معرفی تاثیر عوامل مختلف بر عملکرد TBM در سنگ سخت: عوامل مختلفی اعم از پارامترهای توده سنگ، ماشین و انسانی در تعیین عملکرد ماشین حفار تمام مقطع تاثیرگذار است که در این فصل بدانها پرداخته می شود.

فصل پنجم- به دست آوردن شاخص نفوذ مبتنی بر روش قطعی: با توجه به طبقه بندی های مختلف ارایه شده در فصل قبل شاخص نفوذ مبتنی بر رویکرد قطعی به دست آمده و بهترین ضریب همبستگی بین مقادیر نرخ نفوذپیش بینی شده و نرخ نفوذ واقعی محاسبه می شود.

فصل ششم- مدل سازی احتمالاتی: برای پیش بینی عملکرد ماشین حفار تمام مقطع از مدل سازی احتمالاتی در این فصل استفاده شده است.

فصل هفتم- جمع بندی و نتیجه گیری: نتایج نهایی به دست آمده از مدل سازی احتمالاتی با نتایج واقعی و مدل های دیگر مقایسه شده و اعتبارسنجی نتایج خروجی انجام می گیرد.



## ۲ فصل دوم

معرفی رویکرد سیستم های مهندسی سنگ و مدل های پیش بینی عملکرد TBM

## ۲-۱- مقدمه

در عصر حاضر پیشرفت‌های متعددی در بررسی و تحلیل مسایل پیچیده صورت گرفته است. یکی از روش‌هایی که به تدریج کاربرد زیادی در تحلیل مسایل مختلف پیدا کرده است، نگرش سیستمی است. در تفکر سیستمی با در نظر گرفتن تمامی جوانب و عوامل متعدد به بررسی مساله‌ی مورد نظر پرداخته می‌شود. با پیچیده‌تر شدن مسایل ژئوتکنیکی در کاربردهای گوناگون، با نگاهی واقع‌بینانه به موضوع در می‌یابیم که روش‌های عددی و تحلیلی هرگز قادر به در نظر گرفتن تمامی عوامل تاثیرگذار بر یک مساله خاص نبوده و همواره بسیاری از ساده‌سازی‌ها در آن‌ها استفاده شده و در نتیجه با محدودیت‌های بی‌شماری در مواجهه با مسایل مختلف روبرو هستند. رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) بر مبنای تفکر سیستمی بنا نهاده شده و کاربرد گسترده‌ای در تحلیل مسایل ژئوتکنیکی پیدا کرده است. در این فصل ابتدا به معرفی و بررسی این رویکرد و در ادامه به معرفی مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM نیز پرداخته می‌شود.

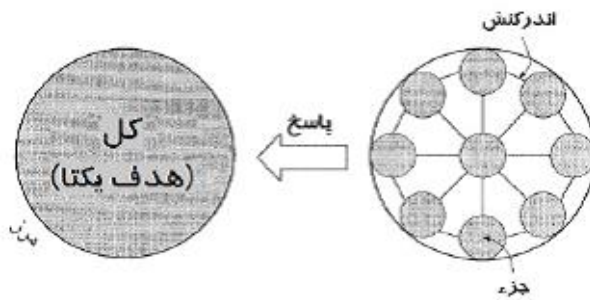
## ۲-۲- تفکر سیستمی

آلن‌بای<sup>۱</sup> سیستم را به صورت گروهی از بخش‌ها و اعضای مستقل و دارای اندرکنش بر روی همدیگر تعریف می‌کند که این اثرات باعث تغییر در انرژی، ماده و یا اطلاعات می‌شوند. طبق نظر وی، همیشه کل یک سیستم از جمع تک‌تک اعضای آن بزرگتر است (Allenby, ۱۹۹۹). این تفکر به نام تفکر سیستمی شناخته شده و روش‌هایی که به نوعی از این تفکر استفاده می‌کنند، روش‌های سیستمی نام دارند. طبق نظر جیائو<sup>۲</sup>، استفاده از رویکرد سیستمی زمانی بسیار ضروری است که با مسایلی روبرو هستیم که از پیچیدگی زیادی برخوردارند، آنچنان که روش‌های مرسوم به تنهایی و به سادگی قادر به حل آن‌ها نیستند (Jiao, ۱۹۹۵). شکل ۱-۲ مفهوم تفکر سیستمی را بیان می‌کند.

---

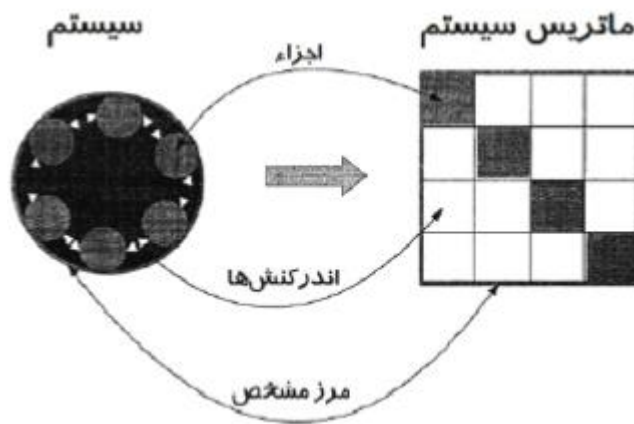
<sup>۱</sup>Allenbay

<sup>۲</sup>Jiao



شکل ۱-۲: مفهوم تفکر سیستمی (فروغ، ۱۳۹۱)

سیستم‌ها در کاربردهای مختلف معمولاً به صورت ماتریس‌هایی با نام ماتریس آن سیستم نشان داده می‌شوند. این ماتریس‌ها تمام خصوصیات یک سیستم اعم از اجزا اندرکنش‌ها و مرز مشخص را دارا هستند (Hill and Warfield, ۱۹۷۲). این مفهوم در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



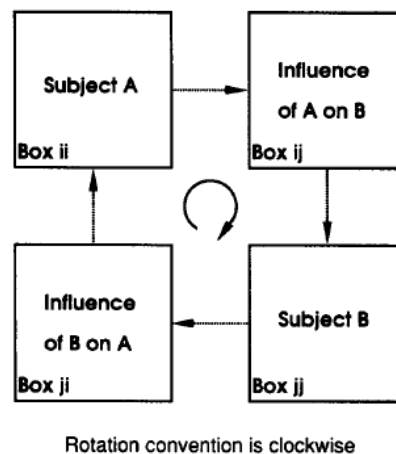
شکل ۲-۲: مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها (فروغ، ۱۳۹۱)

### ۳-۲- رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ

در طراحی پروژه‌های ژئوتکنیکی باید این اطمینان حاصل شود که تمامی عوامل تاثیرگذار و اندرکنش‌های مابین آن‌ها در نظر گرفته شده است. به عنوان یک روش سیستمی جهت مواجهه با تمام اندرکنش‌ها، می‌توان آن‌ها را در یک ماتریس جانمایی نمود. این کار به عنوان ابزاری پایه‌ای

توسط رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای اصلی مرتبط با مساله‌ی مورد نظر در امتداد قطر اصلی ماتریس جانمایی شده و اندرکنش هر جفت از عوامل در سایر درایه‌ها شکل می‌گیرند. مراحل کلی مانند کدگذاری<sup>۳</sup> اندرکنش‌ها و عملیات جبری برای سطرها و ستون‌ها اعمال شده و روش با خروج نمودارهایی ادامه می‌یابد.

روش مرسوم در ارایه و نشان دادن اندرکنش‌ها در سیستم‌ها استفاده از ماتریس‌های اندرکنش<sup>۴</sup> است (شکل ۲-۳). عوامل اصلی مورد نظر در طول قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند. همان‌گونه که در شکل ۲-۳ دیده می‌شود، عامل A در درایه‌ی بالا سمت چپ و عامل B در درایه‌ی پایین سمت راست ماتریس قرار گرفته‌اند. درایه بالا سمت راست نشان‌دهنده‌ی تاثیر A بر B و درایه پایین سمت چپ نشان‌دهنده‌ی تاثیر B روی A است. به این ترتیب، در واقع اصول پایه‌ای ماتریس اندرکنش جانمایی کردن عوامل اصلی در طول قطر اصلی و در نظر گرفتن اندرکنش‌ها در درایه‌های غیراصلی است (Warfield, ۱۹۷۲; Hudson, ۱۹۹۲).



شکل ۲-۳: مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی با دو عامل A و B (Hudson, ۱۹۹۲)

<sup>۳</sup>Coding

<sup>۴</sup> Interaction Matrix

## ۲-۴- کدگذاری ماتریس اندرکنش

طبق نظر هادسون، ارزیابی دهنده‌ی رویکرد RES، پنج روش مختلف جهت کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد (Hudson, ۱۹۹۲).

الف- روش اول به روش دودویی معروف است. در این شیوه‌ی کدگذاری، ساز و کار مابین دو عامل به صورت یکی از دو حالت روشن یا خاموش در نظر گرفته می‌شود، در صورتی که روشن باشد، درایه مورد نظر مقدار واحد را قبول کرده و در صورتی که ساز و کار مورد نظر به حالت خاموش در نظر گرفته شود، مقدار صفر در درایه‌ی مربوط به آن قرار می‌گیرد.

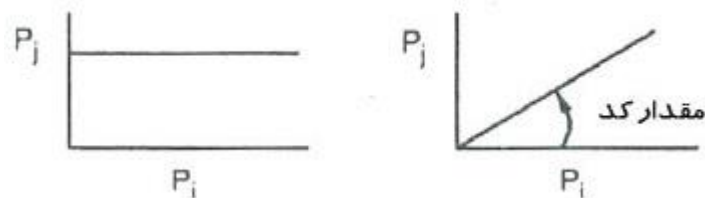
ب- روش کدگذاری دوم به روش نیمه عددی خبره<sup>۵</sup> (ESQ) معروف است که در حقیقت نوع تعمیم یافته‌ای از روش دوتایی است که دارای پنج رده‌ی کدگذاری از صفر تا چهار است. در این رده-بندی، به ترتیب صفر برای عدم وجود اندرکنش، ۱ برای اندرکنش ضعیف، ۲ برای متوسط، ۳ برای قوی، ۴ برای اندرکنش شدید در نظر گرفته می‌شود. این روش کدگذاری، از حساسیت بیشتری نسبت به روش قبلی که به صورت بسیار ساده تنها روشن یا خاموش بودن درایه‌ها را تعیین می‌نمود، برخوردار است.

ضعف اصلی روش مربوط به تغییرپذیری بسیار زیاد آن در تخصیص رده‌ها به درایه‌هاست که آن را در تشریح کامل ساز و کارهای مربوطه ناتوان ساخته است. از طرفی در این روش، عمل کدگذاری توسط یک کارشناس یا خبره و یا گروهی از کارشناسان انجام می‌گیرد که این مساله باعث ذهن‌گرایی<sup>۶</sup> کدگذاری‌ها و نتایج به دست آمده می‌گردد. با این حال، به دلیل عدم وجود یک روش مرسوم دیگر برای پوشش این ضعف و نیز سادگی استفاده از آن، در حال حاضر این روش از بیشترین کاربرد برخوردار است.

<sup>۵</sup> Expert Semi-Quantitative

<sup>۶</sup> Subjectivity

ج- روش سوم، از شیب نمودار عوامل برای کدگذاری استفاده می‌شود. اگر نمودار  $P_i - P_j$  به صورت یک خط افقی باشد، در این صورت  $P_j$  به  $P_i$  وابسته نیست. ولی اگر رابطه خطی مابین آن‌ها وجود داشته باشد، ساز و کار مربوطه می‌تواند توسط شیب خط کدگذاری شود که در حقیقت سرعت تغییرات  $P_j$  به عنوان تابعی از  $P_i$  را نشان می‌دهد. به منظور استفاده از این روش، بایستی نمودارهای  $P_i - P_j$  برای تمامی درایه‌های غیراصلی ماتریس مشخص شوند. عدم خطی بودن روابط میان عوامل مشکلی است که در بسیاری از موارد وجود خواهد داشت.



شکل ۲-۴: روش سوم کدگذاری ماتریس اندرکنش با استفاده از شیب خط نمودار  $P_i - P_j$  (Hudson, ۱۹۹۲)

د- روش چهارم، تطبیقی از یک رویکرد سیستمی مستقیم است. در این روش، فرض بر این است که تمام ساز و کار در درایه‌های ماتریس اندرکنش می‌توانند به صورت یک معادله‌ی مشتقات جزئی<sup>۷</sup> (PDE) بیان شوند. به عنوان مثال، اگر فرض کنیم که تمام ساز و کارهای موجود در ماتریس را بتوان توسط معادلات مشتقات جزئی مرتبه اول بیان کرد، در این صورت توابع نمایی و نمایی منفی قادر خواهند بود که روابط  $P_i - P_j$  را توصیف نمایند. این روش نیز از ضعفی مشترک با آنچه برای روش سوم بیان شد برخوردار است. علاوه بر این، با وجود این که اعمال معادلات مشتقات جزئی مرتبه دوم راه حل واقعی‌تری به نظر می‌رسد، ولی همین کار می‌تواند در ماتریس‌های بزرگ عملی بسیار سخت و پیچیده (و گاه غیر ممکن) به شمار آید.

ه- روش پنجم، روش صریح<sup>۸</sup> نام دارد. در این حالت فرض می‌شود که چنان آگاهی کاملی از

<sup>۷</sup> Partial Differential Equation

<sup>۸</sup> Explicit

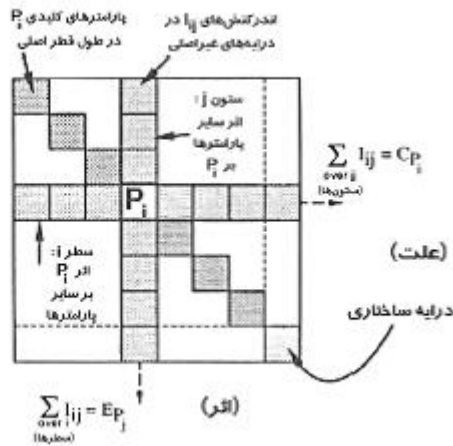
کل ساز و کارهای ماتریس وجود دارد که امکان تحلیل عددی (Numerical) آن‌ها فراهم است و می‌توان رفتار واقعی اندرکنش‌ها را مورد سنجش قرار داد.

چنین آگاهی و اطلاعاتی مسلماً هرگز به طور کامل برای یک ماتریس وجود نخواهد داشت، ولی در صورت استفاده از تمام اطلاعات موجود، می‌تواند با روش‌های دوم و چهارم تلفیق شده و مورد بررسی قرار گیرد.

روش ESQ در میان سایر روش‌ها، با وجود ضعف آشکار تا حد زیادی موفق بوده و تاکنون از بیشترین کاربرد برخوردار بوده و به صورت اولیه در بسیاری از موارد پیشنهاد شده است.

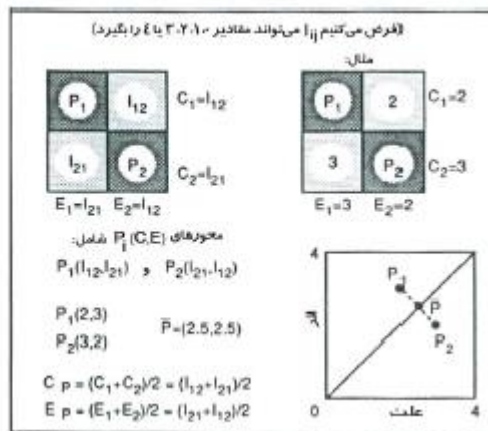
## ۲-۵- نمودار علت- اثر

نحوهی شکل گیری محورهای علت و اثر در نمودارهای شکل ۲-۵ قابل مشاهده است. عوامل اصلی ( $P_i$ ) در امتداد قطر اصلی ماتریس جانمایی شده‌اند. با توجه به نحوه ساختن ماتریس، واضح است که هر سطر عبوری از  $P_i$  نشان‌دهندهی تاثیر آن بر تمام پارامترهای دیگر موجود در سیستم است. بالعکس، هر ستون عبوری از  $P_j$  نشان‌دهندهی تاثیر پارامترهای دیگر سیستم بر روی آن می‌باشد. به محض اینکه ماتریس به صورت عددی کدگذاری شود، می‌توان جمع هر سطر و ستون آن را به دست آورد. مجموع مقادیر عددی هر سطر به نام علت (Cause) و همین‌طور مجموع مقادیر هر ستون به نام اثر (Effect) شناخته می‌شوند که در نهایت سبب به وجود آمدن محورهای C و E می‌گردند. بنابراین، C ارایه‌گر نحوه تاثیرات  $P_i$  بر سیستم و E نشان‌دهندهی تاثیری است که سیستم بر  $P_i$  می‌گذارد.



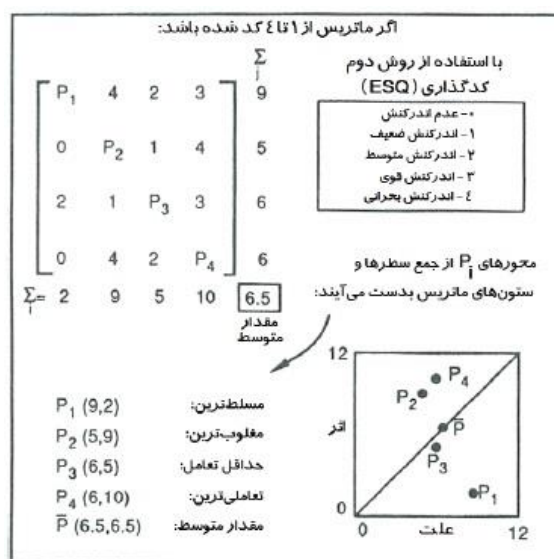
شکل ۲-۵: نحوه شکل‌گیری نمودارهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش (فروغ، ۱۳۹۱)

مقادیر محورها برای هر پارامتر می‌تواند بر روی نموداری به نام نمودار علت-اثر انتقال یابد. برای معرفی اولیه این مفهوم، ابتدا بر روی نمودار (C,E)، دو پارامتر بحث می‌شود که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. برای چنین ماتریسی، با استفاده از روش کدگذاری ESQ، مجموع مقادیر برای سطرها یا ستون‌ها، عدد ۴ می‌باشد. این ماتریس نحوه رسم نمودار یاد شده را به صورت بسیار ساده نشان می‌دهد. در شکل ۲-۶ نمودار (C,E) به سه پارامتر تعمیم داده شده است و همراه با مثال‌هایی از ماتریس متقارن ارائه شده است. همچنین در شکل ۲-۷، نمونه‌ای از نحوه کدگذاری ماتریس اندرکنش ۴\*۴ می‌باشد، که P به عنوان میانگین P<sub>i</sub>ها بر روی خط C=E قابل توجه است.



شکل ۲-۶: نمونه‌ای از یک ماتریس اندرکنش کدگذاری شده ۲\*۲ و نمودار علت-اثر آن (Hudson, ۱۹۹۲)





شکل ۲-۷: نمونه ای از نحوه کدگذاری ماتریس اندرکنش ۴\*۴ (فروغ، ۱۳۹۱)

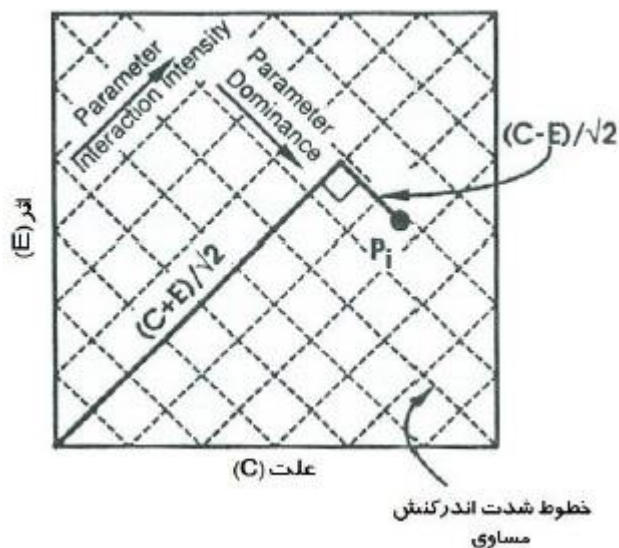
موقعیت نقاط روی نمودار علت- اثر نشان دهنده نوع اثر متقابل هر پارامتر است. همانطور که در شکل ۲-۷ مشخص است، پارامتر  $P_4$  دارای بیشترین شدت اندرکنش می‌باشد، چرا که دارای بیشترین مقدار  $C+E$  است. کمترین شدت اندرکنش نیز مربوط به پارامترهای  $P_3$  و  $P_1$  است که دارای کمترین مقادیر  $C+E$  هستند. غالب‌ترین<sup>۹</sup> پارامتر  $P_1$  به دلیل دارا بودن بیشترین مقدار  $C-E$  می‌باشد. این بدان معنی است که بیشتر از آن که سیستم بر  $P_1$  تاثیرگذار باشد، این پارامتر سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مغلوب‌ترین<sup>۱۰</sup> پارامترها نیز  $P_4$  و  $P_2$  می‌باشند که دارای کمترین  $C-E$  هستند.

چنین تفسیرهایی را می‌توان مستقیماً از نمودار  $(C,E)$  نیز انجام داد. شکل ۲-۸ مفهوم مربوط به خصوصیت شدت اثر متقابل و تسلط پارامتر را نشان می‌دهد. این شکل بیان کننده این موضوع است که شدت اثر متقابل یک پارامتر در امتداد خط  $C=E$  اندازه‌گیری شده و تسلط پارامتر نیز با فاصله عمودی نقطه مربوطه تا خط یاد شده سنجیده می‌شود.

<sup>۹</sup> Dominant

<sup>۱۰</sup> Subordinate

نمودار  $P_i(C,E)$  نشاندهنده شده در فضای علت-اثر



شکل ۲-۸: شدت اثر متقابل و تسلط پارامتر (Hudson, ۱۹۹۲)

## ۲-۶- سابقه استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ در زمینه‌های

### مختلف

سیستم‌های مهندسی سنگ از زمان معرفی آن در سال ۱۹۹۲ تاکنون یکی از پرکاربردترین رویکردهای سیستمی در زمینه‌های مختلف بوده است. در مسایلی که تعداد عوامل دخیل و موثر بر سیستم زیاد باشد، این رویکرد قابلیت استفاده بسیار خوبی نسبت به سایر روش‌های مرسوم از خود نشان می‌دهد. در این بخش به بعضی از کاربردها از ابتدا تاکنون به اختصار اشاره می‌شود.

مبانی رویکرد سیستم مهندسی سنگ (RES) برای اولین بار توسط هادسون در سال ۱۹۹۲ معرفی شد (Hudson, ۱۹۹۲; Hudson and Harrison, ۱۹۹۲). طی این معرفی، وی اصول اولیه‌ی رویکرد و نحوه‌ی استفاده از آن را به روشنی ارائه داد و به این ترتیب به عنوان نخستین بار تحلیل‌های سیستمی وارد مهندسی سنگ و کاربردهای مشابه شده است. پس از آن، این رویکرد به دلیل مزایای بسیار، به سرعت تبدیل به یک ابزار دارای پتانسیل بالا برای حل مسایل پیچیده‌ی مهندسی سنگ

شد. همچنین روش مذکور در مباحث متنوعی غیر از مهندسی سنگ نیز مطرح شده و کاربرد یافته است که در این بخش سعی شده است به تمامی آن‌ها از ابتدا تاکنون اشاره گردد.

در سال ۱۹۹۲، هادسون و همکاران با استفاده از روش ارایه شده، با ارزیابی عوامل موثر بر چند پروژه‌ی مهندسی سنگ، مخاطره‌ی این پروژه‌ها را مورد تحلیل قرار دادند (Hudson et al., ۱۹۹۲). اسمیت در سال ۱۹۹۴ به ارزیابی زمین‌شناسی مهندسی کارهای معدنی کم عمق با استفاده از RES پرداخت (Smith, ۱۹۹۴). در ۱۹۹۵، جیائو با به کارگیری روش RES در برخی کاربردهای مهندسی، سعی در رسمی‌سازی استفاده از این روش داشت (Jiao, ۱۹۹۵). مازوکولا و هادسون در ۱۹۹۶ برای اولین بار روش مذکور را در کارهای تحلیل پایداری شیب‌های طبیعی وارد نمودند (Mazzoccola and Hudson, ۱۹۹۶). در این مطالعه، ناپایداری شیب‌های طبیعی رشته‌کوه‌های آلپ مرکزی در ایتالیا مورد پیش بینی و ارزیابی قرار گرفت.

اسکاگیوس و همکارانش در سال ۱۹۹۷ از RES برای سنجش میزان خطرات زیست محیطی ناشی از دفن زباله‌های هسته‌ای در سوئد استفاده نمودند (Skaginus et al., ۱۹۹۷). در این تحقیق، سیزده عامل به عنوان عوامل اصلی تاثیر گذار بر سیستم در نظر گرفته شده بودند. کاستالدینی و همکاران در سال ۱۹۹۸، اثرات ناشی از زلزله را بر پایداری شیب‌های طبیعی رشته‌کوه‌های آپنینز ایتالیا با روش سیستمی و در دو حالت استاتیکی و دینامیکی تحلیل نمودند (Castaldini et al., ۱۹۹۸). ون‌دورپ و همکاران در سال ۱۹۹۹، ماتریس‌های اندرکنش را در بخشی از تحلیل‌های به کار رفته به منظور مدل‌سازی آلودگی‌های ناشی از انباشت زباله‌های هسته‌ای در چند کشور اروپایی مورد استفاده قرار دادند (VanDorp et al., ۱۹۹۹). در همین سال، لاتام و لو از روش RES با کدگذاری اصلاح شده در ارایه یک سیستم ارزیابی قابلیت انفجار توده سنگ‌ها بهره بردند (Latham and Lu, ۱۹۹۹). در سال ۲۰۰۰، شانگ و همکارانش از روش RES جهت انتخاب بهترین مکان برای ساخت نیروگاه زیرزمینی شیسان-لینگ در چین استفاده کردند (Shang et al., ۲۰۰۰). آن‌ها برای این

منظور شاخصی به نام شاخص تناسب جامع تعریف کردند که در نهایت بهترین مکان را با توجه به آن انتخاب نمودند. علی و حسن در سال ۲۰۰۲ در کاری کاملاً مشابه با مطالعه‌ی مازوکولا و هادسون (۱۹۹۶)، با تعریف شاخص ناپایداری توده سنگ، اقدام به ارزیابی ناپایداری شیب‌های طبیعی منطقه بندربان در بنگلادش نمودند (Ali and Hasan, ۲۰۰۲). ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ خطر سقوط سنگ از شیب‌های سنگی حاشیه بزرگراه چنگدو- لاسا به طول ۴۳۰ کیلومتر در چین را در ۱۹ ایستگاه به کمک روش سیستم‌های مهندسی سنگ تحلیل نمودند (Zhang et al., ۲۰۰۴). شاخص مورد استفاده آن‌ها شاخص خطر سقوط سنگ نام داشت. در همین سال، بناردوس و کالیامپاکوس در ارزیابی خطرات ژئوتکنیکی در حفر تونل تمام مقطع متروی آتن یونان از روش RES استفاده کردند و با تعریف شاخص آسیب پذیری یا حساسیت به ریزش در ایستگاه‌های مختلف حفاری تونل توانستند این خطرات را برآورد نمایند (Benardos and Kaliampakos, ۲۰۰۴). در سال ۲۰۰۵، شانگ و همکارانش با استفاده از ماتریس اندرکنش تشکیل شده از عوامل زمین شناسی به ناحیه‌بندی زمین شناسی مهندسی منطقه‌ای واقع در حاشیه‌ی بزرگراه سیچوان- تیبِت پرداختند (Shang et al., ۲۰۰۵). آن‌ها برای این منظور اقدام به تعریف و تشکیل شاخص ناحیه بندی زمین شناسی نمودند. اندریوکس و حاجیجورجیو در سال ۲۰۰۸ روشی را برای تعیین قابلیت تنش‌زدایی انفجار در پایه‌های معادن زیرزمینی ارائه دادند (Anderiux and Hadjigeorgiou, ۲۰۰۸). آن‌ها با استفاده از روش RES و تعیین شاخصی به منظور رسیدن به هدف یاد شده، توانستند تصحیحاتی در روش مرسوم طراحی پایه‌های بزرگ مقیاس ارائه نمایند. دی‌پیپو و همکارانش در همین سال برای ارزیابی خطرات مختلف در نواحی ساحلی جنوب ایتالیا و شهر ناپلس از رویکرد سیستم RES استفاده نمودند (DePippo et al., ۲۰۰۸). بودتا و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۸ با استفاده از یک الگوریتم بر مبنای GIS و RES، نداشت خطرات وقوع زمین لغزش را برای ناحیه‌ی کلینتو ایتالیا انجام دادند (Budetta et al., ۲۰۰۸). همچنین، سریان و سریان با استفاده از ماتریس‌های اندرکنش به مطالعه و ناحیه‌بندی حساسیت ریزش‌های طبیعی ناحیه دوگانکت در کشور ترکیه پرداختند (Ceryan and Ceryan,

۲۰۰۸). روزوس و همکارانش نیز کاری مشابه را برای شیب‌های طبیعی استان کاردیتسا در یونان در سال ۲۰۰۸ انجام دادند (Rozos et al., ۲۰۰۸). در سال ۲۰۰۹، شین و همکارانش با استفاده از رویکرد RES و تعریف شاخص خطر ریزش تونل، روشی برای ارزیابی کمی خطرات پایداری تونل‌ها در کره جنوبی ارائه دادند (Shin et al., ۲۰۰۹). در همین سال، کندور و اصغری از تلفیق این رویکرد و روش‌های تصادفی برای تحلیل داده‌های رفتارنگاری خطر نشت دی‌اکسیدکربن از دیواره‌های چاه‌ها و مخازن استفاده کردند (Condor and Asghari, ۲۰۰۹). در سال ۲۰۱۱ روزوس و همکاران با تلفیق رویکرد RES و GIS به مطالعه ارزیابی خطر لغزش زمین و تهیه نقشه‌های حساسیت برای شیب‌های طبیعی شرق شبه جزیره پلوپونسوس در جنوب یونان پرداختند (Rozos et al., ۲۰۱۱). فرنتینو و همکاران در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۱، و ۲۰۱۲ از رویکرد RES برای تحلیل خصوصیات ژئوتکنیکی رسوبات دریایی در منطقه زاکینتوس یونان بهره بردند (Ferentinou et al., ۲۰۱۰; Ferentinou et al., ۲۰۱۱; Ferentinou et al., ۲۰۱۲). در سال ۲۰۱۱ زارع و همکاران با استفاده از این رویکرد به بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر روی شیب دیواره‌های سنگی در منطقه ییلاقی ایران پرداختند (Zare et al., ۲۰۱۱). در سال ۲۰۱۲ فرامرزی و همکاران با استفاده از رویکرد RES مدلی برای تعیین مخاطره و عقب‌زدگی در انفجار پله‌ها ارائه کردند (Faramarzi et al., ۲۰۱۲). مطالعه‌ی موردی این پژوهش معدن مس سونگون بوده است. در این تحقیق، شاخص آسیب‌پذیری تشکیل شده و به مقایسه‌ی ارتباط بین این دو شاخص و میزان عقب‌زدگی پرداخته شده است. امید فروغ و ترابی با استفاده از این رویکرد به پیش‌بینی زمان توقف TBM در پروژه‌های مختلف انتقال آب در ایران پرداختند (Frough and Torabi, ۲۰۱۳). خراسانی و همکاران نیز با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ به برآورد ضریب بهره‌وری در مسیر خط ۷ مترو تهران پرداختند که، به نتایج قابل قبولی نیز دست یافتند (خراسانی و همکاران، ۱۳۹۲).

## ۲-۷- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM

تاکنون مطالعات زیادی برای پیش‌بینی عملکرد TBM انجام شده است. نتیجه بسیاری از این مطالعات تنها ارایه مدلی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ بوده است. در بعضی از این مطالعات علاوه بر نرخ نفوذ، ضریب بهره‌وری نیز در نظر گرفته شده و در نهایت مدلی برای پیش‌بینی نرخ پیشروی ارائه شده است. به طور کلی می‌توان مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM را در دو گروه اصلی ذیل تقسیم‌بندی نمود (Rostami et al., ۱۹۹۷).

✓ مدل‌های تجربی که بر اساس اندازه‌گیری نرخ پیشروی TBM و بعضی از خصوصیات توده سنگ توسعه یافته‌اند.

✓ مدل‌های تئوری-تجربی که بر اساس تست‌های آزمایشگاهی و نیروی برش توسعه یافته‌اند.

در جدول زیر مدل‌های مختلفی که توسط محققین ارایه شده است، نشان داده شده است.

جدول ۲-۱: مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM (فروغ، ۱۳۹۱)

مدل‌های ارایه شده	روش‌ها	پارامترهای مورد استفاده
تارکوی (۱۹۷۳)	تجربی	مقادیر سختی سنگ سخت
راکسبورو و فیلیپس (۱۹۷۵)	تئوری-تجربی	نیروی کاتر (V شکل)
گراهام (۱۹۷۶)	تجربی	مقاومت نهایی سنگ بکر
ازدمیر (۱۹۷۷)	تئوری-تجربی	نیروی کاتر، مقاومت نهایی سنگ بکر
فارمر و گلوسوپ (۱۹۸۰)	تجربی	مقاومت کششی سنگ بکر
اسنودان و همکاران (۱۹۸۲)	تئوری-تجربی	نیروی کاتر (V شکل)
سانبو (۱۹۸۵)	تئوری-تجربی	نیروی کاتر (V شکل)
ساتو و همکاران (۱۹۹۱)	تئوری-تجربی	نیروی کاتر
اینائوراتو و همکاران (۱۹۹۱)	تجربی	طبقه بندی توده سنگ RSR

CAI, UCS, BTS (شکل CCS) نیروی کاتر	تئوری- تجربی	رستمی و ازدمیر (۱۹۹۳)
سنگ بکر و پهنای نوک کاتر		
طبقه بندی توده سنگ RMI	تجربی	پالمستروم (۱۹۹۵)، RMI
فاصله‌داری کاترها، تخلخل و نیروی تراست، زاویه $\alpha$ ، فراوانی شکستگی، DRI، BWI، قطر کاتر	تجربی	برولند (۱۹۹۸)، NTNU
طبقه بندی توده سنگ Q	تجربی	بارتون (۲۰۰۰)، QTBM
CAI، DPW، $\alpha$ ، شاخص شکنندگی، CSM	تئوری- تجربی	یاگیز (۲۰۰۲)، MCSM
RMR گسترش یافته	تجربی	بنیاوسکی و همکاران (۲۰۰۷)، RME
DPW، $\alpha$ ، شاخص شکنندگی، مقاومت نهایی توده سنگ	تجربی	یاگیز (۲۰۰۸)
پارامترهای توده‌سنگ	تجربی	گانگ و ژائو (۲۰۰۹)
محاسبه اندیس نفوذ میدانی با استفاده از خصوصیات توده سنگ	تجربی	حسن‌پور و همکاران (۲۰۰۹)
شکنندگی، چگالی درزه‌داری، $\alpha$	تجربی	خادمی حمیدی و همکاران (۲۰۱۰)

در این بخش، در بین مدل‌هایی که برای پیش بینی نرخ پیشروی ارائه شده است، مدل‌های CSM، NTNU و QTBM که جامع‌تر و پرکاربردتر از سایر مدل‌های پیش‌بینی نرخ پیشروی هستند مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۲-۷-۱- مدل CSM

این مدل تئوری- تجربی طی مطالعاتی در دانشکده معدن کلرادو توسعه یافته و اولین نسخه آن توسط ازدمیر و همکاران در سال ۱۹۷۷ ارائه شده است (Ozdmir, ۱۹۷۷). این مدل نیروی مورد نیاز برش سنگ را در یک مقدار نفوذ معین بر حسب میلی‌متر بر دور کاترهد، بر مبنای هندسه برش و

شکل دیسک کاتر تخمین می‌زند.

مدل CSM بر مبنای بانک اطلاعاتی حاصل از آزمایش بزرگ مقیاس برش خطی<sup>۱۱</sup> بر روی انواع سنگ بنا شده است (Rostami et al., ۱۹۹۷). این مدل به صورت مستقیم تاثیر ناپیوستگی‌های توده سنگ را در نظر نمی‌گیرد، اما اصلاحاتی برای لحاظ نمودن تاثیر شرایط توده سنگ در پیش‌بینی عملکرد TBM در این مدل توسط یاگیز، شیما و رمضان زاده پیشنهاد شده است (Ramezanzadeh et al., ۲۰۰۸).

مطالعات نشان می‌دهد که هندسه کاتر تاثیر زیادی روی نیروی اعمال شده بر آن دارد. در دیسک کاترها، نیروی وارده بر کاتر با افزایش فاصله دو کاتر مجاور و عمق نفوذ آنها افزایش می‌یابد. همچنین یک فاصله‌داری بهینه برای یک نرخ نفوذ معین وجود دارد که در آن انرژی ویژه حداقل است. در زیر دیسک کاترها، هنگامی که در سنگ نفوذ می‌کنند یک منطقه خرد شده که حباب فشار نامیده می‌شود، تشکیل می‌شود. این ناحیه تنش را به سنگ منتقل می‌کند. شکل این منطقه مشخص نشده است اما برای ساده‌سازی دایره فرض می‌شود (Rostami and Ozdmir, ۱۹۹۳).

برای تعیین مقدار فشار ناحیه خرد شده که برای گسترش ترک‌ها میان دو برش کافی باشد، یک راه حل کلی به دست نیامده است. اما برای تخمین فشار می‌توان از رابطه میان نیروهای برش و پارامترهای برش استفاده نمود. برای این منظور از بانک اطلاعاتی که بر مبنای آزمایش برش خطی در سنگ‌های مختلف و با هندسه‌های مختلف برش تهیه شده، استفاده شده است. این بانک اطلاعاتی شامل فشار تخمین زده شده، فاصله‌داری و عمق نفوذ، قطر و عرض لبه آن، مقاومت فشاری و کششی سنگ است. روابط مورد نیاز برای تخمین عمق نفوذ دیسک در سنگ از تحلیل رگرسیون این داده‌ها به دست آمده است (Rostami and Ozdmir, ۱۹۹۳).

رستمی در سال ۱۹۹۷ در روش CSM روابط زیر را به صورت موفق در پروژه‌های مختلف

---

<sup>۱۱</sup> Linear Cutting Test



استفاده کرد. در این روابط C ثابتی است که مقدار آن در حدود ۲/۱۲ است.

$$P^0 = C^3 \sqrt{\frac{\sigma_c^2 \cdot \sigma_t \cdot S}{\phi \sqrt{RT}}} \quad (1-2)$$

در این رابطه P<sup>0</sup> رابطه فشار پایه در ناحیه شکسته شده، σ<sub>c</sub> مقاومت فشاری تک محوره، σ<sub>t</sub> مقاومت کششی سنگ، S فاصله بین کاترها، φ زاویه تماس سنگ با تیغه برشی، R شعاع تیغه برشی و T پهنای تیغه برشی می‌باشد.

$$F_t = \int_0^\phi TRP d\theta = \frac{TRP\Phi}{1 + \Psi} \quad (2-2)$$

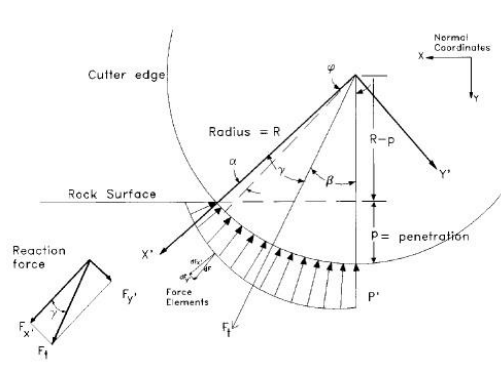
$$F_n = F_t \cos(\phi/2), \quad F_r = F_t \sin(\phi/2) \quad (3-2)$$

در این روابط F<sub>t</sub> نیروی برآیند کل، F<sub>r</sub> نیروی وارده مماسی، F<sub>n</sub> نیروی عمودی وارد بر سنگ می‌باشد.

مقدار نرخ نفوذ در هر چرخش طبق فرمول زیر به دست می‌آید.

$$P = P^0 (\alpha/\phi) \Psi \quad (4-2)$$

مقدار α از روی شکل زیر به دست می‌آید.



شکل ۹-۲: نیروهای وارده و عکس العمل سنگ (Rostami, ۱۹۹۱)

همچنین قابل ذکر است، فرمول عمومی برای به دست آوردن فشار پایه در ناحیه شکست از تحلیل رگرسیون داده‌های موجود به دست می‌آید که در منابع موجود فرمول‌های زیادی پیشنهاد شده است. به طور طبیعی این فرمول‌ها به دلیل استفاده از داده‌های محدود، بازه کاربری خاصی را نیز دارا می‌باشند. این محدودیت به دلیل خصوصیات مقاومتی سنگ، هندسه و اندازه تیغه‌های برشی می‌باشد.

#### ۲-۱-۷-۱-۱- بهره‌وری در مدل CSM

موسسه مکانیک سنگ دانشکده معدن کلرادو برای محاسبه ضریب بهره‌وری، روابط تاخیرات ناشی از عوامل مختلف را ارائه کرده است، که در زیر به اختصار به آن‌ها پرداخته شده است.

الف- بر اساس RQD (USACE, ۱۹۹۷)، در روابط زیر ضریب  $F_1$  نشان دهنده اثر توده سنگ بر بهره‌وری ماشین حفار می‌باشد.

$$F_1 = 1 + (100 - RQD) / 150 \quad UCS < 110 \text{ MPa} \quad (5-2)$$

$$F_1 = 1 + (100 - RQD) / 75 \quad UCS \geq 110 \text{ MPa} \quad (6-2)$$

بر اساس پایگاه اطلاعات موسسه مکانیک زمین دانشکده معدن کلرادو، فرسایش دیسک‌ها تا زمانی که قطر دیسک‌ها تا حدود ۴۰ میلیمتر کاهش نیافته تأثیری بر نرخ نفوذ ندارد. زمان توقف به منظور تعویض دیسک به صورت ساعت بر متر بیان می‌شود. این زمان در سنگ‌های غیر ساینده ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ ساعت بر متر و در سنگ‌های ساینده ۰/۲ ساعت بر متر است (فروغ، ۱۳۹۱).

ب- بر اساس شعاع در مسیرهای قوسی برای توده سنگ با  $RQD=100$ ، در رابطه (۷-۲)،  $F_2$  ضریب تصحیح عمر تیغه‌های برشی در مسیرهای قوسی می‌باشد (شریعت علوی و همکاران، ۱۳۸۹).

$$F_2 = 1.23 / R \quad (7-2)$$

ج- بر اساس تاخیرات مرتبط با دیوارگیری مجدد، ضریب  $F_3$  نیز بیانگر تاخیرات مرتبط با

دیوارگیری مجدد می‌باشد (شریعت علوی و همکاران، ۱۳۸۹)

$$F_3 \text{ (hr/m)} = 0/0/30 \text{ (hr/m)} + (409 \text{ m.hr}) / \quad (8-2)$$

$$R^2$$

د- تاخیرات مربوط به تعمیرات پیش‌بینی نشده، برای در نظر گرفتن تعمیرات پیش‌بینی نشده

ضریب  $F_4$  بر حسب ساعت تاخیر پیشنهاد شده است. این ضریب در شروع حفاری (زمان آموزش) ۱

ساعت بر ساعت حفاری ماشین است. در ادامه حفاری این زمان  $0/324$  ساعت در نظر گرفته شده

است. زمان تعمیرات دوره‌ای  $0/067$  ساعت بر ساعت حفاری ماشین است. تاخیرات نقشه‌برداری

$0/033$  ساعت بر متر حفاری TBM در نظر گرفته می‌شود. در قوس‌ها این زمان از رابطه ذیل به

دست می‌آید (شریعت علوی و همکاران، ۱۳۸۹)

$$\text{Survey delay} = 0/0/33 + 192/R^2 \quad \text{h/m} \quad (9-2)$$

ه- تاخیرات مربوط به وجود آب، تاخیری که به خاطر وجود مقادیر کم آب می‌توان توقع

داشت، در حدود  $0/056$  ساعت بر متر حفاری است. برای شرایطی که مقدار آب به ۳ تا ۴ متر

مکعب بر دقیقه طول تونل برسد، این تاخیر به حدود  $0/085$  ساعت بر متر حفاری می‌رسد. در دبی

های بالاتر که عملیات تزریق نیز انجام می‌شود، این تاخیر افزایش می‌یابد. تاخیرات ناشی از تخلیه

مواد حفاری شده با توجه به شیب تونل و جهت حفاری در جدول ۲-۲ آورده شده است (فروغ،

۱۳۹۱).

جدول ۲-۲: تاخیرات مربوط به تخلیه مواد حفاری با توجه به شیب تونل

تاخیر (m/h)	روش حمل و نقل	شرایط تونل
۰/۱۱۵	کامیون	شروع حفاری تونل
۰/۰۷۱	نوار نقاله	۱۵- تا ۱- درجه رو به پایین
۰/۰۵۶	قطار	۱- درجه تا ۳+ درجه
۰/۰۷۱	نوار نقاله	۳+ تا ۱۵+ درجه به سمت بالا

و- تاخیرات ناشی از لجستیک تونل، که به شیب تونل (G شیب تونل بر حسب درجه) بستگی دارد، مطابق رابطه زیر بیان می شود (فروغ، ۱۳۹۲).

$$\text{Utility delay} = 0.03 + 0.0013G \quad \text{h/m} \quad (10-2)$$

ز- تاخیر ناشی از نصب نگهداری موقت در ارتباط با RMR در جدول ۲-۳ آورده شده است. این مدل تاخیرات ناشی از تعویض شیفت، نهار و غیره را به طور کلی ۴/۵ درصد زمان شیفت پیشنهاد می کند (فروغ، ۱۳۹۲)

جدول ۳-۲: تاخیرات ناشی از نصب نگهداری موقت در ارتباط با RMR

تاخیر (h/m)	کلاس RMR
۰	۳,۲,۱
۰/۰۲۸	۴
۰/۰۴۳	۵

## ۲-۷-۲-مدل NTNU

این مدل که به طور گسترده‌ای در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، توسط دانشگاه علوم و تکنولوژی تروندهایم توسعه پیدا کرده است. مدل NTNU پس از شروع حفاری مکانیزه در نروژ توسعه پیدا کرده و با استفاده از اطلاعات جدید به روز شده است. این مدل بر مبنای اطلاعات سیستماتیک ۳۵ پروژه، بیش از ۲۵۰ کیلومتر تونل توسعه یافته است. جدول زیر پارامترهای این

روش را به طور خلاصه نشان می‌دهد (Bruland, ۱۹۹۸).

جدول ۲-۴: پارامترهای مورد استفاده در روش NTNU

پارامترهای سنگ	پارامترهای ماشین
شکستگی ها، درزه داری و غیره	نیروی رانش دیسک
شاخص میزان چالزنی (DRI)	سرعت چرخش راس حفار
سایندگی (AV) و CLI	فاصله ابزار برنده
	توان نسبی

نرخ نفوذ از روابط ذیل به دست می‌آید.

$$i_o = (M_{ekv} / M_1)^b \quad (\text{mm/h}) \quad (11-2)$$

$$I_o = i_o \text{RPM} (60/1000) \quad (\text{m/h}) \quad (12-2)$$

پارامترهای به کار رفته در این روابط،  $i_o$  نرخ نفوذ (mm/h)،  $I_o$  نرخ نفوذ (m/h)،  $M_1$  نیروی رانش بحرانی (KN/c) - نیرویی که در آن مقدار نفوذ ۱ میلیمتر بر دور کاترهد باشد -  $M_{ekv}$  نیروی معادل پشت هر دیسک برشی (KN/c) و  $b$  ضریب نفوذ می‌باشند. نیروی رانش بحرانی و ضریب نفوذ با توجه به گراف‌های ارائه شده در این مدل تعیین می‌شوند (Bruland, ۱۹۹۸).

بهره‌وری NTNU -۱-۲-۷-۲

برای به دست آوردن بهره‌وری در این مدل، زمان عملیات مختلف بر حسب ساعت بر کیلومتر بیان می‌شود. ضریب بهره‌وری TBM از رابطه ذیل به دست می‌آید (Bruland, ۱۹۹۸).

$$U = (100 \cdot T_b) / (T_b + T_t + T_{tbm} + T_c + T_{bak} + T_a) \% \quad (13-2)$$

$T_b$  حفاری واحد: با توجه به نرخ نفوذ ( $I_n$ ) از رابطه ذیل به دست می‌آید.

$$T_b = 1000/I_n \quad (\text{h/km}) \quad (14-2)$$

$T_t$  دیوارگیری مجدد: این زمان به طول هر کورس جک‌های تراست بستگی دارد که از رابطه ذیل به دست می‌آید. در این رابطه  $I_n$  طول هر گام حفاری و  $T_{tak}$  زمان هر بار دیوارگیری است.

$$T_t = (1000 T_{tak}) / (60 I_s) \quad (\text{h/km}) \quad (15-2)$$

$T_c$  زمان بازدید و تعویض دیسک کاترها: با توجه به عمر دیسک کاترها  $H_h$ ، نرخ نفوذ  $I_n$  و زمان مورد نیاز برای تعویض هر دیسک  $T_c$  به دست می‌آید.

$$T_c = (1000 T_c) / (60 H_h I_n) \quad (\text{h/km}) \quad (16-2)$$

$T_{tbm}$ : زمان تعمیر و سرویس ماشین

$T_{bak}$ : زمان تعمیر و سرویس سیستم پشتیبانی

$T_s$ : زمان توقفات متفرقه شامل زمان انتظار قطارهای خالی، نقشه‌برداری، نصب سیستم برق و غیره می‌باشد.

### ۲-۷-۳- مدل $Q_{TBM}$

این مدل توسط نیک بارتن<sup>۱۲</sup> در سال ۱۹۹۹ به منظور تخمین نرخ نفوذ و نرخ پیشروی TBM با مطالعه ۱۴۵ تونل و بر اساس سیستم طبقه‌بندی توده سنگ Q بنا شده است. تاثیر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، مقاومت فشاری و کششی سنگ بکر، شاخص عمر تیغه برشی CLI و درصد کوارتز سنگ و پارامترهای موثر اندرکنش بین سنگ و ماشین در آن در نظر گرفته شده است (Barton, ۱۹۹۹). رابطه ذیل نحوه محاسبه  $Q_{TBM}$  را نشان می‌دهد (Barton, ۲۰۰۰).

<sup>۱۲</sup> Nick Barton

$$Q_{TBM} = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \left(\frac{SIGMA}{F}\right) \left(\frac{20}{CLI}\right) \left(\frac{q}{20}\right) \left(\frac{\sigma_\theta}{5}\right) \quad (17-2)$$

$$PR = Q_{TBM}^{(-1/5)} \quad (m/h) \quad (18-2)$$

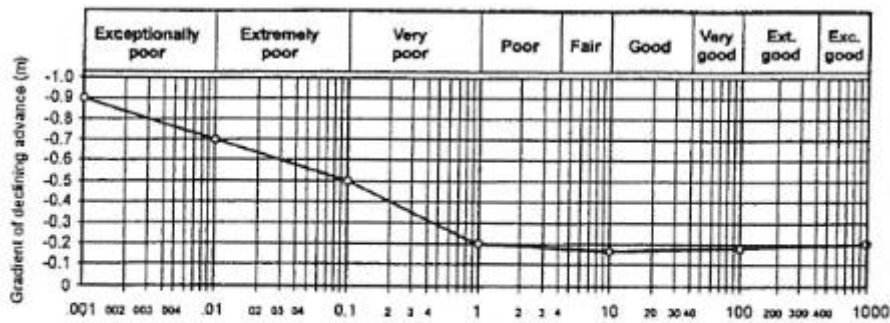
در این روابط RQD<sub>o</sub> شاخص کیفی توده سنگ در جهت محور تونل، J<sub>a</sub> عدد مربوط به تعداد دسته درزه، J<sub>r</sub> عدد مربوط به زبری سطح درزه‌ها (J<sub>r</sub> و J<sub>a</sub> مربوط به دسته درزه‌داری است که به حفاری کمک می‌کند)، J<sub>w</sub> عدد مربوط به هوازدگی و دگرسانی درزه‌ها، J<sub>w</sub> عدد مربوط به وضعیت آب درزه‌ها، SRF ضریب کاهش تنش، F نیروی رانش میانگین یا نیروی متوسط وارد بر هر دیسک کاتر، SIGMA مقاومت توده سنگ، CLI شاخص عمر دیسک کاتر، q درصد کوارتز و σ<sub>θ</sub> تنش دو بعدی وارد بر تونل است.

#### ۲-۷-۳-۱ بهره‌وری در مدل Q<sub>TBM</sub>

در این مدل ضریب بهره‌وری با رابطه ذیل تعریف می‌شود.

$$U = T^m \quad (19-2)$$

در این رابطه T بر حسب ساعت و m با استفاده از نمودار زیر به دست می‌آید. پارامتر m تابعی از Q توده‌سنگ است.



$$\text{Rock mass quality } Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \times \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \times \left( \frac{J_w}{SRF} \right)$$

شکل ۲-۱۰: تخمین اولیه m با استفاده از Q توده سنگ (Barton, ۲۰۰۰)

مقادیر اولیه m با توجه به Q توده سنگ، مطابق رابطه ذیل اصلاح می‌شود. در رابطه ۲-۲۰ این مقدار با توجه به مقادیر CLI، درصد کوارتز، تخلخل تصحیح شده و نسبت به قطر ۵ متر نرمال شده است. مقدار  $m_1$  نیز با استفاده از جدول ۳-۷ به دست می‌آید (Barton, ۱۹۹۹).

$$m = m_1 \left( \frac{D}{\Delta} \right)^{0.2} \left( \frac{\gamma}{CLI} \right)^{0.15} \left( \frac{q}{\gamma_0} \right)^{0.1} \left( \frac{n}{\bar{n}} \right)^{0.05} \quad (2-20)$$

جدول ۲-۵: مقادیر  $m_1$  با توجه به Q (Barton, ۱۹۹۹)

۱۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۱	۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱	Q
-۰/۲۱	-۰/۱۹	-۰/۱۷	-۰/۲۲	-۰/۵	-۰/۷	-۰/۹	$m_1$

## ۲-۸- تلاش‌های انجام شده جهت بهبود رویکرد RES

با وجود گذشت بیش از ۲۰ سال از ارائه رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ، تا به امروز تحقیقات اندکی در زمینه بهبود این رویکرد صورت گرفته است. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، ماتریس اندرکنش به عنوان یک جز بنیادی در روش‌های سیستمی و بخصوص در RES به شمار می‌رود. از همین رو، بهبودهای صورت گرفته نیز در همین جهت و بیشتر بر نحوه کدگذاری این ماتریس انجام شده است. در این بخش به هر یک از تحقیقات انجام شده در جهت ارتقای رویکرد به



صورت جداگانه پرداخته می‌شود.

## ۲-۸-۱- استفاده از نظریه سیستم‌های خاکستری

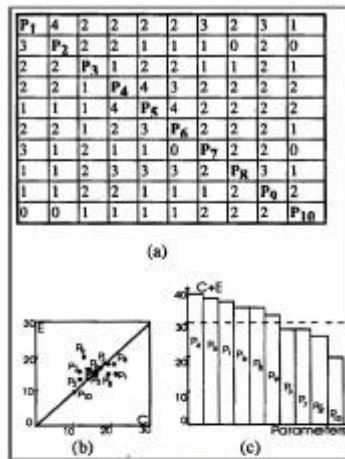
در سال ۱۹۹۴، لو و لاتام با به کارگیری نظریه سیستم‌های خاکستری از نظریه‌های علم کنترل، شیوه‌ای جدید برای کدگذاری ماتریس اندرکنش در رویکرد RES ارائه نمودند (Lu and Latham, ۱۹۹۴). در نظریه‌ی کنترل، تیرگی و روشنی رنگ‌ها همواره نشان‌دهنده‌ی میزان اطلاعات موجود است. سیستمی که در آن عوامل، ساختار و مشخصات به طور کامل شناخته شده باشند، به نام سیستم "سفید" و سیستمی که عوامل، ساختار و مشخصات آن کاملاً ناشناخته هستند به سیستم "سیاه" معروف است. با این حال، اکثر سیستم‌ها در عمل نه کاملاً شناخته شده و نه به طور کامل ناشناخته هستند. از این‌رو، سیستمی که شامل هر دو اجزای شناخته شده و ناشناخته باشد، یک سیستم "خاکستری" نام می‌گیرد. ابزار مورد استفاده در این آنالیز سیستمی نیز شامل آنالیز همبستگی خاکستری، تولید داده‌ها بر اساس تحلیل آماری خاکستری و دسته‌بندی خاکستری است (Den, ۱۹۸۲).

طبق نظریه لو و لاتام، یک سیستم مهندسی سنگ با عوامل اندرکنش‌های میان آن‌ها به دلیل خاصیت ذاتی آن، سیستمی با اطلاعات اولیه‌ی اندک است که کاملاً بر خصوصیات یک سیستم خاکستری منطبق است. به همین دلیل با استفاده از نظریه‌ی یاد شده اقدام به ارائه‌ی یک شیوه‌ی کدگذاری جدید با نام کدگذاری عددی پیوسته (CQC) نمودند که در آن، ماتریس با استفاده از رده‌های خاکستری کدگذاری شده و سپس این رده‌ها تبدیل به اعداد (کدها) می‌شوند. آن‌ها در اولین گام، روش خود را با روش ESQ (Hudson, ۱۹۹۲) مقایسه کردند. برای این منظور، عمل کدگذاری برای یک ماتریس اثر متقابل با ۱۰ عامل با هر دو روش انجام شده و رتبه‌بندی اهمیت عوامل و نمودارهای علت-اثر با یکدیگر مقایسه شدند. شکل ۲-۱۱ نتیجه‌ی این کاربرد و مقایسه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، کدهای اختصاص یافته به اندرکنش‌ها در ماتریس دوم

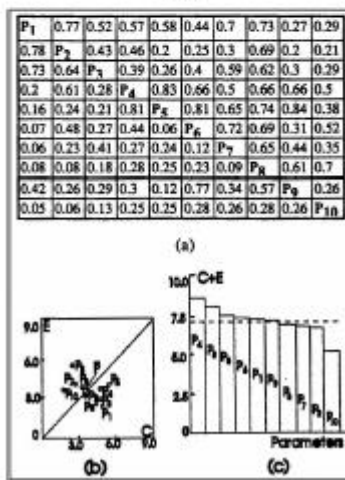
به کمک نظریه‌ی سیستم‌های خاکستری تا حد زیادی متفاوت با کدهای داده شده توسط روش ESQ هستند، و به این ترتیب موقعیت نقاط عوامل در فضای علت-اثر نیز متفاوت است. با این حال، مقایسه‌ی هیستوگرام‌های شدت اندرکنش عوامل نشان می‌دهد که دو روش کدگذاری تخمین‌های تقریباً یکسانی از اهمیت عوامل سیستم داشته‌اند.

تنها استفاده عملی از روش کدگذاری جدید، توسط خود ارایه دهندگان آن در سال ۱۹۹۹ و برای توسعه‌ی یک سیستم ارزیابی قابلیت انفجار توده‌سنگ‌ها بوده است (Latham and Lu, ۱۹۹۹). در این مطالعه، ماتریس اندرکنش ساخته شده برای ۱۲ عامل مربوط به خصوصیات توده سنگ با استفاده از روش CQC کدگذاری شده است.

از مزایای روش کدگذاری CQC نسبت به ESQ می‌توان به محدوده‌ی وسیع‌تر عددی آن اشاره کرد که از ۰ تا ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. این قابلیت باعث می‌شود که حساسیت نسبت به در نظر گرفتن تاثیرات بالاتر رفته و در نتیجه کوچک‌ترین تفاوت در اثرات متقابل نیز در نتایج منعکس گردد. با این حال، در این روش نیز علیرغم پیوسته بودن مقادیر عددی و عدم توجه به اصول مجموعه‌های کلاسیک و اعداد صحیح، کماکان جنبه ذهنی بودن کدگذاری‌ها و استفاده از قضاوت مهندسی در تعیین کلاس‌های خاکستری برای نشان دادن اندرکنش بین پارامترها باقی است. این امر بیانگر ضعف مشترک روش‌های کدگذاری CQC و ESQ می‌باشد.



(الف)



(ب)

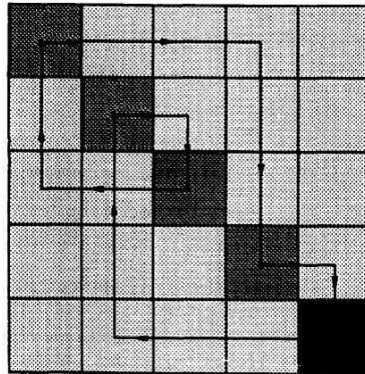
شکل ۱۱-۲: مقایسه نتایج حاصل از کدگذاری (الف) ESQ و (ب) CQC (Lu and Latham, ۱۹۹۴)

## ۲-۸-۲- استفاده از نظریه گراف

جیائو و هادسون در سال ۱۹۹۵، با بهره‌گیری از نظریه گراف توانستند مدل تمام مرتبط (FCM<sup>۱۳</sup>) را برای کاربرد در مفاهیم سیستم‌های مهندسی سنگ و البته برای مکانیزم‌های خطی ارائه دهند (Jiao and Hudson, ۱۹۹۵). هدف اصلی از این کار، در نظر گرفتن رابطه همزمان بین دو پارامتر در ماتریس اندرکنش بوده است. در ارائه این رویکرد فرض بر این بوده است که در دنیای واقعی، فرایندهای مکانیک سنگی تنها شامل اثر متقابل دوتایی جفت پارامترها بر یکدیگر نبوده و هر پارامتر به واسطه تاثیر همزمان بر پارامترهای دیگر، از آن‌ها و بنابراین از خود نیز تاثیر می‌پذیرد. این

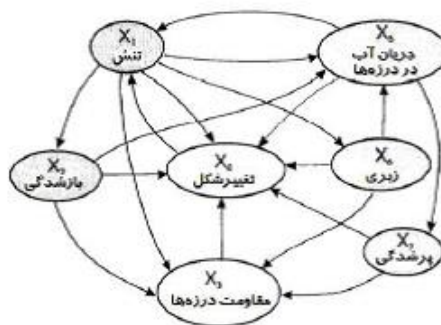
<sup>۱۳</sup> Fully- Coupled Model

فرضیه با مفهوم خط سیرهای مکانیزم ارائه شده است که در نهایت تشکیل یک حلقه را برای هر پارامتر می‌دهند. شکل ۲-۱۱ خط سیرهای مکانیزم تشکیل دهنده یک حلقه را برای یک ماتریس پنج پارامتری نشان می‌دهد که در آن مبدا و انتهای حلقه درایه آخر قطر اصلی (پارامتر پنجم) می‌باشد.



شکل ۲-۱۲: خط سیرهای مکانیزم برای یک ماتریس با ۵ پارامتر (Jiao and Hudson, ۱۹۹۵)

همان‌طور که گفته شد، در این مطالعه نحوه اثرگذاری پارامترهای یک سیستم بر همدیگر با استفاده از نظریه گراف تحلیل شده است. به عنوان مثال، سیستمی شامل برخی پارامترهای مکانیک سنگی مانند تنش، جریان آب در درزه‌ها، زبری سطح درزه‌ها، تغییر شکل پذیری و یا بازشدگی به صورت شبکه‌ای از مکانیزم‌ها در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است.



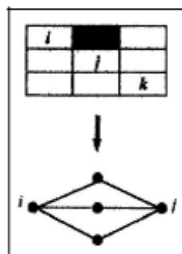
شکل ۲-۱۳: شبکه مکانیزم‌های میان چند پارامتر در مدل تمام مرتبط (خراسانی، ۱۳۹۲)

آن‌ها معادلات مرتبط به چنین اندرکنش‌های تمام مرتبط را نیز ارائه دادند تا روش پیشنهادی

قابل استفاده در کاربردهای مختلف باشد. با این وجود، این روش در عین دارا بودن مزیتی مانند نزدیک تر بودن به واقعیت، نیاز به آن دارد که ارتباط بین پارامترها به صورت خطی بیان گردد که این امر آگاهی کامل از این روابط و یا دسترسی به اطلاعات کامل را می‌طلبد. به همین دلیل، تاکنون کاربرد قابل توجهی از این پیشرفت انتشار نیافته است. علت دیگر این امر را می‌توان به پیچیدگی نسبتاً زیاد روش‌های مبتنی بر نظریه گراف بخصوص در ماتریس‌هایی با پارامترهای متعدد ربط داد. با این وجود، در این ماتریس تمام خط سیرها در ماتریس در نظر گرفته شده و در نهایت یک ماتریس اندرکنش یکپارچه ( $GIM^{14}$ ) حاصل می‌گردد که از مزایای این روش محسوب می‌شود.

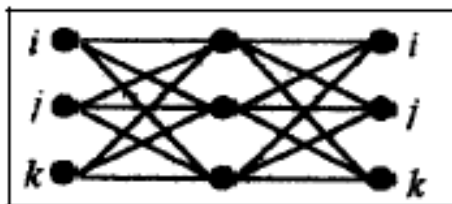
## ۲-۸-۳- استفاده از شبکه‌های عصبی

یانگ و ژانگ در سال ۱۹۹۸ روش جدیدی را بر مبنای هوش محاسباتی برای کاربرد در سیستم‌های مهندسی سنگ ارائه کردند (Yang and Zhang, ۱۹۹۸). در این روش، برای تحلیل اندرکنش هر جفت پارامتر در ماتریس ( $i, j$ ) آن دو پارامتر به عنوان ورودی و خروجی یک شبکه عصبی فرض شده و لایه‌های میانی با توجه به میزان اثر سنجیده شده از قبل و نوع پارامتر تعریف می‌شوند. با آگاهی از فرایند یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان با تغییرات کوچک در ورودی شبکه ( $i$ )، میزان تاثیر در مقدار خروجی ( $j$ ) را اندازه‌گیری نمود. اگر یک ماتریس اندرکنش با پارامترهای مشخص در نظر بگیریم، نحوه قرارگیری پارامترهای  $i$  و  $j$  در شبکه عصبی به صورت شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴: نحوه قرارگیری پارامترهای ماتریس اثر متقابل در یک شبکه عصبی (Yang and Zhao, ۱۹۹۸)

<sup>14</sup> Global Intraction Matrix



شکل ۲-۱۵: شبکه عصبی در نظر گرفته شده در صورت وجود اندرکنش میان تمام پارامترهای ماتریس ( Yang and

(Zhao

در این روش ساخت لایه‌های میانی شبکه مستلزم اطلاع کامل از مکانیزم اثرات متقابل میان پارامترهای ورودی و خروجی می‌باشد. بدین معنا که اندرکنش‌های صحیح تنها به شرط در دسترس بودن اطلاعات جامع از سیستم مورد نظر قابل کسب هستند. به عبارت دیگر، این روش همانند سایر روش‌ها مبتنی بر شبکه‌های عصبی نیاز به داده‌های واقعی و دقیق داشته و از پیچیدگی‌های محاسباتی خاص این شبکه‌ها نیز برخوردار است.

این روش علیرغم ضعف‌هایی از جمله، عدم توجه کامل به بهینه‌سازی شبکه و تکیه بر استفاده از فضای ورودی پارامترها به صورت توان نسبی تاثیر (RSE<sup>۱۵</sup>) پارامترهای سیستم و عدم توجه ویژه به این عامل به حالت یکپارچه در تعیین اندرکنش‌ها، دارای مزایایی نیز هست، از مزایای بزرگ این روش می‌توان بدین اشاره نمود که ماتریس اندرکنش از حالت استاتیکی خارج شده و به صورت یک سیستم پویا با استفاده از هوش مصنوعی مدل‌سازی می‌شود. همچنین در صورت وجود اطلاعات کافی از سیستم مورد نظر، این روش قادر است تا دقیق‌ترین اندرکنش‌های میان پارامترها را بدون نیاز به کارشناس و بدون استفاده از تخمین‌های ذهنی محاسبه نماید.

<sup>۱۵</sup> Relative Strength of Effect

## ۲-۹- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا به اصول کلی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ پرداخته شد. همچنین سابقه استفاده از این رویکرد از نقطه نظر بهبود و نیز استفاده از آن در علوم مختلف و به طور ویژه در تحلیل پایداری شیب‌ها بررسی گردید. روش کدگذاری ESQ علی‌رغم وجود روش‌های مختلف به عنوان روش مرسوم در این رویکرد شناخته می‌شود. در ادامه به بررسی مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM در سنگ سخت پرداخته شد و پارامترهای تاثیرگذار بر روی مدل‌های مرسوم پیش‌بینی عملکرد TBM نیز به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. در فصل‌های آینده با استفاده از این رویکرد به بررسی عملکرد TBM در سنگ سخت پرداخته می‌شود.





## ۳ فصل سوم

معرفی پروژه تونل انتقال آب، قطعه دوم از سد امیرکبیر کرج به تصفیه خانه شماره ۶ تهران

### ۳-۱- مقدمه

مطالعه موردی که برای پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است، تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه خانه شماره ۶ تهران با طول حدود ۳۰ کیلومتر با ظرفیت ۱۶ مترمکعب در ثانیه، بخشی از پروژه است که با هدف آبرسانی به غرب تهران تعریف شده است. این تونل با استفاده از D.S.TBM با قطر حفاری ۴/۶۶۵ متر اجرا شده است. قطر نهایی آن ۳/۹ متر می‌باشد. قطعه اول این تونل از تصفیه خانه شماره ۶، با طول حدود ۱۶۰۴۲ متر و قطعه دوم تونل انتقال آب کرج (قطعه K<sup>BR</sup>-BR) با طول ۱۳۴۴۰ متر اجرا شده است. در این تحقیق از اطلاعات مربوط به ۸۷۰۰ متر اول از قطعه دوم تونل انتقال آب کرج- تهران استفاده شده است.

### ۳-۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

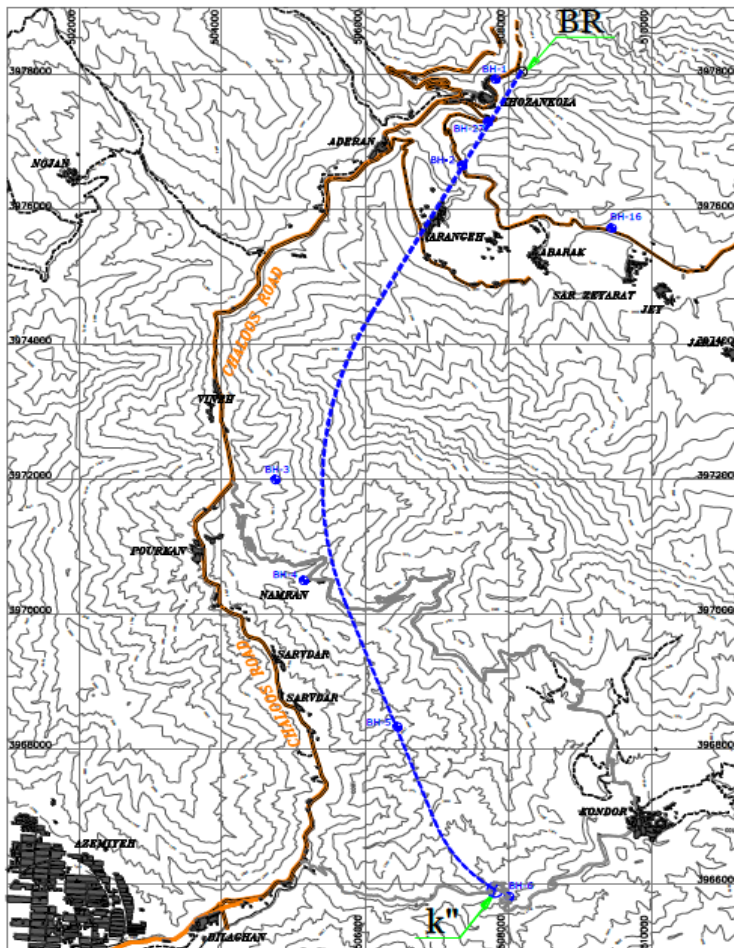
از نظر تقسیم بندی کشوری گستره مورد بررسی در شمال تهران قرار گرفته است و جز نواحی کوهستانی جنوب رشته کوه البرز به حساب می‌آید. آب و هوای منطقه، آب و هوای سرد و نیمه مرطوب است و ارتفاعات بلند، شیب‌های زیاد و دره‌های تنگ از جمله ویژگی‌های گستره مورد بررسی می‌باشند.

جهت دسترسی به مسیر تونل از جاده‌های فرعی منشعب از جاده چالوس می‌توان استفاده کرد. که در چند محل با مسیر تونل برخورد می‌نمایند (شکل ۳-۱). جهت پیمایش مسیر جهت مطالعات زمین‌شناسی از این جاده‌های فرعی استفاده شده است که عبارتند از:

الف- جاده‌ای که از ابتدای جاده چالوس پس از میدان امیرکبیر به سمت خاور منشعب می‌شود. دسترسی به پرتال "K" و گمانه BH.۳ از طریق این جاده کوهستانی میسر است.

ب- جاده روستای ارنگه که از روستای آدران واقع در جاده چالوس به سمت خاور منشعب می‌شود. این جاده در نزدیکی روستای ارنگه به مسیر تونل برخورد می‌کند.

ج- جاده روستای خوزنکلا که پس از روستای آدران به سمت خاور از جاده چالوس منشعب می‌شود. از این جاده جهت دستیابی به ورودی تونل می‌توان استفاده کرد.



شکل ۳-۱: موقعیت قطعه دوم مسیر تونل و راه‌های اصلی مرتبط با آن، خط آبی نشان‌دهنده قطعه ۲ مسیر تونل می‌باشد (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸).

### ۳-۳- مشخصات مسیر تونل

قطعه دوم تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه خانه شماره ۶ تهران با ظرفیت ۱۶ مترمکعب در ثانیه، بخشی از پروژه آبرسانی به غرب تهران می‌باشد، این تونل دارای طولی بیش از ۱۳ کیلومتر بوده و با استفاده از D.S.TBM با قطر حفاری ۴/۶۶۵ متر اجرا شده است. قطر نهایی آن ۳/۹ متر می‌باشد و پوشش نهایی به وسیله قطعات از پیش ساخته بتنی انجام گرفته است (مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۸۸). مشخصات کلی تونل در جدول ۳-۱ ارائه شده است.

جدول ۳-۱: مشخصات کلی تونل انتقال آب کرج- تهران (مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۸۸)

کرج- تهران	نام تونل	مشخصات عمومی تونل
انتقال آب	کاربری تونل	
۱۳۴۴۰ متر	طول مسیر	
۸۴۵ متر	بیشترین روباره	
۱۵ متر	کمترین روباره	
دایره ای	مقطع تونل	مشخصات هندسی تونل
۴/۶۶۵ متر	قطر حفاری تونل	
۳/۹ متر	قطر نهایی تونل	
۰/۰۰۱۸۶	شیب نهایی تونل	
سگمنت بتنی	نوع پوشش	مشخصات پوشش نهایی تونل
۲۵ سانتی متر	ضخامت سگمنت	
۱/۵ متر	عرض سگمنت	
۵ قطعه+ ۱ کلید	تعداد قطعات سگمنت در هر رینگ	

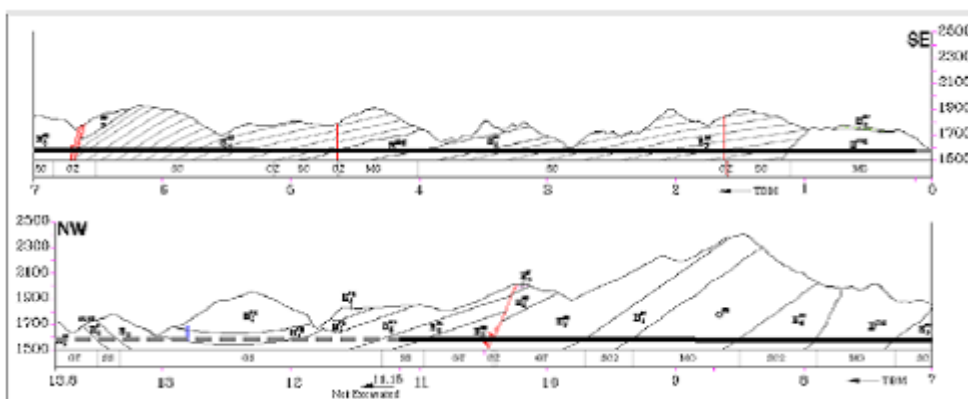
### ۳-۳-۱- زمین‌شناسی مسیر تونل

از دیدگاه زمین‌شناسی محدوده تونل در دامنه جنوبی البرز مرکزی قرار دارد. البرز مرکزی یک ایالت ساختاری با ویژگی‌های منحصر به فرد و پیچیده است که در بخش جنوبی آن پهنه کرج - سولفان قرار دارد (SCE, ۲۰۰۹). این پهنه متعلق به زون ترشیاری جنوبی است و از دیدگاه چینه‌شناسی در برگیرنده مجموعه‌های رسوبی مختلفی از سازند کرج به سن ائوسن پسین تا میانی است

(Gansser and Huber, ۱۹۶۲). این محدوده به طور کلی شامل تناوب‌هایی از توف، ماسه سنگ، کنگلومرای ریز دانه، بخش‌های سیلت استون، گدازه و حتی آگلومرا است که در قالب طبقات رسوبی چین‌خورده دیده می‌شوند. گاهی توده‌های نفوذی و دایک‌های آذرین از میان واحدهای رسوبی یا در راستای برخی از گسل‌ها بیرون‌زدگی دارند.

اغلب واحدهای سنگی در مسیر تونل به دلیل بافت دانه ریز از تراوایی ضعیفی برخوردارند و در کل از نظر تشکیل مخازن آب زیرزمینی ارزش هیدروژئولوژیکی چندانی ندارند (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸).

سازند کرج در مسیر تونل به چهار بخش توف میانی، شیل آسارا، توف بالایی و شیل کندوان تقسیم می‌شود که هر بخش واحدهای سنگی مشخصی دارد. از نظر سنگ‌شناسی واحدهای سنگی مسیر تونل شامل تناوب سازند کرج در مسیر تونل به چهار بخش توف میانی، شیل آسارا، توف بالایی و شیل کندوان تقسیم می‌شود که هر بخش واحدهای سنگی مشخصی دارد. از نظر سنگ‌شناسی واحدهای سنگی مسیر تونل شامل تناوب‌هایی از توف، ماسه سنگ، سیلت استون، گدازه و آگلومرا است که در قالب طبقات رسوبی چین‌خورده دیده می‌شوند (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸). معمولا توده‌های نفوذی و دایک‌های آذرین از جنس دیوریت و گابرو در میان واحدهای رسوبی دیده می‌شوند (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲: پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸)

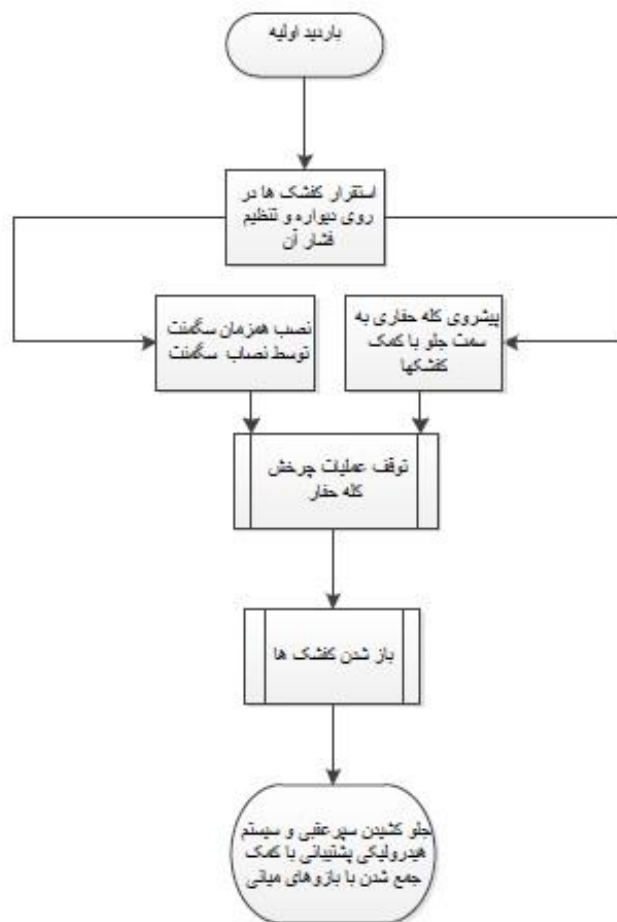
واحدهای زمین‌شناسی در برش زمین‌شناسی با علائمی مشخص می‌شوند که از حروف آغازین لیتولوژی آن مجموعه تشکیل می‌شود. این علائم به اختصار در جدول ۳-۲ مورد استفاده قرار گرفته اند.

جدول ۳-۲: واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۸۸)

ردیف	واحد زمین‌شناسی مهندسی	واحد چینه شناسی	توصیف	لیتولوژی
۱	DIO	$E^{md}$	بلوکی، بلوک‌های بزرگ ۰/۲ تا ۸ متر مکعب، هوازگی کم، کاملاً پایدار	دیوریت
۲	GA	$E^{mg}$	بلوکی، بلوک‌های بزرگ ۰/۲ تا ۸ متر مکعب، هوازگی کم، کاملاً پایدار	گابرو
۳	MO	$O^m$	بلوکی، بلوک‌های بزرگ ۰/۲ تا ۰/۸ متر مکعب، هوازگی کم، کاملاً پایدار	مونزودیوریت
۴	LCT & AL & LA	$E_r^{scl} & E_r^{sc2} & E_r^{sc}$	بلوکی، بلوک‌های متوسط ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۰۲ متر مکعب، هوازگی متوسط، ناپایداری موضعی	توف کریستالی خرده سنگی، خاکستر توف
۵	LL & LT & BG & MLT & GT & LLT	$E_f^{ab1} & E_f^{abr} & E_f^{abr} & E_f^{cl} & E_f^s$	بلوکی، بلوک‌های بزرگ ۰/۲ تا ۰/۰۰۸ متر مکعب، هوازگی کم، کاملاً پایدار و بعضاً ناپایدار	توف خرده سنگی و توف لاپیلی، برش حاوی قله‌های گابرویی، توف لاپیلی توده-ای، توف لاپیلی خرده سنگی
۶	LC & AT & CT & GLT & TU & ALT	$E_{\Delta}^s & E_{\Delta}^{ss} & E_{\Delta}^{t1} & E_{\Delta}^{s1} & E_{\Delta}^{t2} & E_{\Delta}^{ss2}$	لایه لایه و بلوکی، بلوک‌های بزرگ ۰/۲ تا ۰/۰۰۸ متر مکعب، هوازگی کم تا متوسط، کاملاً پایدار و بعضاً ناپایداری موضعی	توف خرده سنگی، خاکستر توف، توف کرم رنگ، توف خرده سنگی خاکستری، توف سبز و کرمی، خاکستر توف

### ۳-۴- روش حفاری تونل

حفاری تونل انتقال آب کرج- تهران به وسیله D.S.TBM انجام پذیرفته است. یک مرحله پیشروی ماشین انجام عملیات سه گانه حفاری، نصب یک رینگ کامل (پنج عدد سگمنت به همراه یک کلید) و حرکت سیستم پشتیبان است که تاخیر در هر یک می تواند نرخ پیشروی را کاهش دهد. در شکل زیر سیکل عملیات دستگاه حفار تمام مقطع به اختصار آورده شده است.



شکل ۳-۳: سیکل عملیات حفاری در D.S.TBM (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸)

### ۳-۵- پهنه‌بندی مسیر تونل

به منظور برآورد اندیس عملکرد TBM مورد استفاده در تونل انتقال آب کرج- تهران، مسیر این تونل پهنه‌بندی شده است. همان‌طور که اشاره شد، اطلاعات مورد استفاده از طول تونل مذکور

حدود ۸۷۰۰ متر بوده که در زمان انجام این پژوهش تمام آن حفاری شده است. برای پهنه‌بندی قسمت مورد مطالعه مسیر تونل از واحدهای زمین‌شناسی استفاده شده است. همانطور که از جدول ۳-۳ مشخص است طول پهنه‌ها از حدود ۱۲۵ متر تا ۱۶۸۰ متر متغیر است.

نیاز به تذکر است که ۱۳۳ متر ابتدایی تونل به روش سنتی حفر شده است.

جدول ۳-۳: پهنه‌بندی مسیر تونل انتقال آب + کرج - تهران

پهنه	شروع	پایان	طول (متر)	توضیحات
۱	۰+۱۳۳	۰+۳۷۰	۲۳۷	وجود دیوریت
۲	۰+۳۷۰	۱+۴۴۰	۱۰۷۰	وجود گابرو
۳	۱+۴۴۰	۱+۵۶۰	۱۲۰	وجود دیوریت
۴	۱+۵۶۰	۳+۴۱۰	۱۸۵۰	وجود توف کریستالی
۵	۳+۴۱۰	۳+۸۴۰	۴۳۰	وجود توف لاپیلی
۶	۳+۸۴۰	۳+۹۹۵	۱۵۵	وجود گابرو
۷	۳+۹۹۵	۴+۳۹۰	۳۹۵	وجود توف کریستالی
۸	۴+۳۹۰	۴+۴۹۰	۱۰۰	وجود گابرو
۹	۴+۴۹۰	۵+۵۹۰	۱۱۰۰	وجود برش‌های توده‌ای حاوی گراول های بازالت
۱۰	۵+۵۹۰	۵+۸۴۰	۲۵۰	وجود گابرو
۱۱	۵+۸۴۰	۶+۱۱۰	۲۷۰	وجود توف لاپیلی
۱۲	۶+۱۱۰	۶+۴۰۰	۲۹۰	وجود گابرو
۱۳	۶+۴۰۰	۶+۵۸۰	۱۸۰	وجود خاکستر توف سیاه رنگ
۱۴	۶+۵۸۰	۸+۲۶۰	۱۶۸۰	وجود توف خاکستری و سیاه رنگ
۱۵	۸+۲۶۰	۸+۸۳۵	۵۷۵	وجود مونزونیت



### ۳-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل به طور خلاصه به معرفی پروژه‌ی قطعه‌ی دوم انتقال آب کرج- تهران پرداخته شد. همچنین به منظور ارزیابی نرخ پیشروی و نرخ نفوذ TBM، مسیر تونل به ۱۵ پهنه زمین‌شناسی تقسیم گردید.

در فصل بعدی به معرفی عوامل موثر بر اندیس عملکرد D.S.TBM پرداخته می‌شود. اطلاعات هر یک از عوامل نیز برای ۱۵ پهنه مسیر تونل مورد بررسی، طبقه‌بندی می‌گردد.



## ۴ فصل چهارم

عوامل موثر بر عملکرد ماشین حار تمام مقطع تونل در سنگ سخت

#### ۴-۱- مقدمه

ایده ساخت ماشین‌های حفاری تونل به قبل از سال ۱۸۵۰ بر می‌گردد. اولین ماشین حفار تمام مقطع<sup>۱۶</sup> (TBM) که مشخصاتی مانند TBM‌های امروزی داشت توسط چارلز ویلسون<sup>۱۷</sup> در سال ۱۸۵۱ ساخته شد (Maidl et al., ۲۰۰۸). جیمز رابینز<sup>۱۸</sup> در سال ۱۹۵۴ اولین ماشین حفار تمام مقطع نسل جدید را ساخت. ماشین‌های اولیه از نوع ماشین‌های حفر تونل باز بوده که با تغییراتی بر روی آن‌ها دستگاه‌های حفاری از نوع سپردار ساخته شد. تاریخچه ساخت و پیشرفت ماشین‌های حفاری تونل در سنگ سخت در منابع مختلف از جمله (Maidl et al., ۲۰۰۸) به تفصیل بیان شده است. امروزه به طور گسترده انواع ماشین‌های حفاری تمام مقطع با توجه به نوع شرایط زمین‌شناسی و نیازهای پروژه برای حفاری تونل‌ها در سنگ سخت و خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

#### ۴-۲- انواع ماشین‌های حفر تونل در سنگ سخت

تقسیم‌بندی‌های مختلفی از سوی انجمن بین‌المللی تونل (ITA) و شرکت‌های سازنده برای انواع مختلف TBM ارائه شده است که بعضاً دارای اختلافات جزئی هستند. اما ماشین‌های حفر تونل در سنگ سخت<sup>۱۹</sup> به انواع ذیل تقسیم‌بندی می‌شوند (Maidl et al., ۲۰۰۸).

✓ ماشین‌های حفر تونل باز (Open TBM)

✓ حفر تونل تک سپره (Single Shield TBM)

✓ ماشین‌های حفر تونل دو سپره (Double Shield TBM)

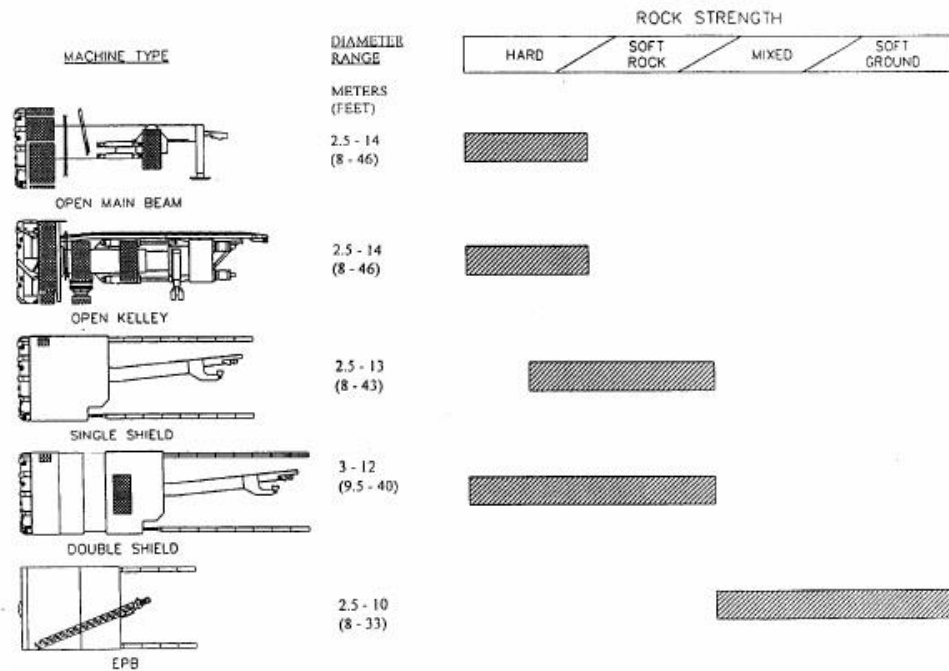
---

<sup>۱۶</sup> Tunnel Boring Machine

<sup>۱۷</sup> Charles Wilson

<sup>۱۸</sup> James S. Robbins

<sup>۱۹</sup> Hard Rock TBM

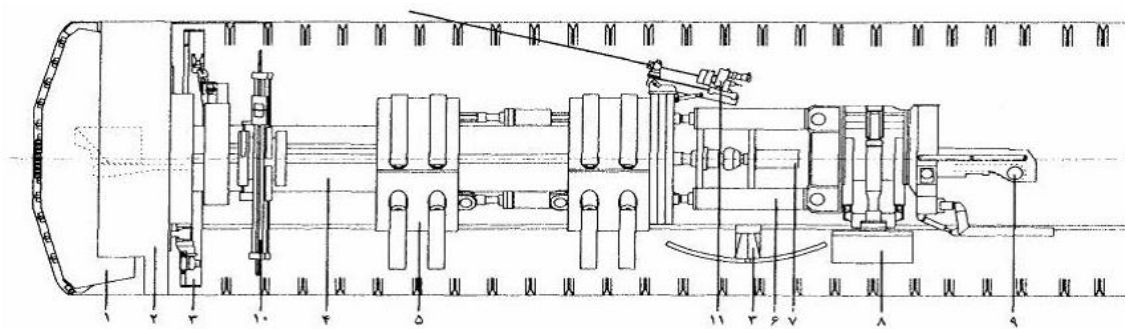


شکل ۴-۱: محدوده کاری ماشین‌های حفر تونل (Askilsrud, ۱۹۹۶)

#### ۴-۲-۱- ماشین‌های حفر تونل از نوع باز (Open TBM)

به طور کلی ماشین‌های حفر تونل از نوع باز که به آن‌ها Gripper TBM نیز گفته می‌شود، در شرایطی به کار برده می‌شوند که توده سنگ درون گیر تونل دارای زمان پابرجایی متوسط تا بالا باشد. کاربرد این ماشین‌ها وقتی تونل نیاز به نگهداری مانند بولت، شاتکریت و یا قاب ندارد، بسیار اقتصادی است (Maidl et al., ۲۰۰۸). پیشنهاد شده است این ماشین‌ها در شرایطی استفاده شوند که توده سنگ درون گیر تونل از مقاومت کافی برای تحمل فشار گریپر TBM برخوردار بوده و حالت ریزشی نیز نداشته باشد (Askilsrud, ۱۹۹۶). به عنوان یک تخمین اولیه این نوع ماشین برای شرایطی که حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد مسیر تونل نیاز به نگهداری نداشته باشد، مناسب است. این TBM در مقاومت سنگ ۱۰۰ تا ۳۰۰ مگاپاسکال، RQD ۵۰ تا ۱۰۰ درصد و فاصله‌داری درزه‌ها بیش از ۶۰ سانتی‌متر کارایی مناسبی دارد (فروغ، ۱۳۹۱). مهمترین مزیت ماشین‌های باز نسبت به ماشین‌های سپردار، امکان دستیابی به سرعت‌های بالا حفاری است (Askilsrud, ۱۹۹۶). بخش‌های اصلی ماشین‌های

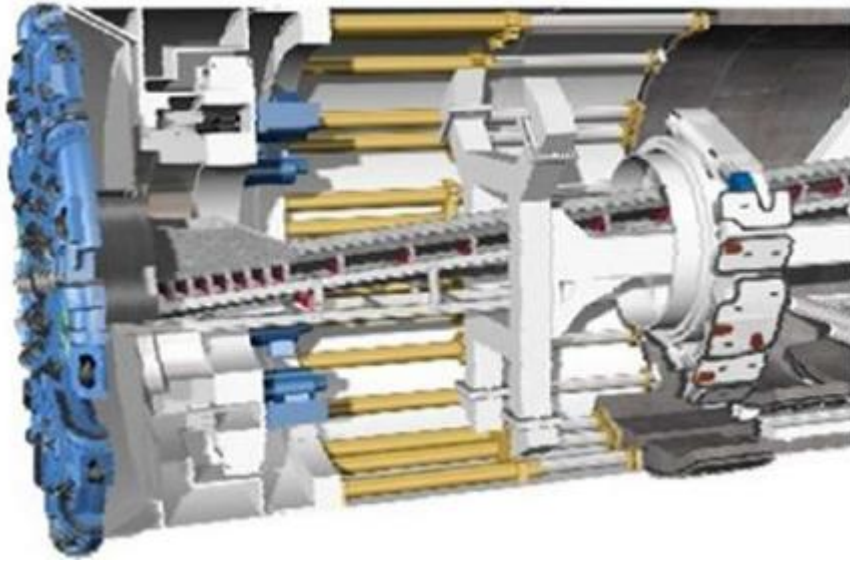
حفر تونل از نوع باز در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: قسمت‌های مختلف ماشین حفار از نوع باز (Eide, ۲۰۱۴)

#### ۲-۲-۴- ماشین‌های حفر تک سپره

ماشین‌های حفر تک سپره به صورت یک استوانه دارای پوشش هستند که در قسمت جلوی آن، سر برشی (Cutter head) و در قسمت عقب، دستگاه نصب سگمنت و جک‌های پیش‌برنده قرار دارد (Askilsurd, ۱۹۹۶). این نوع ماشین‌ها برای حفاری در توده سنگ‌هایی که از زمان خود ایستایی کوتاهی برخوردارند و به خاطر ضعیف بودن سنگ، امکان استفاده از گریپر برای تامین نیروی پیشروی وجود ندارد، استفاده می‌شوند (Askilsurd, ۱۹۹۶). این نوع ماشین در سنگ با مقاومت حدود ۵۰ مگاپاسکال، RQD حدود ۵۰ درصد و فاصله‌داری درزه‌ها در حدود ۵۵ تا ۶۵ سانتی‌متر کارایی دارد (فروغ، ۱۳۹۱). در ماشین‌های حفاری تک سپره، فشار لازم برای حفاری از طریق اعمال نیرو توسط جک‌های هیدرولیکی بر قطعات بتنی نصب شده در انتهای سپر، تامین می‌شود (Askilsurd, ۱۹۹۶). بخش‌های اصلی ماشین‌های حفاره تک سپره در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.

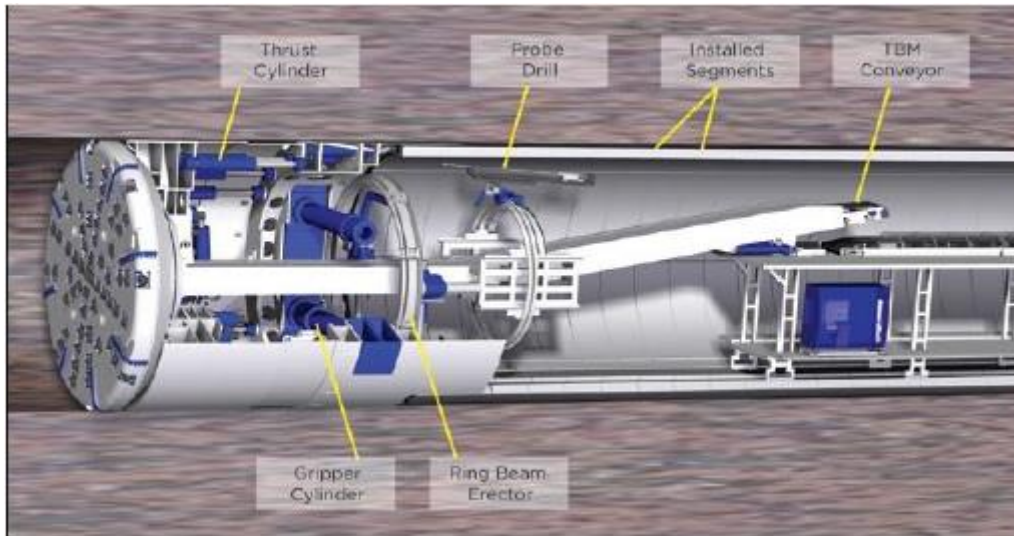


شکل ۴-۳: ماشین حفار تمام مقطع تک سپری (Eide, ۲۰۱۴)

#### ۴-۲-۳- ماشین حفر تونل با سپر تلسکوپی

ایده ساخت ماشینی با توانایی کار در زمین‌های بسیار خرد شده، ضعیف و نیز در زمین‌های با مقاومت مناسب را با بهبود ماشین‌های تک سپره برای اولین بار توسط شرکت Seli ایتالیا مطرح شد. این ماشین تحت عنوان ماشین حفر تونل با سپر تلسکوپی توسط کارخانه رایبیز آمریکا ساخته شد (Askilsurd, ۱۹۹۶).

این نوع TBM دو سپر اصلی جلو و عقب دارد و مجهز به هر دو سیستم تامین رانش با گریپر (همانند ماشین‌های باز) و با جک‌های رانش (همانند ماشین‌های تک سپره) است. به همین دلیل هم توانایی کار در زمین‌های ریزشی و هم در زمین‌های با مقاومت مناسب برای گریپ کردن را دارد. در حالتی که زمین مقاومت مناسب برای ایجاد رانش با تکیه گریپر بر دیواره‌های تونل را داشته باشد، ماشین می‌تواند به حفاری و سگمنت گذاری همزمان بپردازد (Askilsurd, ۱۹۹۶; Maidl, et al., ۲۰۰۸). در بخش‌های اصلی ماشین‌های حفر تونل با سپر تلسکوپی در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴: ماشین حفار تمام مقطع دو سپری (Eide, ۲۰۱۴)

#### ۴-۳- عوامل تاثیرگذار بر عملکرد TBM

از مهم‌ترین عوامل در بررسی عملکرد ماشین حفار تمام مقطع (TBM)، بهره‌وری و نرخ نفوذ<sup>۲۰</sup> ماشین حفار می‌باشد. بهره‌وری TBM با ضریب بهره‌وری و نرخ نفوذ مرتبط است. ضریب بهره‌وری درصدی از زمان است که دستگاه صرف حفاری می‌کند (فروغ، ۱۳۹۱). نرخ نفوذ، میزان نفوذ راس حفار در زمین در واحد زمان در حین حفاری است که معمولاً بر حسب میلی‌متر بر دقیقه (mm/min) بیان می‌شود. نرخ پیشروی تابع نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری است که بر حسب متر بر ساعت، روز، هفته یا ماه بیان می‌شود.

نرخ نفوذ و پیشروی واقعی TBM برای ۱۵ پهنه مسیر تونل مورد مطالعه محاسبه گردیده و در جدول ۴-۱ ارائه شده است.

<sup>۲۰</sup> Penetration Rate



جدول ۴-۱: نرخ نفوذ و نرخ پیشروی واقعی در پهنه‌های مختلف

پهنه	شروع	پایان	طول (متر)	نرخ نفوذ (متر بر ساعت)	نرخ پیشروی (متر بر ساعت)
۱	۰+۱۳۳	۰+۳۷۰	۲۳۷	۲/۷	۰/۱۴
۲	۰+۳۷۰	۱+۴۴۰	۱۰۷۰	۳/۲۵	۰/۴۶
۳	۱+۴۴۰	۱+۵۶۰	۱۲۰	۲/۲۲	۰/۴۴
۴	۱+۵۶۰	۳+۴۱۰	۱۸۵۰	۳/۵	۰/۶۷
۵	۳+۴۱۰	۳+۸۴۰	۴۳۰	۳/۸۶	۰/۹۵
۶	۳+۸۴۰	۳+۹۹۵	۱۵۵	۳/۹	۰/۹۳
۷	۳+۹۹۵	۴+۳۹۰	۳۹۵	۳/۸۷	۰/۶۵
۸	۴+۳۹۰	۴+۴۹۰	۱۰۰	۳/۸۴	۱/۱۱
۹	۴+۴۹۰	۵+۵۹۰	۱۱۰۰	۴/۱۵	۰/۹۹
۱۰	۵+۵۹۰	۵+۸۴۰	۲۵۰	۴	۱/۰۱
۱۱	۵+۸۴۰	۶+۱۱۰	۲۷۰	۴/۱۸	۰/۹۱
۱۲	۶+۱۱۰	۶+۴۰۰	۲۹۰	۳/۳۹	۰/۷۳
۱۳	۶+۴۰۰	۶+۵۸۰	۱۸۰	۳/۳۴	۰/۸
۱۴	۶+۵۸۰	۸+۲۶۰	۱۶۸۰	۳	۰/۷۴
۱۵	۸+۲۶۰	۸+۸۳۵	۵۷۵	۲/۲۳	۰/۶۷

نرخ نفوذ نسبت به طول حفاری شده، مدت زمانی است که حفاری به صورت پیوسته انجام می‌شود. نرخ نفوذ به ازای پیشروی ماشین به ازای یک دور چرخش کاترهد بیان می‌شود. روابط ذیل تعریف نرخ نفوذ را نشان می‌دهند.

$$ROP_{(m/h)} = L_{(m)} / T_{(hour)} \quad (۱-۴)$$

$$ROP_{(mm/rev)} = ۱۰۰۰ ROP_{(m/h)} / ۶۰ RPM \quad (۲-۴)$$

در روابط بالا L متر از حفاری شده بر حسب متر، T زمان صرف شده برای حفاری L متر

و RPM تعداد چرخش راس حفار بر حسب دور بر دقیقه می‌باشد.

نرخ پیشروی نسبت به طول واقعی حفاری شده به کل زمان حفاری، عملیاتی و توقفات وابسته است، به عبارتی دیگر برابر با حاصل ضرب نرخ نفوذ در ضریب بهره‌وری است.

$$ROP \times U = AR \quad (3-4)$$

#### ۴-۴ - طبقه بندی عوامل تاثیرگذار بر عملکرد TBM

به منظور ارزیابی اندیس عملکرد ماشین D.S.TBM، عوامل موثر مورد بررسی قرار گرفته و در

جدول ۲-۴-۲-۴ ارایه شده‌اند.

جدول ۲-۴-۲: عوامل موثر بر عملکرد TBM در سنگ سخت

عوامل	دسته	ردیف
مقاومت تراکمی تک محوره	عوامل زمین شناسی	۱
مقاومت کششی		۲
وجود سینه کار مختلط		۳
وجود کانی های ساینده		۴
شاخص شکنندگی		۵
وجود درزه ها و شکستگی-ها		۶
هوازدگی		۷
زاویه ناپیوستگی ها با محور تونل		۸
آب زیرزمینی		۹
نیروی تراست	عوامل ماشین حفار	۱۰
گشتاور		۱۱
توان ماشین حفار		۱۲
سرعت چرخش راس حفار		۱۳
فاصله داری تیغه های برشی		۱۴

مطابق جدول ارایه شده در این پژوهش، عوامل موثر بر عملکرد TBM، ۱۴ مورد بوده و در دو

دسته کلی عوامل مربوط به زمین و ماشین قرار می‌گیرند. در ادامه به معرفی اجمالی ۱۴ عامل مذکور

پرداخته می‌شود. پس از معرفی هر عامل، معیاری برای طبقه‌بندی آن ارایه گردیده است. هر معیار

طبقه‌بندی شامل چند دسته بوده و با توجه به شرایط کارکرد D.S.TBM، به هر یک از دسته‌ها

امتیازی اختصاص داده می‌شود. هر چه دستگاه شرایط کارکرد بهتر و عملکرد بهتری در دسته داشته باشد، امتیاز بیشتری به آن دسته تعلق می‌گیرد. امتیاز بندی به نحوی بوده که برای بدترین شرایط، امتیاز صفر و برای شرایط بهتر، اعداد بزرگ‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای امتیازدهی به پارامترهای زمین‌شناسی از سیستم‌های طبقه‌بندی استاندارد مثل RMR و برای امتیازدهی به عوامل ماشین از نظر کارشناسان تونل‌سازی استفاده شده است.

#### ۴-۵- عوامل مربوط به زمین

عوامل این دسته مربوط به زمین و ویژگی‌های آن در منطقه حفر تونل هستند. این عوامل عبارتند از:

#### ۴-۵-۱- مقاومت تراکمی تک محوره

مقاومت تراکمی تک محوره<sup>۲۱</sup> یکی از پارامترهای مقاومتی سنگ برای ارزیابی شرایط توده سنگ است. بطور معمول از این عامل برای ارزیابی قابلیت حفاری در توده سنگ استفاده می‌شود. مقاومت سنگ بر رفتار سنگ تحت فشار اثرگذار است، زمانی که نیروهای برشی در سنگ نفوذ می‌کنند باید از مقاومت سنگ بیشتر باشند تا بتوانند فعالیت خود را به خوبی به پایان برسانند. این بدان معناست که، مقاومت تراکمی تک محوره دارای تاثیر مستقیم بر عملکرد TBM می‌باشد، زیرا افزایش این عامل باعث کاهش نرخ نفوذ می‌گردد (Gong, et al., ۲۰۰۹). بعضی از مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ نیز نشان‌دهنده رابطه معکوس بین این پارامتر با نرخ نفوذ می‌باشند (Rostami, et al., ۱۹۹۳). آزمایش‌های انجام شده برای محاسبه مقاومت تراکمی تک محوره مطابق با استاندارد ISRM انجام شده است. (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۸۸).

نمودار توزیع آماری مربوط به ۱۵ پهنه در زیر هر نوع طبقه‌بندی ارایه گردیده است. به منظور

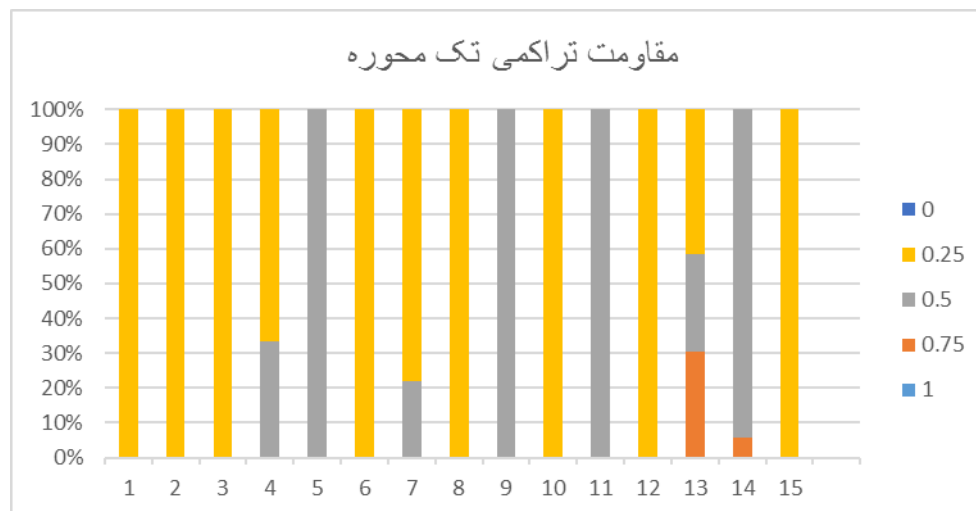
---

<sup>۲۱</sup> Uniaxial compressive strength

طبقه‌بندی عامل مقاومت تراکمی تک محوره در طول مسیر قطعه دوم تونل انتقال آب کرج- تهران (طبقه‌بندی نوع اول و سوم) از معیار طبقه بندی RMR بنیادسکی، که در سال ۱۹۷۶ ارائه گردید (جدول ۳-۴ و ۴-۵) اقتباس شده است (Bieniawski, ۱۹۷۶). همچنین برای طبقه‌بندی نوع دوم (جدول ۴-۴)، از معیار دییر و میلر استفاده گردیده است (Deer and Miller., ۱۹۶۶).

جدول ۳-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت تراکمی تک محوره (Bieniawski, ۱۹۷۶)

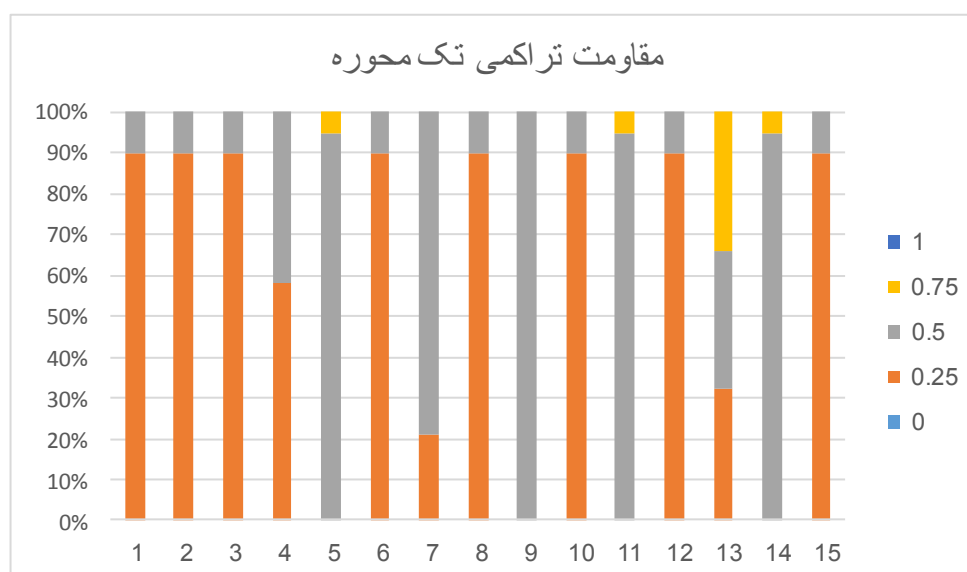
امتیاز	توضیحات	مقاومت تراکمی تک محوره سنگ (MPa)	ردیف
۱	مقاومت تراکمی بسیار ضعیف	$25 >$	۱
۰/۷۵	مقاومت تراکمی ضعیف	۲۵-۵۰	۲
۰/۵	مقاومت تراکمی متوسط	۵۰-۱۰۰	۳
۰/۲۵	مقاومت تراکمی زیاد	۱۰۰-۲۵۰	۴
۰	مقاومت تراکمی بسیار زیاد	$250 <$	۵



شکل ۴-۵: توزیع آماری مقاومت تراکمی تک محوره در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۳-۴

جدول ۴-۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت تراکمی تک محوره (Deer and Miller., ۱۹۶۶)

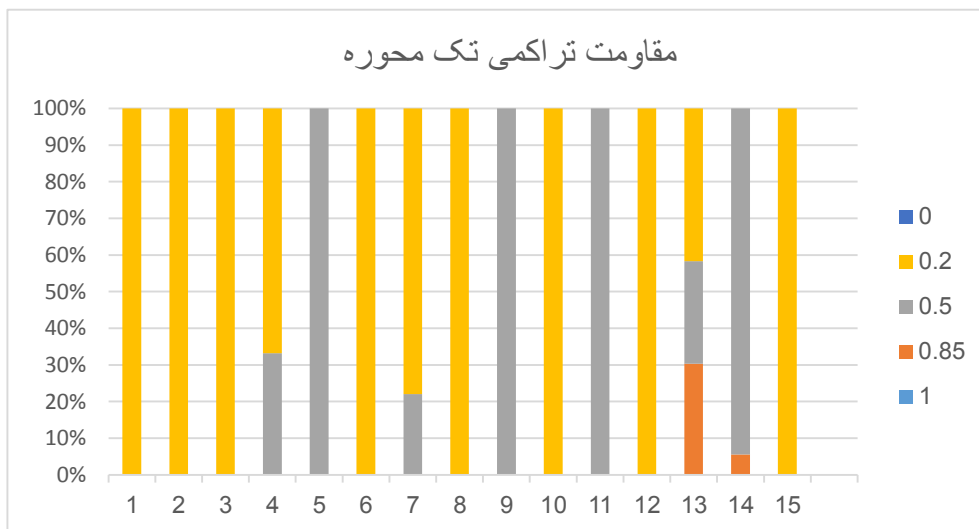
ردیف	مقاومت تراکمی تک محوره سنگ (Mpa)	توضیحات	امتیاز
۱	<۲۷/۵	مقاومت تراکمی بسیار ضعیف	۱
۲	۲۷/۵-۵۵	مقاومت تراکمی ضعیف	۰/۷۵
۳	۵۵-۱۱۰	مقاومت تراکمی متوسط	۰/۵
۴	۱۱۰-۲۲۰	مقاومت تراکمی زیاد	۰/۲۵
۵	>۲۲۰	مقاومت تراکمی بسیار زیاد	۰



شکل ۴-۶: توزیع آماری مقاومت تراکمی تک محوره در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴

جدول ۴-۵: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت تراکمی تک محوره (Bieniawski, ۱۹۷۶)

ردیف	میزان مقاومت تراکمی تک محوره (MPa)	توضیحات	امتیاز
۱	<۲۵	مقاومت تراکمی بسیار کم	۱
۲	۲۵-۵۰	مقاومت تراکمی کم	۰/۸۵
۳	۵۰-۱۰۰	مقاومت تراکمی متوسط	۰/۵
۴	۱۰۰-۲۵۰	مقاومت تراکمی زیاد	۰/۲
۵	>۲۵۰	مقاومت تراکمی بسیار زیاد	۰



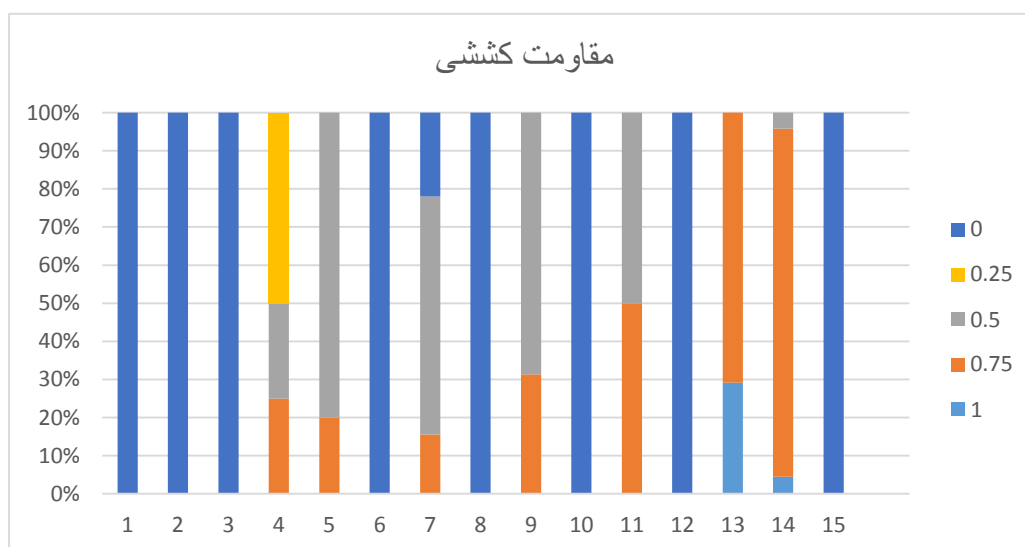
شکل ۴-۷: توزیع آماری مقاومت تراکمی تک محوره در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۵

#### ۴-۵-۲- مقاومت کششی سنگ

مقاومت کششی سنگ یکی از پارامترهای مهم در طراحی تونل‌ها، مغارها، شیروانی‌ها، معادن و غیره می‌باشد. این پارامتر بر حفاری مکانیکی تونل‌ها تاثیر زیادی دارد (Delisio, et al., ۲۰۱۳). آزمایش کشش مستقیم بهترین روش برای محاسبه مقاومت کششی است اما این آزمایش اساساً از نظر تکنیکی مشکل بوده و هزینه بر می‌باشد. به همین دلیل محققین روش‌های غیرمستقیم را بطور گسترده مورد بررسی قرار داده‌اند. از مهمترین روش‌های غیرمستقیم، آزمایش برزیلی می‌باشد. استانداردهای مربوط به تعیین مقاومت کششی توسط انجمن مکانیک سنگ ارایه شده است (مهندسين مشاور ساحل, ۱۳۸۸). به منظور طبقه‌بندی عامل مقاومت کششی سنگ از معیار سینگ و همکاران برای طبقه‌بندی نوع اول و سوم ( جداول ۴-۶ و ۴-۸) و برای طبقه‌بندی نوع دوم از تغییر معیار سینگ و همکاران (جدول ۴-۷)، اقتباس شده است (Singh, et al., ۱۹۸۹).

جدول ۴-۶: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس مقاومت کششی (Singh, et al., ۱۹۸۹)

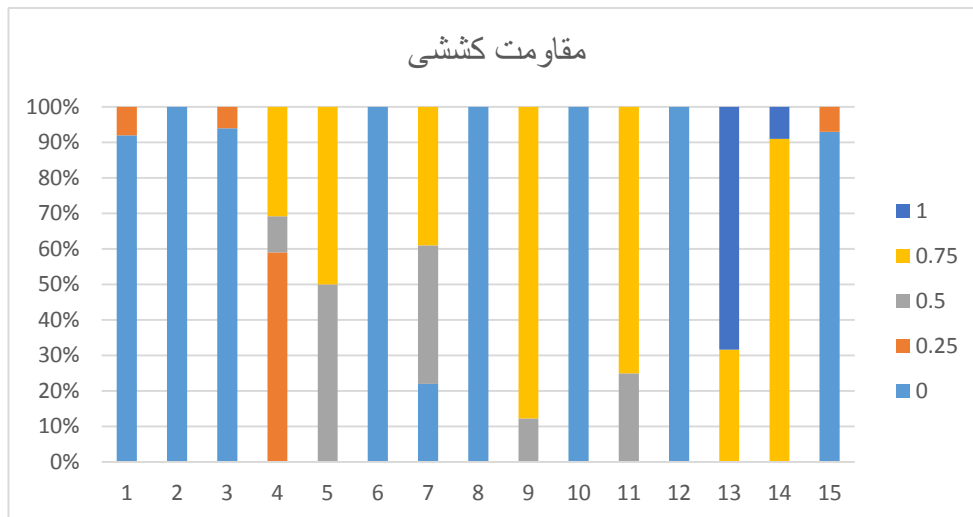
ردیف	مقاومت کششی سنگ (MPa)	توضیحات	امتیاز
۱	<۲	مقاومت کششی بسیار ضعیف	۱
۲	۲-۶	مقاومت کششی ضعیف	۰/۷۵
۳	۶-۱۰	مقاومت کششی متوسط	۰/۵
۴	۱۰-۱۵	مقاومت کششی زیاد	۰/۲۵
۵	>۱۵	مقاومت کششی بسیار زیاد	۰



شکل ۴-۸: توزیع آماری مقاومت کششی سنگ در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۶

جدول ۴-۷: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس مقاومت کششی

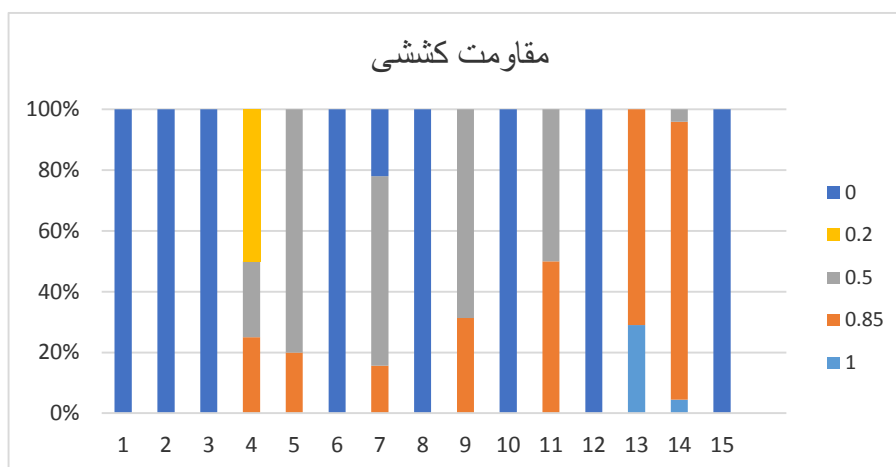
ردیف	مقاومت کششی (Mpa)	توضیحات	امتیاز
۱	≤۳	مقاومت کششی بسیار کم	۱
۲	۳-۷	مقاومت کششی کم	۰/۷۵
۳	۷-۱۱	مقاومت کششی متوسط	۰/۵
۴	۱۱-۱۶	مقاومت کششی زیاد	۰/۲۵
۵	>۱۶	مقاومت کششی بسیار زیاد	۰



شکل ۴-۹: توزیع آماری مقاومت کششی سنگ در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۷

جدول ۴-۸: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس مقاومت کششی (Singh, et al., ۱۹۸۹)

رتبه	میزان مقاومت کششی (Mpa)	توضیحات	امتیاز
۱	< ۲	مقاومت کششی بسیار کم	۱
۲	۲-۶	مقاومت کششی کم	۰/۸۵
۳	۶-۱۰	مقاومت کششی متوسط	۰/۵
۴	۱۰-۱۵	مقاومت کششی زیاد	۰/۲
۵	> ۱۵	مقاومت کششی بسیار زیاد	۰



شکل ۴-۱۰: توزیع آماری مقاومت کششی سنگ در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۸



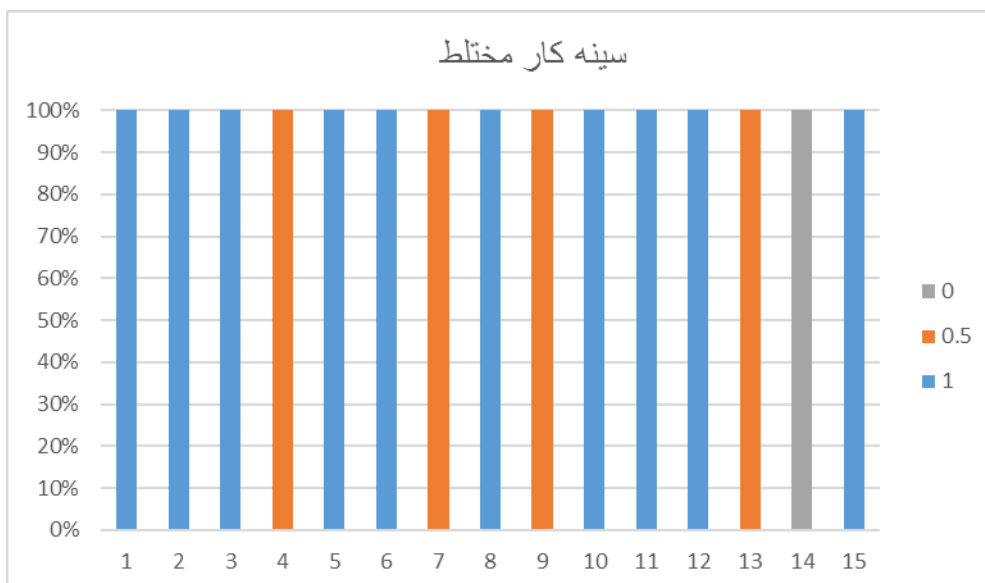
#### ۴-۵-۳-وجود سینه کار مختلط

عموما ماشین حفر تونل (TBM) برای شرایط خاص زمین‌شناسی طراحی می‌شود، بنابراین بایستی نگاه ویژه به تغییرات شرایط زمین به ویژه به جنس آن در طول مسیر تونل داشته باشیم. یکی از عواملی که تاثیر بسزایی در فرسودگی ابزارهای برشی، بهره‌وری و در نتیجه عملکرد دستگاه دارد، مواجهه با سینه کار مختلط است.

با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، لایه‌های سنگی دربرگیرنده‌ی مسیر تونل انتقال آب کرج- تهران قطعه‌ی دوم به شش گونه زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده‌اند. این واحدها در فصل قبل در جدول ۳-۲ معرفی شدند. همان‌طور که از این جدول ملاحظه می‌شود عامل اصلی در طبقه‌بندی واحدهای زمین‌شناسی، تغییرات لایه‌بندی در هر واحد است. در تفکیک این واحدها سعی بر این بوده که هر یک از آنها از نظر ژئوتکنیکی و همچنین از لحاظ الگوی رفتاریشان با ماشین D.S، دارای ویژگی‌های تقریباً یکسانی باشند (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸). به منظور لحاظ کردن تغییرات شرایط زمین‌شناسی در طول مسیر تونل مورد بررسی، طبقه‌بندی ارائه شده در جدول ۴-۵ در نظر گرفته شده است. این طبقه‌بندی بر اساس تعداد واحد زمین‌شناسی که در هر پهنه از مسیر تونل قرار می‌گیرد صورت گرفته است. با توجه به معیار طبقه‌بندی شرایط زمین‌شناسی که در جدول ۳-۲ ارائه شد، مسیر تونل مورد مطالعه طبقه‌بندی گردیده و در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۹: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس سینه کار مختلط (خراسانی، ۱۳۹۲)

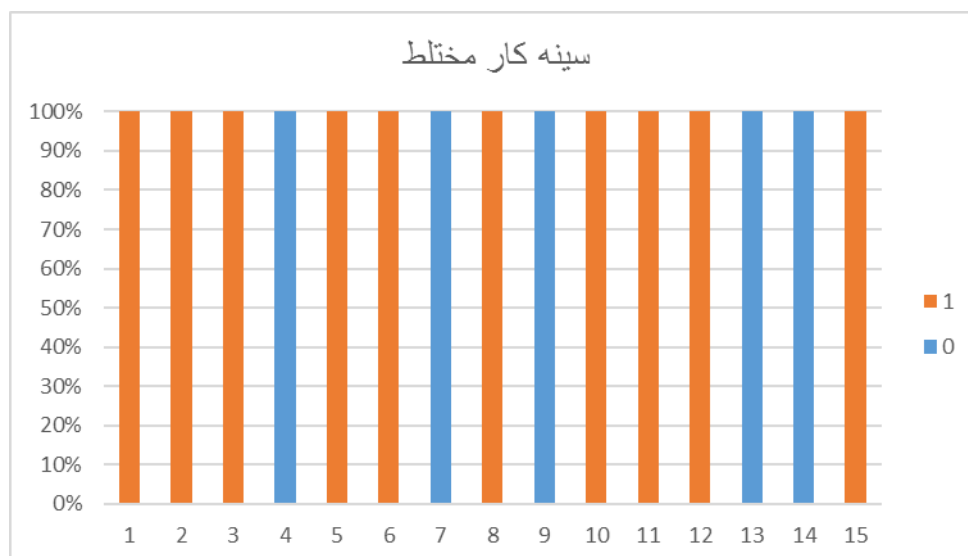
امتیاز	توضیحات (وضعیت سینه کار)	تغییرپذیری شرایط زمین	ردیف
۱	یک واحد زمین‌شناسی در سینه کار تونل قرار گیرد	کم	۰
۰/۵	دو واحد زمین‌شناسی در سینه کار تونل قرار گیرد	متوسط	۱
۰	بیش از دو واحد زمین‌شناسی در سینه کار تونل قرار گیرد	زیاد	۲



شکل ۴-۱۱: توزیع آماری سینه کار مختلط در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۹

جدول ۴-۱۰: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس سینه کار مختلط (فروغ، ۱۳۹۱)

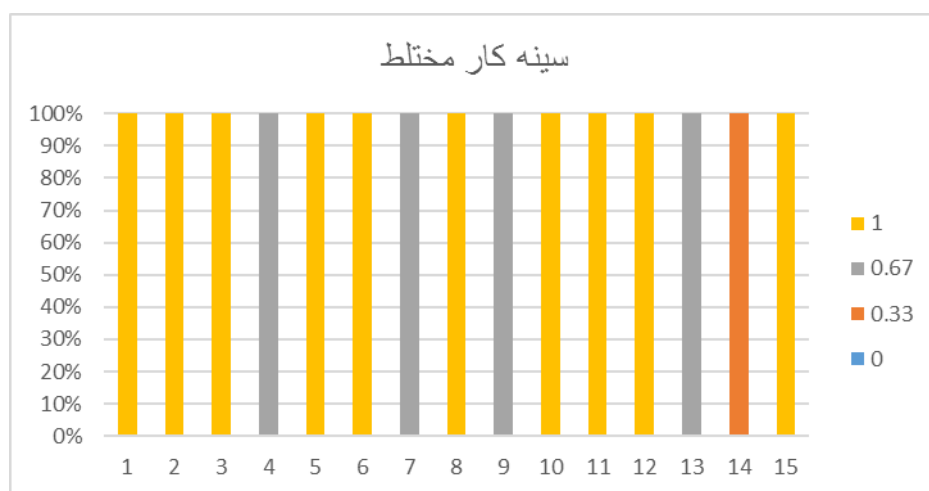
امتیاز	وجود سینه کار مختلط	ردیف
۱	خیر	۱
۰	بلی	۲



شکل ۴-۱۲: توزیع آماری سینه کار مختلط در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۰

جدول ۴-۱۱: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس سینه‌کار مختلط

امتیاز	تعداد واحد زمین شناسی	ردیف
۱	یک واحد زمین شناسی	۱
۰/۶۷	دو واحد زمین شناسی	۲
۰/۳۳	سه واحد زمین شناسی	۳
۰	بیش از سه واحد زمین شناسی	۴



شکل ۴-۱۳: توزیع آماری سینه کار مختلط در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۱

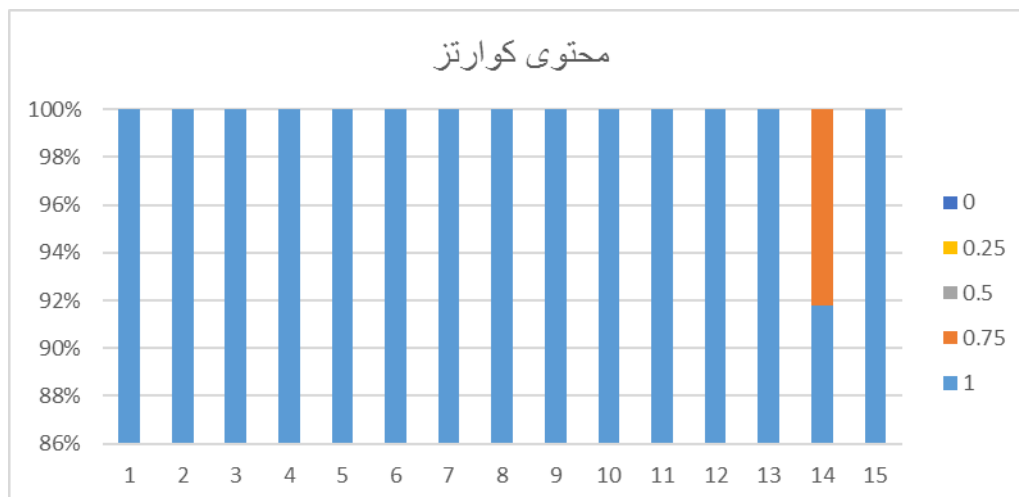
#### ۴-۵-۴- محتوی کوارتز

وجود کانی‌های ساینده و ساینده‌گی از جمله خصوصیات مهم در پروژه‌های حفاری و تونل‌زنی در سنگ‌ها می‌باشد. این پدیده، رفتاری از سنگ‌ها است که در مقابله با برش، توسط ابزار حفاری بوجود می‌آید و باعث سایش و خوردگی ابزار و قطعات ماشین‌های حفاری به خصوص TBM می‌گردد. این امر سبب افزایش هزینه‌های ناشی از تعویض و تعمیر این قطعات می‌گردد. نهایتاً این امر باعث افزایش زمان و کاهش راندمان و عملکرد دستگاه و عملیات حفاری می‌شود. لذا در پروژه‌هایی که پتانسیل ساینده‌گی در دستگاه‌های حفاری وجود دارد بررسی اولیه جهت برآورد میزان ساینده‌گی، نقش مهمی را در مدیریت پروژه و پیش‌بینی روش‌های مناسب جهت جلوگیری یا کاهش ساینده‌گی خواهند

داشت. با وجود سنگ‌های مختلف در طبیعت که این تنوع به دلیل نحوه تشکیل آن‌ها می‌باشد، پی بردن به عوامل موثر در ساینده‌گی سنگ‌ها بسیار دشوار می‌باشد. زیرا سنگ‌ها علاوه بر تنوع در نحوه تشکیل و اجزای سازنده آن‌ها، دارای خصوصیات مهندسی مختلفی بوده که همه این تفاوت‌ها با توجه به نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده، بافت و ساخت این سنگ‌ها می‌باشد. در این پژوهش میزان کانی‌های ساینده تحت عنوان محتوی کوارتز بیان می‌شود. به منظور طبقه‌بندی عامل مذکور در طول مسیر تونل انتقال آب کرج- تهران از معیار طبقه‌بندی NTNU استفاده شده است (Bruland , ۱۹۹۸).

جدول ۴-۱۲: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس محتوی کوارتز (Bruland , ۱۹۹۸)

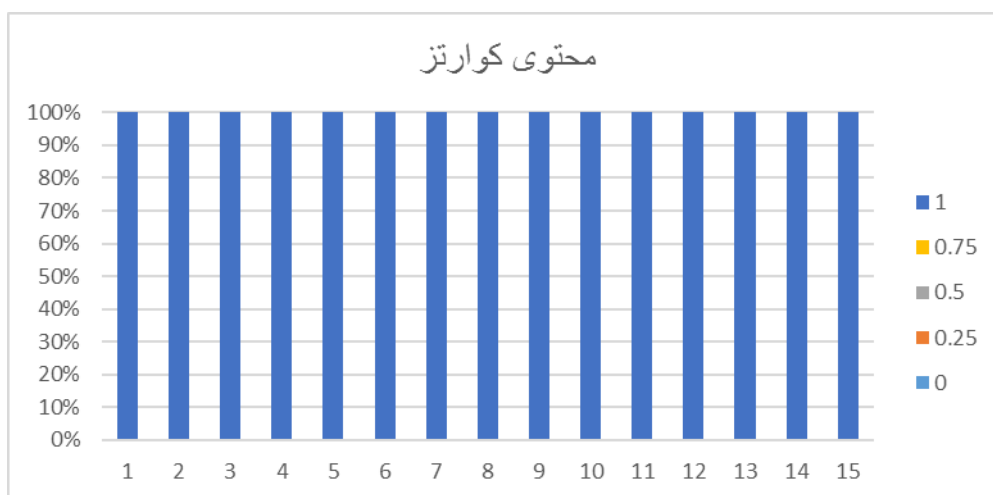
ردیف	محتوی کوارتز (درصد)	توضیحات	امتیاز
۱	۰-۵٪	دارای کوارتز ناچیز	۱
۲	۶-۱۰٪	دارای کوارتز کم	۰/۷۵
۳	۱۱-۲۰٪	دارای کوارتز متوسط	۰/۵
۴	۲۱-۴۰٪	دارای کوارتز زیاد	۰/۲۵
۵	۴۱-۱۰۰	دارای کوارتز بسیار زیاد	۰



شکل ۴-۱۴: توزیع آماری محتوی کوارتز در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۲

جدول ۴-۱۳: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس محتوی کوارتز (Bruland , ۱۹۹۸)

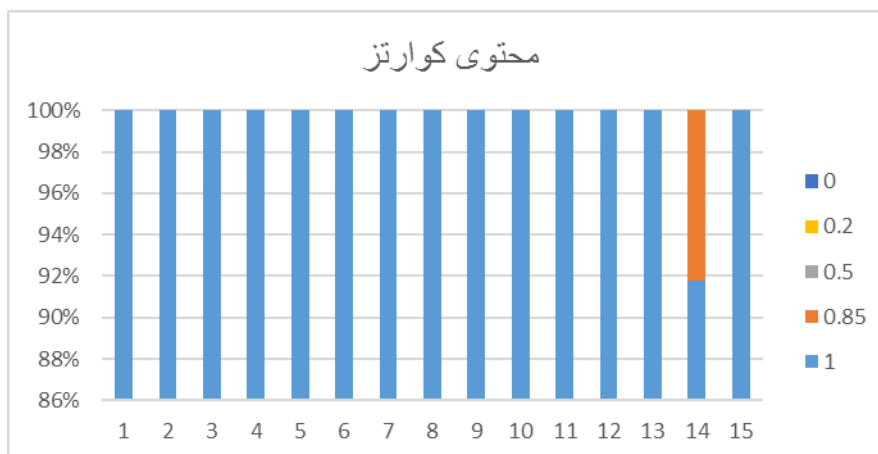
ردیف	محتوی کوارتز (%)	توضیحات	امتیاز
۱	۰-۱۰	دارای کوارتز ناچیز	۱
۲	۱۱-۲۰	دارای کوارتز کم	۰/۷۵
۳	۲۱-۴۰	دارای کوارتز متوسط	۰/۵
۴	۴۱-۷۰	دارای کوارتز زیاد	۰/۲۵
۵	۷۱-۱۰۰	دارای کوارتز بسیار زیاد	۰



شکل ۴-۱۵: توزیع آماری محتوی کوارتز در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۳

جدول ۴-۱۴: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس محتوی کوارتز (Bruland , ۱۹۹۸)

ردیف	میزان محتوی کوارتز (%)	توضیحات	امتیاز
۱	۰-۵	کوارتز ناچیز	۱
۲	۶-۱۰	کوارتز کم	۰/۸۵
۳	۱۱-۲۰	کوارتز متوسط	۰/۵
۴	۲۱-۴۰	کوارتز زیاد	۰/۲
۵	۴۱-۱۰۰	کوارتز بسیار زیاد	۰



شکل ۴-۱۶: توزیع آماری محتوی کوارتز در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۴

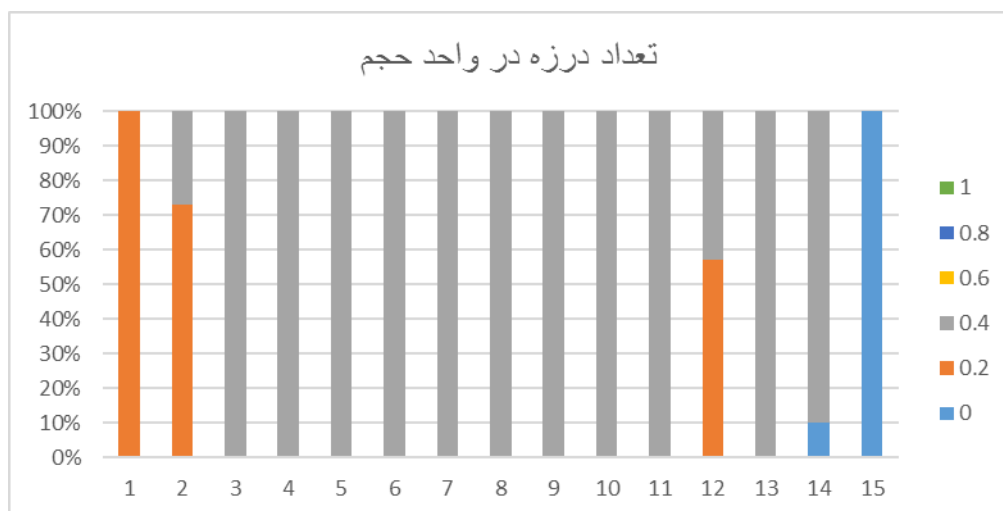
#### ۴-۵-۵- وجود درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها

اصطلاح ناپیوستگی به تمام ضعف‌های موجود در ساختار سنگ همچون درزه‌ها، صفحات لایه بندی، گسل، ریزشکستگی‌ها و شکستگی‌ها اطلاق می‌گردد. اصطلاح ناپیوستگی سرمنشا ناپیوستگی را نشان نمی‌دهد ولی رفتار مکانیکی ناپیوستگی‌ها به خواص مواد سنگ بکر آن، هندسه درزه‌ها، پیدایش درزه‌ها (کششی یا برشی) و رسوبات پرکننده درزه‌ها وابسته است (Edebro, ۲۰۰۳). درزه‌ها نیز به عنوان یک اصطلاح کلی در زمینه مکانیک سنگ استفاده می‌شوند و تمام ساختارهای ضعیف ناپیوستگی را دربر می‌گیرند. در این پژوهش هر دو عبارت مورد استفاده قرار می‌گیرند. وجود ناپیوستگی‌ها یکی از پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد ماشین TBM می‌باشد. وجود ناپیوستگی به اندازه‌ای که ایجاد زون خرد شده ایجاد نکند و باعث گیر افتادن تیغه برشی و یا کله ماشین حفار نشود، یک پارامتر مهم در جهت تاثیرگذاری مثبت بر عملکرد ماشین حفار می‌باشد. تاثیر وجود درزه‌ها در واحد حجم با نرخ نفوذ تقریباً یک رابطه خطی دارند این بدان معناست که با افزایش تعداد ناپیوستگی‌ها در واحد حجم میزان نرخ نفوذ نیز افزایش می‌یابد (Gong, et al., ۲۰۰۹). به منظور طبقه‌بندی عامل وجود درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها در طول مسیر قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران از معیار ارایه شده پالمستروم برای طبقه‌بندی نوع اول و سوم (جدول ۴-۱۴ و ۴-۱۶)، (Palmstrom,

۱۹۸۲) و همچنین برای طبقه‌بندی نوع دوم (جدول ۴-۱۵)، از معیار دلیسیو و همکاران اقتباس گردیده است (Delisio, et al., ۲۰۱۳).

جدول ۴-۱۵: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس تعداد درزه‌ها در واحد حجم (Palmstrom, ۱۹۸۲)

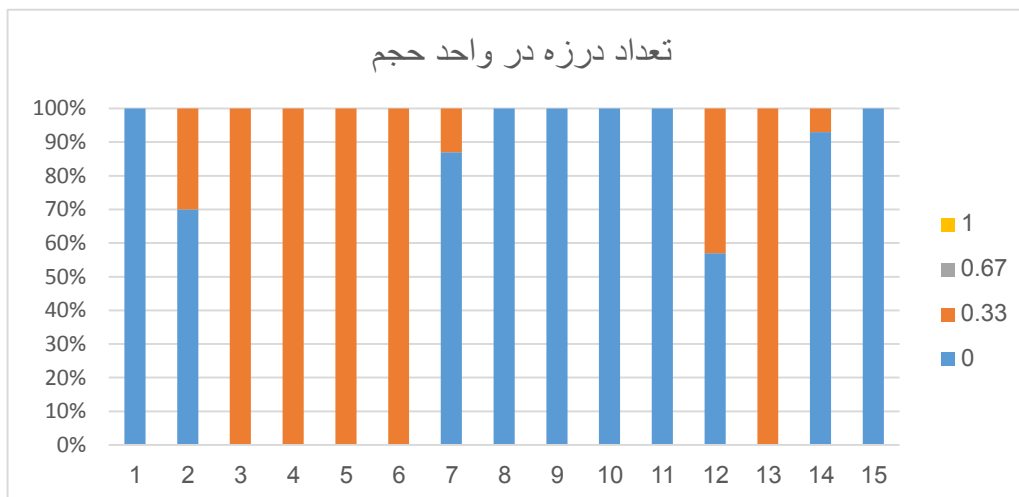
امتیاز	توضیحات	میزان $J_V$	ردیف
۱	منطقه کاملاً خرد شده	$>60$	۱
۰/۸	درزه داری بسیار زیاد	۳۰-۶۰	۲
۰/۶	درزه داری زیاد	۱۰-۳۰	۳
۰/۴	درزه داری متوسط	۳-۱۰	۴
۰/۲	درزه داری کم	۱-۳	۵
۰	درزه داری خیلی کم	$<1$	۶



شکل ۴-۱۷: توزیع آماری تعداد درزه‌ها در واحد حجم در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۵

جدول ۴-۱۶: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس تعداد درزه‌ها در واحد حجم (Delisio, et al., ۲۰۱۳)

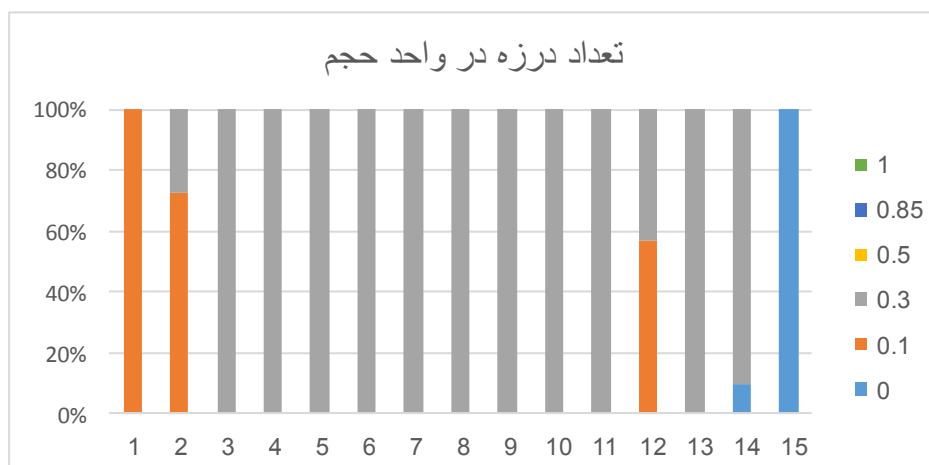
امتیاز	توضیحات	میزان $J_V$	ردیف
۱	منطقه کاملاً خرد شده	$J_V > 15$	۱
۰/۶۷	منطقه کاملاً بلوک شده	$10 < J_V < 15$	۲
۰/۳۳	منطقه بلوک شده	$5 < J_V < 10$	۳
۰	منطقه به صورت توده سنگ می باشد.	$J_V \leq 5$	۴



شکل ۴-۱۸: توزیع آماری تعداد درزه‌ها در واحد حجم در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۶

جدول ۴-۱۷: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس تعداد درزه‌ها در واحد حجم (Palmstrom, ۱۹۸۲)

ردیف	میزان Jv	توضیحات	امتیاز
۱	>۶۰	منطقه کاملاً خرد شده	۱
۲	۳۰-۶۰	درزه داری بسیار زیاد	۰/۸۵
۳	۱۰-۳۰	درزه داری زیاد	۰/۵
۴	۳-۱۰	درزه داری متوسط	۰/۳
۵	۱-۳	درزه داری کم	۰/۱
۶	<۱	درزه داری خیلی کم	۰



شکل ۴-۱۹: توزیع آماری تعداد درزه‌ها در واحد حجم در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۷

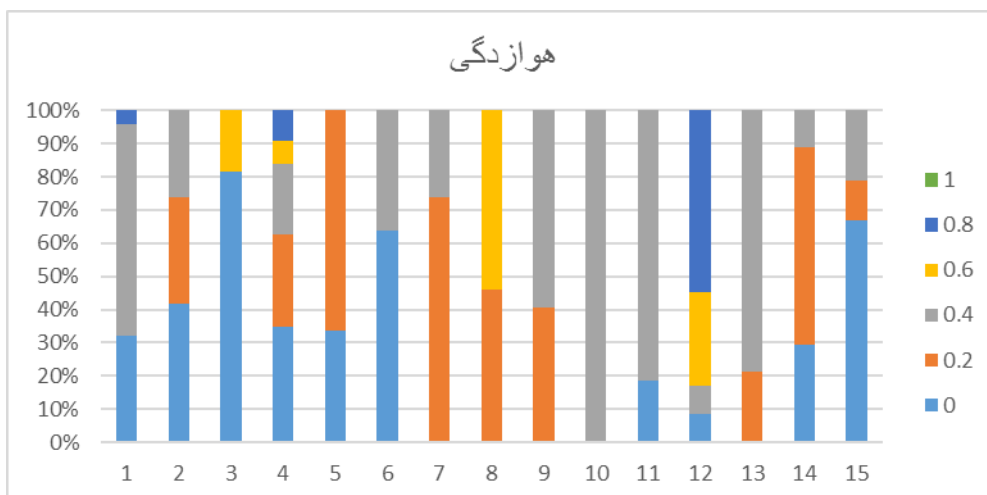


#### ۴-۵-۶- درجه هوازدگی

هوازدگی سنگ‌ها یکی از عوامل مؤثر بر ویژگی‌های مهندسی توده‌سنگ می‌باشد. در نتیجه عمل هوازدگی، مقاومت سنگ در سطح هوازده کمتر از مقاومت سنگ تازه‌تر درون بلوک‌های سنگی است. بنابراین توصیف هوازدگی بخش اساسی در توصیف توده‌سنگ می‌باشد. از جمله عواملی که بر میزان هوازدگی تاثیرگذار است، می‌توان به وجود ناپیوستگی‌ها، آب زیرزمینی، وجود لایه‌بندی‌های مختلف و تخلخل سنگ اشاره نمود. در این مطالعه برای توصیف هوازدگی از طبقه‌بندی متداول ارائه شده توسط انجمن بین‌المللی توده سنگ استفاده شده است (ISRM, ۱۹۷۸). بر طبق این طبقه‌بندی سنگ، بسته به میزان تغییرات ناشی از هوازدگی به شش دسته سنگ غیر هوازده تا خاک برجا تقسیم‌بندی می‌شود.

جدول ۴-۱۸: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس درجه هوازدگی (ISRM, ۱۹۷۸)

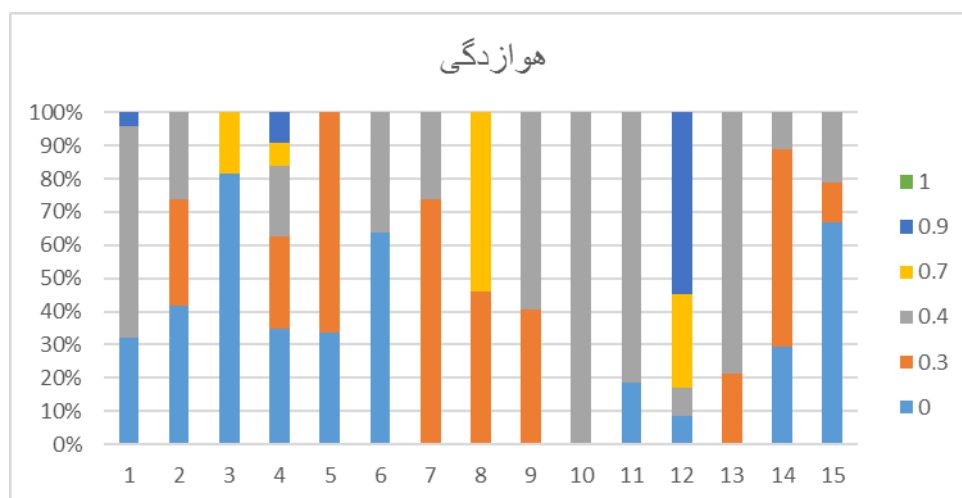
امتیاز	میزان هوازدگی	ردیف
۱	هوازدگی بسیار شدید(خاک باقیمانده)	۱
۰/۸	هوازدگی کامل	۲
۰/۶	هوازدگی زیاد	۳
۰/۴	هوازدگی متوسط	۴
۰/۲	هوازدگی کم	۵
۰	بدون هوازدگی	۶



شکل ۴-۲۰: توزیع آماری میزان هوازدگی مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۸

جدول ۴-۱۹: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس درجه هوازدگی (ISRM, ۱۹۷۸)

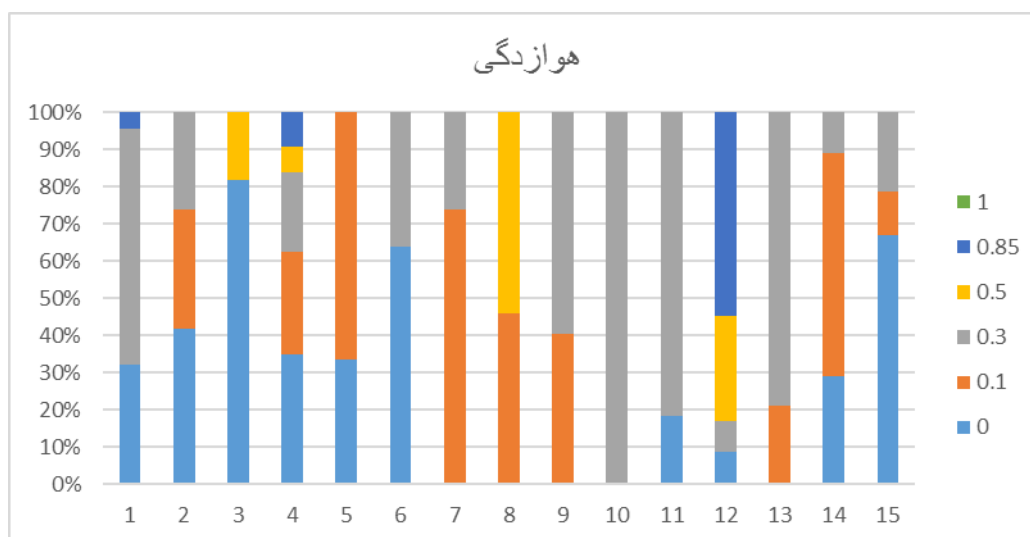
امتیاز	میزان هوازدگی	ردیف
۱	هوازدگی بسیار شدید (خاک باقیمانده)	۱
۰/۹	هوازدگی زیاد	۳
۰/۷	هوازدگی متوسط	۴
۰/۴	هوازدگی کم	۵
۰/۳	هوازدگی بسیار کم	۶
۰	بدون هوازدگی	۷



شکل ۴-۲۱: توزیع آماری میزان هوازدگی مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۱۹

جدول ۴-۲۰: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس درجه هوازدگی (ISRM, ۱۹۷۸)

امتیاز	میزان هوازدگی	ردیف
۱	هوازدگی بسیار شدید (خاک باقیمانده)	۱
۰/۸۵	هوازدگی زیاد	۲
۰/۵	هوازدگی متوسط	۳
۰/۳	هوازدگی کم	۴
۰/۱	هوازدگی بسیار کم	۵
۰	بدون هوازدگی	۶



شکل ۴-۲۲: توزیع آماری میزان هوازدگی مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۰

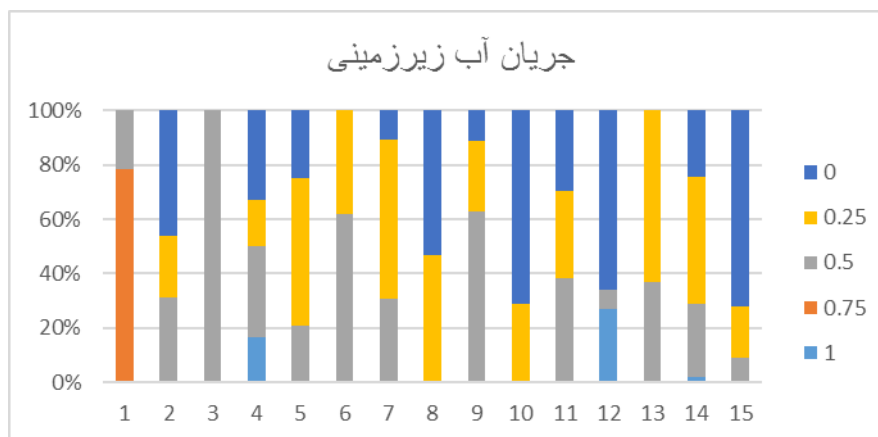
#### ۴-۵-۷- وجود آب زیرزمینی

جریان آب زیرزمینی یکی از فاکتورهایی است که همیشه بایستی در عملیات تونل‌زنی مورد توجه قرار گیرد. آب زیرزمینی به اشکال گوناگون، از وجود مقدار کم آب که به شکل مقطعی در تونل دیده می‌شود تا شرایطی که آب به شکل آزاد در تونل جریان می‌یابد، دیده می‌شود. گاهی اوقات با شستن مواد حجم عظیمی از خاک و سنگ را به داخل تونل سرازیر کرده و باعث مشکلاتی در امر حفاری می‌شوند. اگر این مشکلات به صورت ناگهانی اتفاق افتد، امکان توقف کامل فعالیت تونل‌زنی

وجود دارد. مشکلات ذکر شده در تونل‌سازی سنتی بسیار خطرناک می‌باشند، در حالیکه در تونل‌سازی مکانیزه این مشکلات می‌توانند بسیار حادث‌تر باشند. با توجه به توضیحات ارائه شده، وجود آب زیرزمینی یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد TBM می‌باشد. از عوامل مهمی که در جریان آب به داخل تونل نقش دارند، می‌توان به وجود درزه‌ها، امتداد درزه‌ها، بهم پیوستگی درزه‌ها و سطح آب زیرزمینی نسبت به تراز تونل اشاره نمود. در این پژوهش برای امتیازدهی به عامل جریان آب زیرزمینی در طول مسیر تونل انتقال آب کرج-تهران، از سیستم طبقه‌بندی RMR استفاده شده است (Bieniawski, ۱۹۷۶).

جدول ۴-۲۱: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس میزان جریان آب (Bieniawski, ۱۹۷۶)

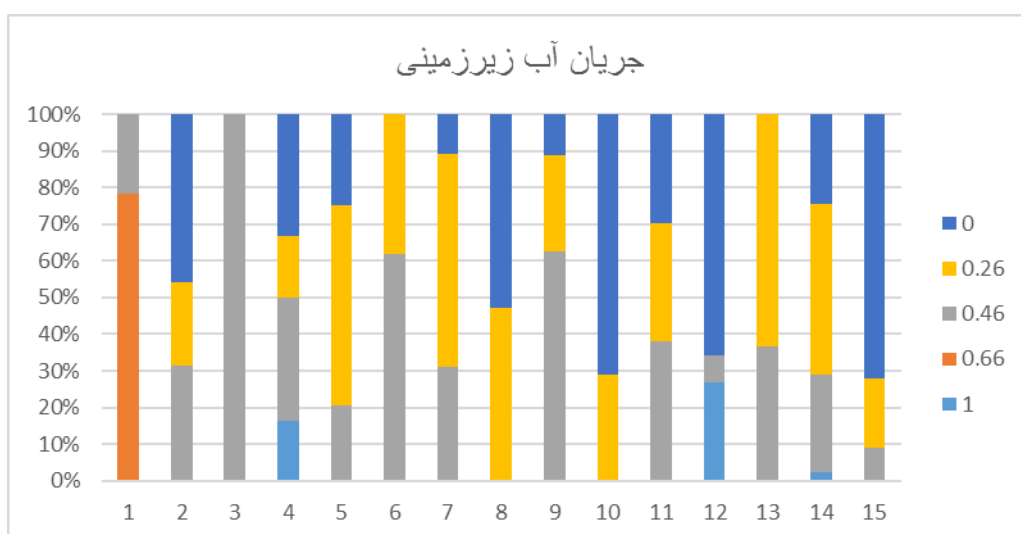
ردیف	میزان آب ورودی به ازای ۱۰ متر طول تونل (lit/m)	توضیحات	امتیاز
۱	۰	کاملاً خشک	۱
۲	<۱۰	نمناک	۰/۷۵
۳	۱۰-۲۵	مرطوب	۰/۵
۴	۲۵-۱۲۵	چکیدن	۰/۲۵
۵	>۱۲۵	جریان داشتن	۰



شکل ۴-۲۳: توزیع آماری میزان جریان آب زیرزمینی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۰

جدول ۴-۲۲: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس میزان جریان آب (Bieniawski, ۱۹۷۶)

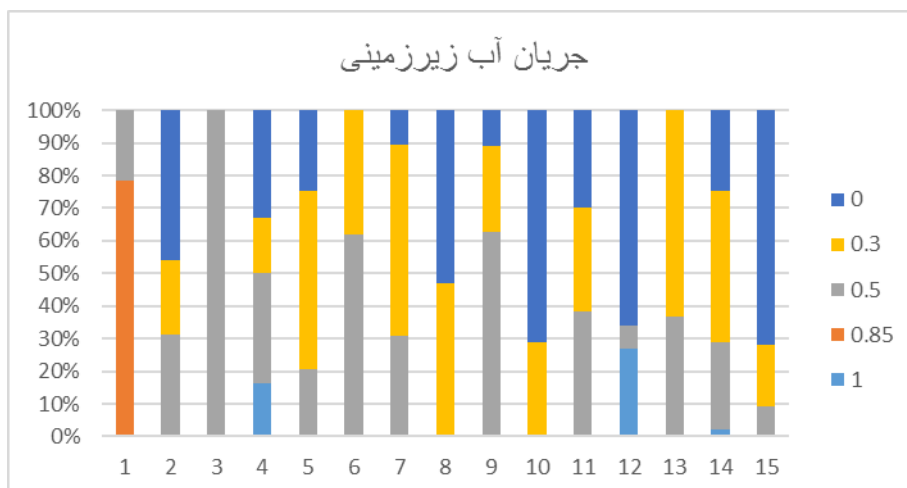
امتیاز	توضیحات	میزان آب ورودی تونل به ازای ۱۰ متر طول تونل (lit/m)	ردیف
۱	کاملاً خشک	۰	۱
۰/۱۶۶	نمناک	≤۱۰	۲
۰/۴۶	مرطوب	۱۰-۲۵	۳
۰/۲۶	چکیدن	۲۵-۱۲۵	۴
۰	جریان داشتن	>۱۲۵	۵



شکل ۴-۲۴: توزیع آماری میزان جریان آب زیرزمینی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۲

جدول ۴-۲۳: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس میزان جریان آب (Bieniawski, ۱۹۷۶)

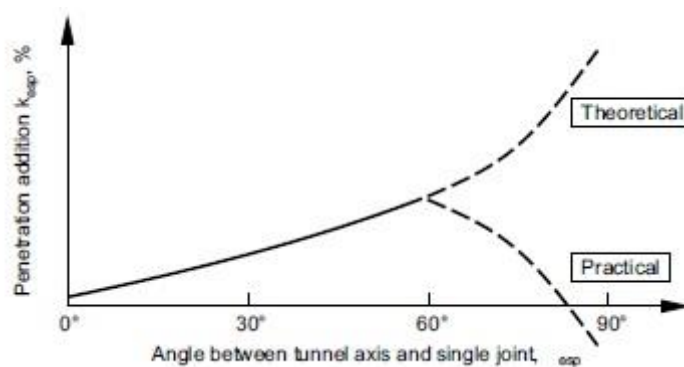
امتیاز	توضیحات	میزان آب ورودی به تونل به ازای ۱۰ متر طول تونل (lit/m)	ردیف
۱	کاملاً خشک	۰	۱
۰/۸۵	نمناک	<۱۰	۲
۰/۵	مرطوب	۱۰-۲۵	۳
۰/۳	چکیدن	۲۵-۱۲۵	۴
۰	جریان داشتن	>۱۲۵	۵



شکل ۴-۲۵: توزیع آماری میزان جریان آب زیرزمینی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۳

#### ۴-۵-۸- زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل

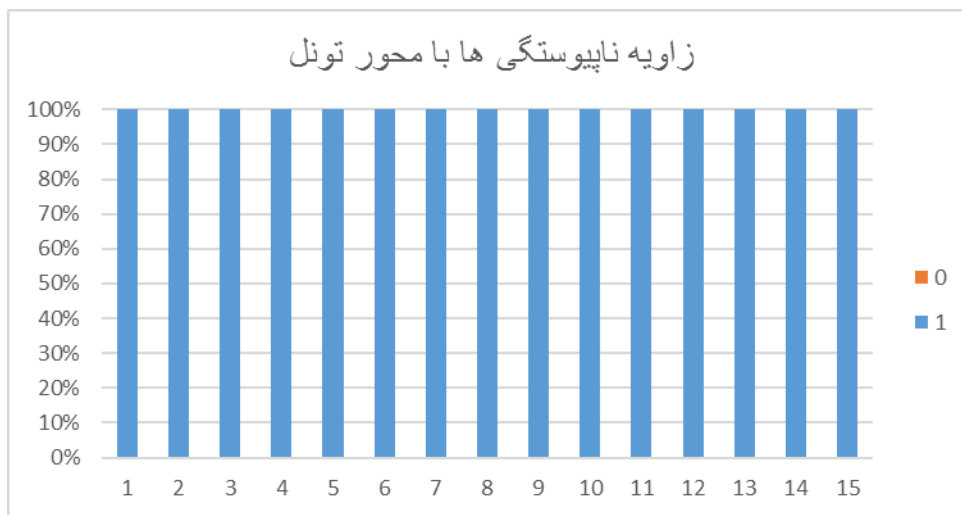
زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل از جمله عوامل تاثیرگذار بر روی نرخ نفوذ ماشین حفر تمام مقطع است. به طوری که هر چه زاویه ناپیوستگی با محور تونل بیشتر شود باعث کاهش نرخ نفوذ می‌گردد. در شکل زیر روند نرخ نفوذ واقعی و پیش‌بینی شده همزمان با افزایش زاویه ناپیوستگی با محور تونل نشان داده شده است (Bruland, ۱۹۹۸). به منظور طبقه‌بندی عامل مذکور در مسیر تونل انتقال آب کرج- تهران از معیار طبقه‌بندی NTNU جدول (۴-۲۳) استفاده شده است. در شکل ۴-۲۶ زاویه ۶۰ درجه به عنوان زاویه بهینه شکستگی با محور تونل شناخته می‌شود (Bruland, ۱۹۹۸).



شکل ۴-۲۶: روند نرخ نفوذ با افزایش زاویه ناپیوستگی‌ها (Bruland, ۱۹۹۸)

جدول ۴-۲۴: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس زاویه ناپیوستگی با محور تونل

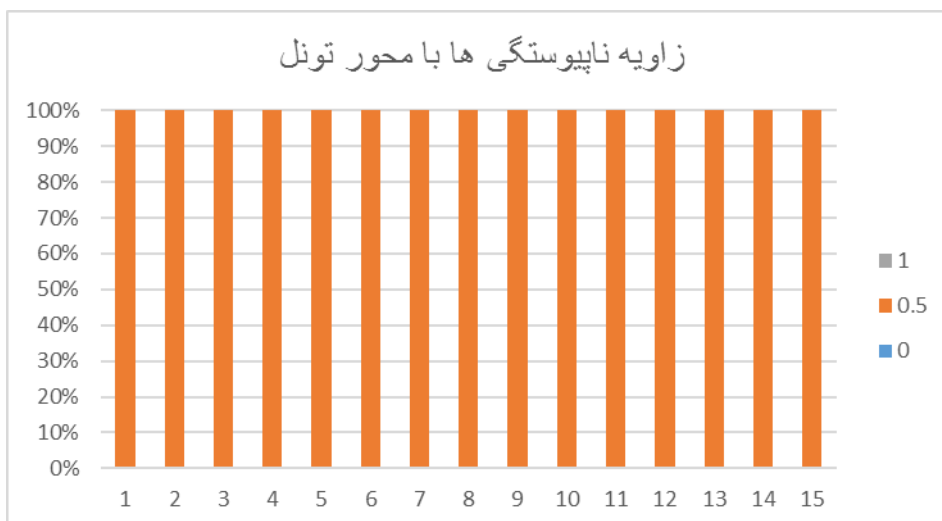
امتیاز	توضیحات	محدوده زاویه $\alpha$	ردیف
۱	قدر مطلق زاویه ناپیوستگی با محور تونل بین ۴۰ تا ۶۰ درجه	$40 <  60 - \alpha  \leq 60$	۱
۰.۵	قدر مطلق زاویه ناپیوستگی با محور تونل بین ۲۰ تا ۴۰ درجه	$20 <  60 - \alpha  \leq 40$	۲
۰	قدر مطلق زاویه ناپیوستگی با محور تونل بین ۰ تا ۲۰ درجه	$0 <  60 - \alpha  \leq 20$	۳



شکل ۴-۲۷: توزیع آماری زاویه ناپیوستگی ها با محور تونل در پهنه های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۴

جدول ۴-۲۵: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس زاویه ناپیوستگی با محور تونل

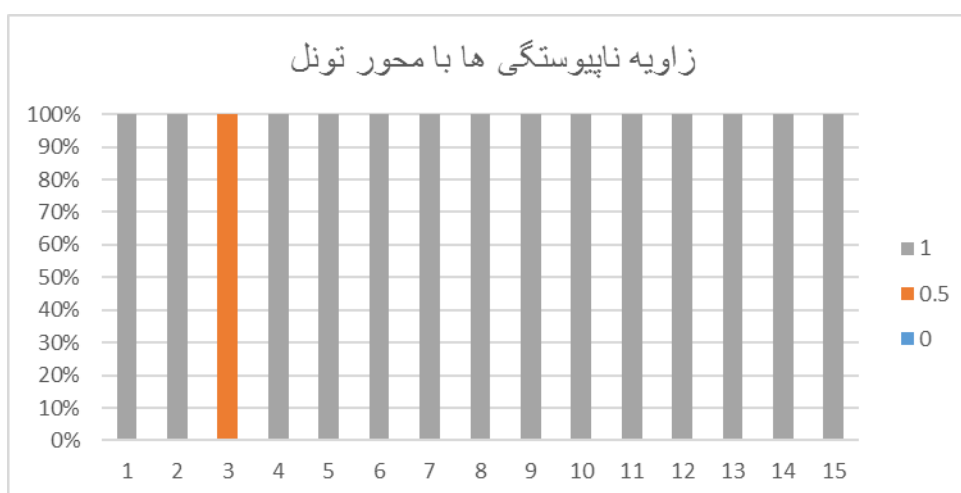
امتیاز	توضیحات	وضعیت زاویه $\alpha$	ردیف
۱	جهت ناپیوستگی ها با محور تونل موازی است.	موازی	۱
۰/۵	جهت ناپیوستگی ها با محور تونل به صورت مایل است.	مایل	۲
۰	جهت ناپیوستگی ها عمود بر محور تونل است.	عمود	۳



شکل ۲۸-۴: توزیع آماری زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل در پهناهای مسیر تونل بر اساس جدول ۲۵-۴

جدول ۲۶-۴: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس زاویه ناپیوستگی با محور تونل

امتیاز	توضیحات	وضعیت زاویه $\alpha$	ردیف
۱	وضعیت مناسب	۰-۴۵	۱
۰/۵	وضعیت نه چندان مناسب	۴۵-۶۰	۲
۰	وضعیت نامناسب	>۶۰	۳



شکل ۲۹-۴: توزیع آماری زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل در پهناهای مسیر تونل بر اساس جدول ۲۶-۴

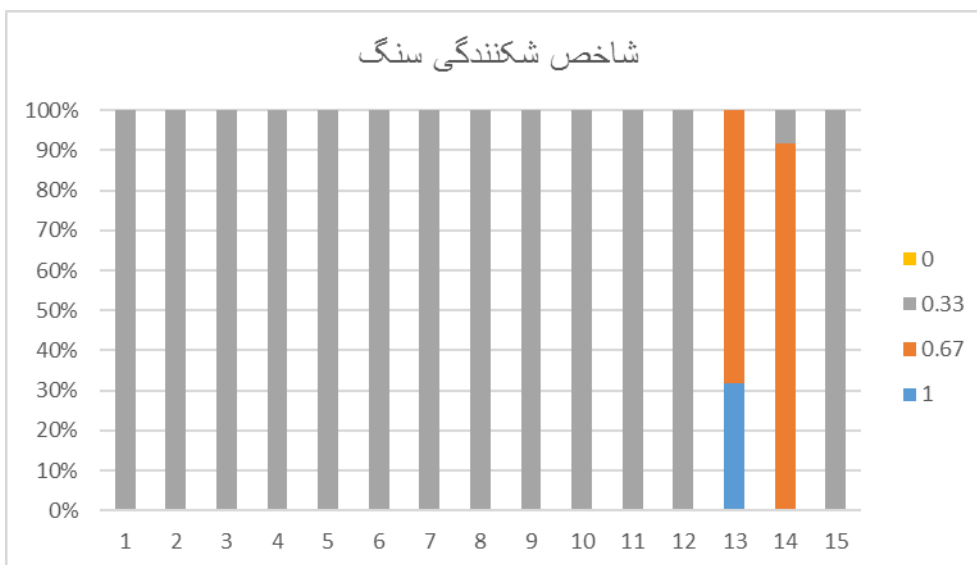


#### ۴-۵-۹- شکنندگی سنگ

اثر شکنندگی سنگ بر روی عملکرد TBM توسط گانگ و ژائو مورد مطالعه قرار گرفت (Gong, et al., ۲۰۰۹). شاخص شکنندگی، نسبت مقاومت تراکمی تک محوره سنگ به مقاومت کششی سنگ بیان می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که هر چه شاخص شکنندگی سنگ بیشتر شود فرایند نفوذ تیغه برشی در سنگ بهتر انجام می‌گیرد عموماً، نرخ نفوذ با افزایش شاخص شکنندگی بیشتر می‌شود. به منظور طبقه‌بندی عامل مذکور در مسیر تونل انتقال آب کرج- تهران از معیار طبقه‌بندی ارائه شده توسط گانگ و ژائو برای طبقه‌بندی نوع اول و سوم (جدول ۴-۲۷ و ۴-۲۹) استفاده شده است (Gong, et al., ۲۰۰۹).

جدول ۴-۲۷: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس شاخص شکنندگی سنگ (Gong, et al., ۲۰۰۹)

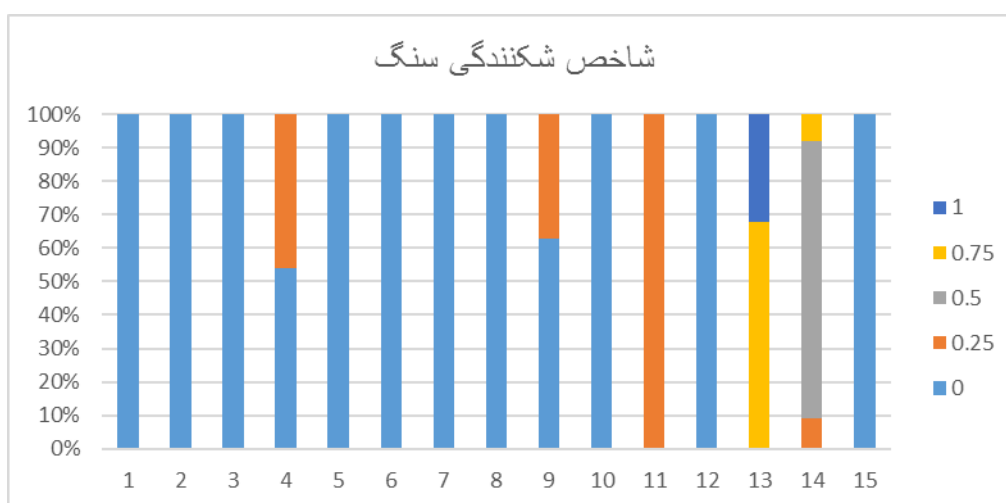
امتیاز	توضیحات	شاخص شکنندگی سنگ	ردیف
۱	خیلی شکننده	$BI > 25$	۱
۰/۶۷	شکننده	$15 < BI < 25$	۲
۰/۳۳	نسبتاً شکننده	$10 < BI < 15$	۳
۰	کمی شکننده	$BI < 10$	۴



شکل ۳۰-۴: توزیع آماری شاخص شکنندگی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۲۷-۴

جدول ۲۸-۴: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس شاخص شکنندگی سنگ

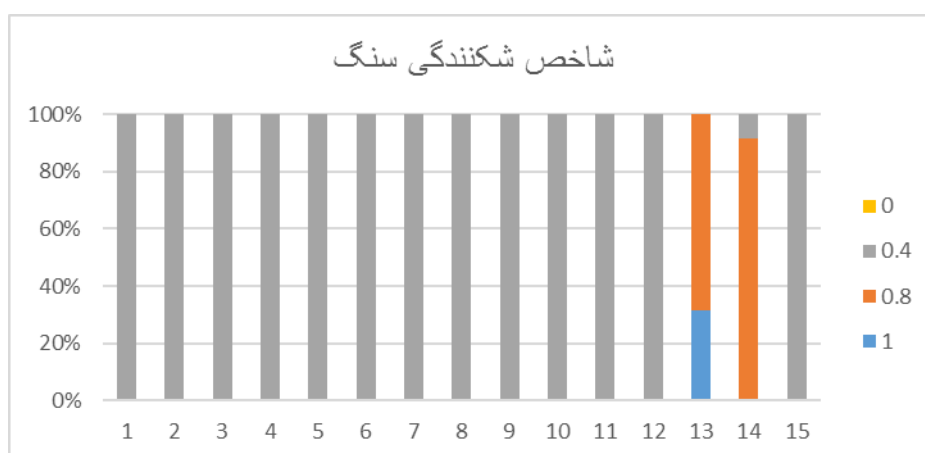
امتیاز	توضیحات	شاخص شکنندگی سنگ	ردیف
۱	شکنندگی بسیار زیاد	$> 25$	۱
۰/۷۵	شکنندگی زیاد	۲۰-۲۵	۲
۰/۵	شکنندگی متوسط	۱۵-۲۰	۳
۰/۲۵	شکنندگی کم	۱۵-۱۰	۴
۰	شکنندگی بسیار کم	$\leq 10$	۵



شکل ۳۱-۴: توزیع آماری شاخص شکنندگی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۲۸-۴

جدول ۴-۲۹: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس شاخص شکنندگی سنگ (Gong, et al., ۲۰۰۹)

ردیف	شاخص شکنندگی سنگ	توضیحات	امتیاز
۱	$BI > 25$	خیلی شکننده	۱
۲	$15 < BI < 25$	شکننده	۰/۸
۳	$10 < BI < 15$	نسبتاً شکننده	۰/۵
۴	$BI < 10$	کمی شکننده	۰



شکل ۴-۳۲: توزیع آماری شاخص شکنندگی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۲۹

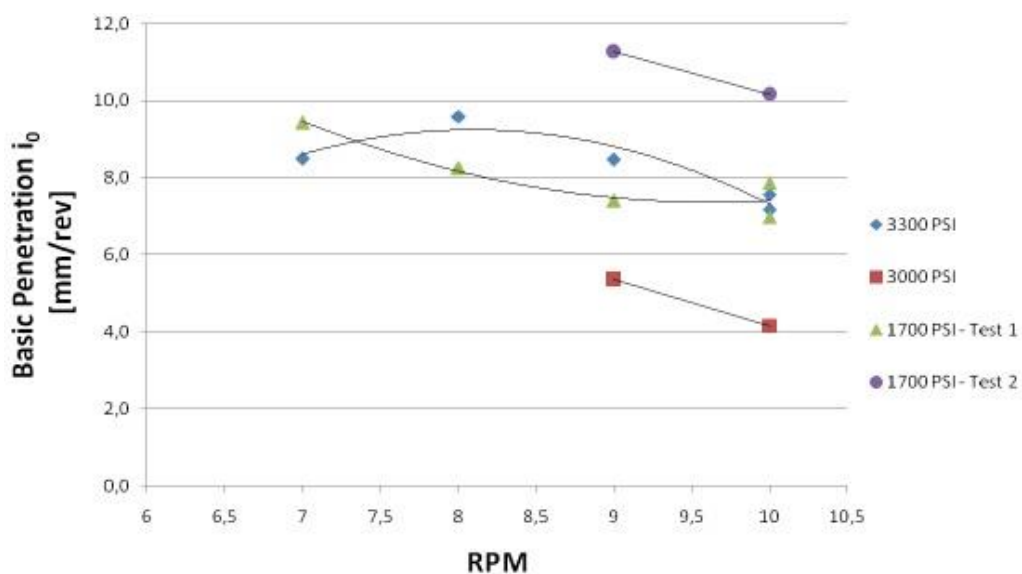
#### ۴-۶- عوامل ماشین TBM

##### ۴-۶-۱- سرعت چرخش راس حفار

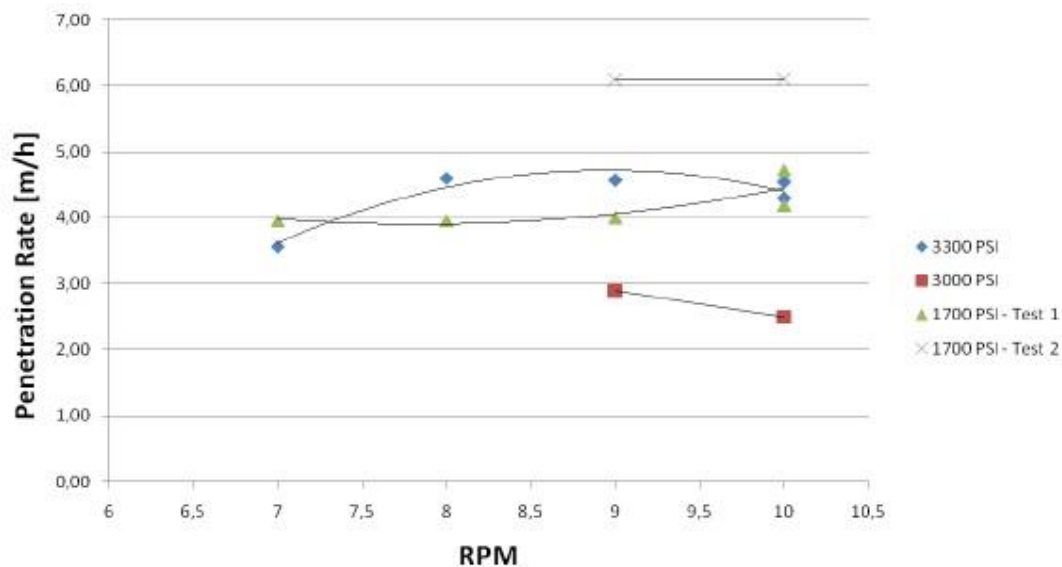
بررسی تاثیر چرخش کله حفار بر روی شکست سنگ و عملکرد TBM یک عامل مهم در محاسبه برآورد نرخ پیشروی TBM می‌باشد. بررسی‌ها در معدن استیل واتر آمریکا نشان می‌دهد، هر چه ماشین TBM دارای سرعت چرخش کمتری باشد میزان شکنندگی سنگ موثرتر و نرخ نفوذ بیشتری در هر چرخش به دست می‌آید. فرایند شکست سنگ به نرخ بارگذاری بر روی تیغه و سطح سنگ، که وابسته به سرعت چرخش کله حفار است، بستگی دارد. این بررسی‌ها نشان داد حد بهینه سرعت چرخش کله حفار در حدود ۸ دور بر دقیقه است. ذکر این نکته ضروری است که، میزان نرخ

نفوذ بر حسب متر بر ساعت تغییر چندانی نمی‌کند، البته به دنبال کاهش نرخ سرعت چرخش کله حفار، میزان نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت نیز کاهش می‌یابد. از طرفی سرعت چرخش کله حفار بر روی میزان طول عمر تیغه‌های برشی نیز تاثیرگذار است، بطوری که هر چه سرعت چرخش کله حفار کمتر باشد طول عمر تیغه‌های برشی نیز کمتر می‌شود (Eide, ۲۰۱۴).

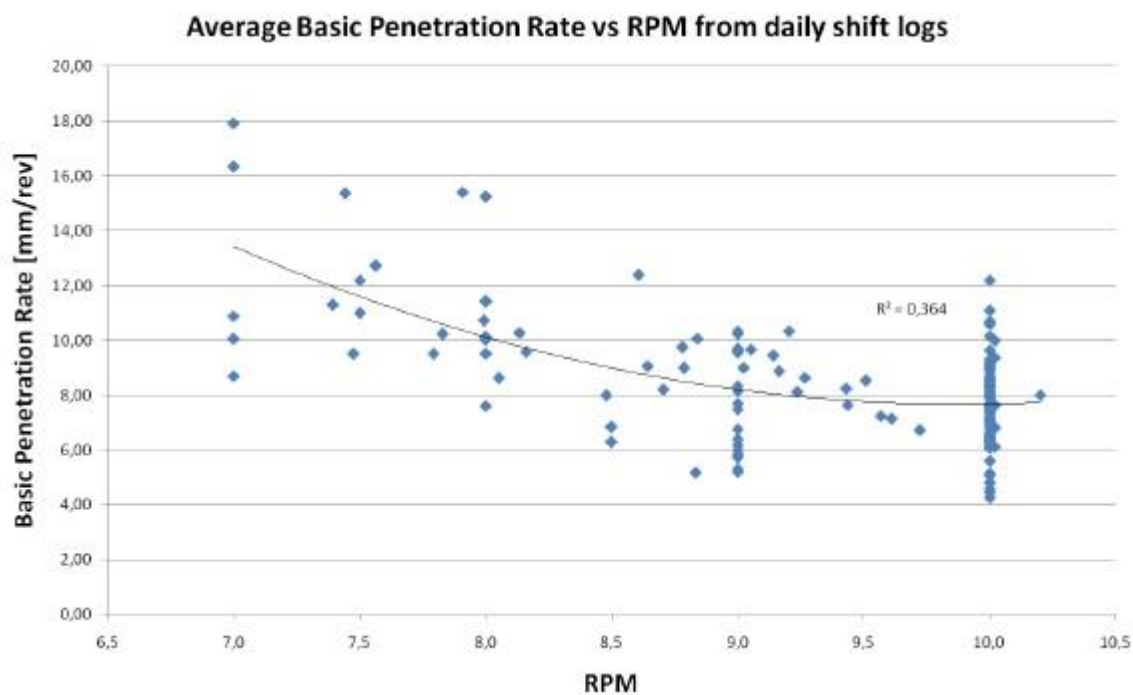
اطلاعات جمع‌آوری شده از عملیات حفاری در معدن استیل واتر نیز نتایج به دست آمده از تحقیقات انجام شده را تایید می‌کند (شکل‌های ۴-۳۳ تا ۴-۳۵)، (Eide, ۲۰۱۴).



شکل ۴-۳۳: تاثیر سرعت چرخش کله حفار بر نرخ نفوذ در هر چرخش (Eide, ۲۰۱۴)



شکل ۴-۳۴: تاثیر سرعت چرخش بر نرخ نفوذ (متر بر ساعت) (Eide, ۲۰۱۴)



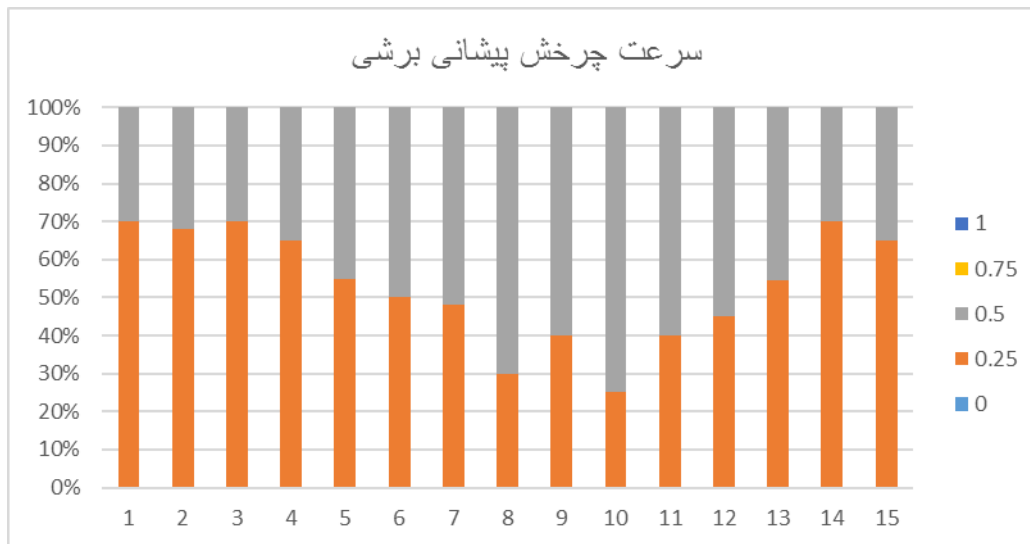
شکل ۴-۳۵: تاثیر سرعت چرخش بر نرخ نفوذ در هر چرخش (Eide, ۲۰۱۴)

به منظور طبقه‌بندی عامل سرعت چرخش راس حفار در مسیر تونل انتقال آب کرج- تهران

اطلاعات TBM، ۱۰ پروژه گردآوری شد و مورد استفاده قرار گرفته شده است.

جدول ۴-۳۰: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس سرعت چرخش پیشانی برشی

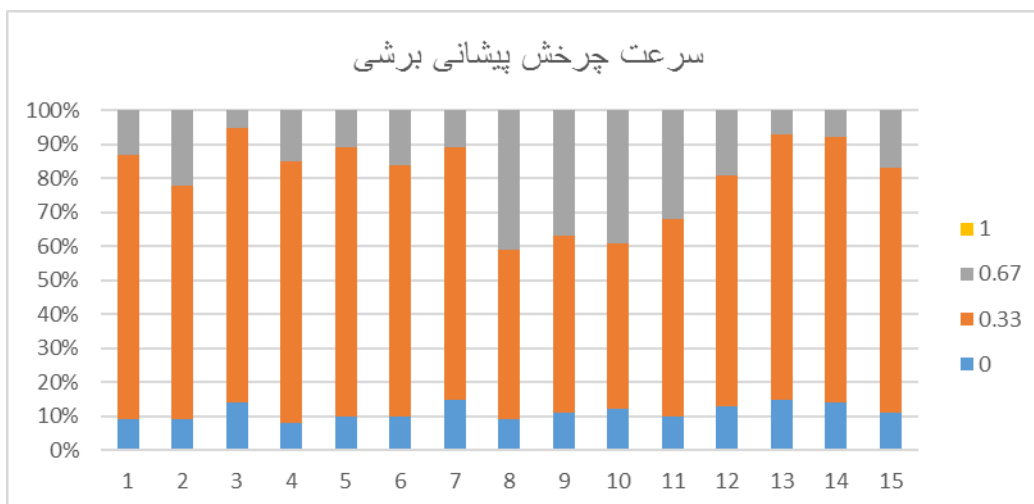
ردیف	سرعت چرخش پیشانی برشی (RPM)	توضیحات	امتیاز
۱	$\leq 3$	سرعت چرخش پیشانی برشی بسیار زیاد	۱
۲	۳-۶	سرعت چرخش پیشانی برشی زیاد	۰/۷۵
۳	۶-۹	سرعت چرخش پیشانی برشی متوسط	۰/۵
۴	۹-۱۲	سرعت چرخش پیشانی برشی کم	۰/۲۵
۵	$> 12$	سرعت چرخش پیشانی برشی بسیار کم	۰



شکل ۴-۳۶: توزیع آماری سرعت چرخش پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۰

جدول ۴-۳۱: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس سرعت چرخش پیشانی برشی

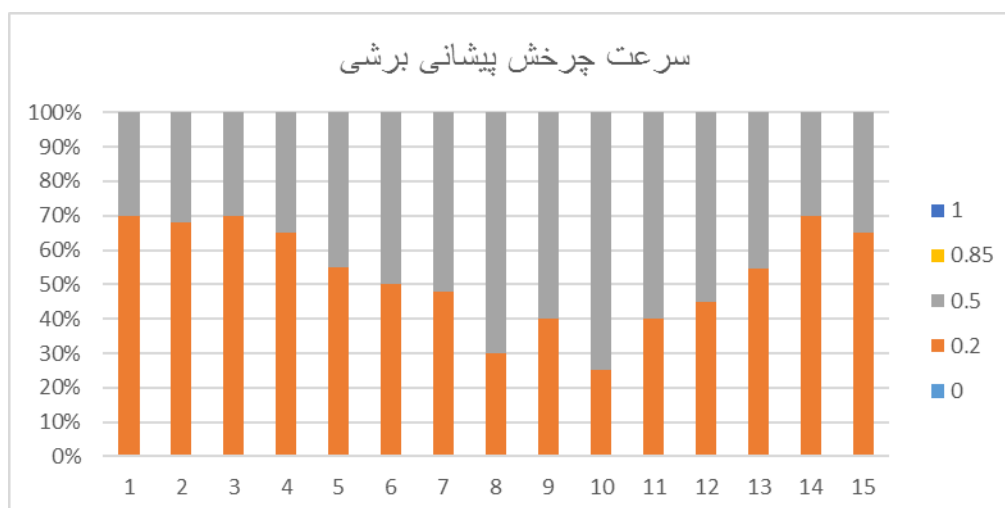
ردیف	سرعت چرخش پیشانی برشی (RPM)	توضیحات	امتیاز
۱	$12 <$	سرعت چرخش پیشانی برشی کم	۱
۲	۱۲-۸	سرعت چرخش پیشانی برشی متوسط	۰/۶۷
۳	۸-۴	سرعت چرخش پیشانی برشی زیاد	۰/۳۳
۴	$4 \geq$	سرعت چرخش پیشانی برشی بسیار زیاد	۰



شکل ۳۷-۴: توزیع آماری سرعت چرخش پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۱

جدول ۴-۳۲: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس سرعت چرخش پیشانی برشی

امتیاز	توضیحات	سرعت چرخش پیشانی برشی (RPM)	ردیف
۱	سرعت چرخش پیشانی برشی بسیار کم	>۱۲	۱
۰/۸۵	سرعت چرخش پیشانی برشی کم	۹-۱۲	۲
۰/۵	سرعت چرخش پیشانی برشی متوسط	۶-۹	۳
۰/۲	سرعت چرخش پیشانی برشی زیاد	۳-۶	۴
۰	سرعت چرخش پیشانی برشی بسیار زیاد	<۳	۵



شکل ۳۸-۴: توزیع آماری سرعت چرخش پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۲

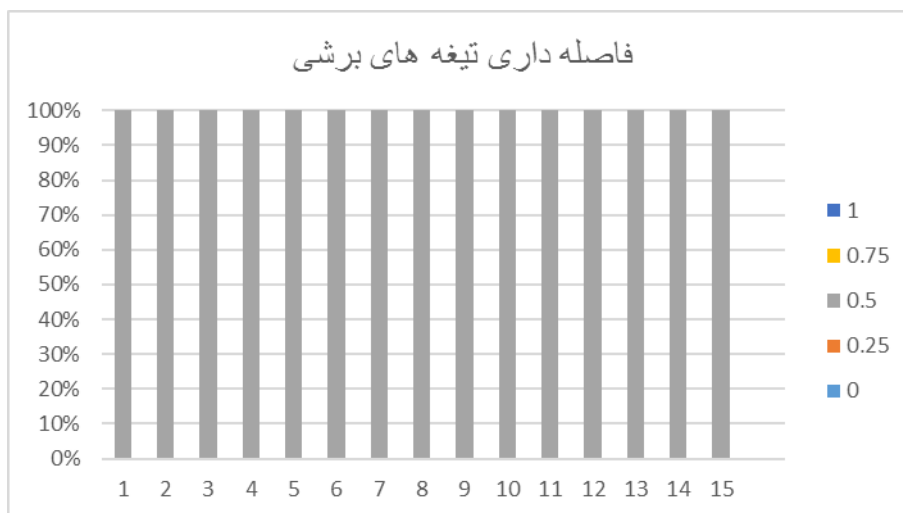
#### ۴-۶-۲- فاصله‌داری تیغه‌های برشی

یکی از عواملی که برای رسیدن به نرخ پیشروی مناسب مورد نظر است، فاصله‌داری تیغه‌های برشی است. مشخص نمودن فاصله محور به محور تیغه‌های برشی با توجه به خصوصیات زمین و سنگ به صورت تجربی مشخص می‌شود. غالباً، این فاصله‌داری بین ۶۵ تا ۹۵ میلی‌متر قرار دارد. هنگامی که از تیغه‌های برشی بزرگتر استفاده می‌شود، نیروی وارده بر هر تیغه و فاصله‌داری افزایش می‌یابد (Maidl, et al., ۲۰۰۸). زمانی که فاصله تیغه‌های برشی کاهش می‌یابد برای رسیدن به نرخ نفوذ ثابتی، باید نیروی تراست ماشین TBM نیز کاهش یابد (Eide, ۲۰۱۴). اوندت (۱۹۸۹) معتقد است نیروی تراست متناسب با فاصله تیغه‌های برشی باید تغییر کند، بطوری که هر چه فاصله بین تیغه‌های برشی بیشتر شود میزان نیروی تراست مورد نیاز نیز زیادتر می‌گردد (Eide, ۲۰۱۴). به منظور طبقه‌بندی عامل فاصله‌داری تیغه‌های برشی از اطلاعات گردآوری شده TBM، ۱۰ پروژه، استفاده گردیده است.

جدول ۴-۳: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس فاصله داری تیغه‌های برشی

ردیف	فاصله داری تیغه های برشی (mm)	توضیحات	امتیاز
۱	$\leq 60$	فاصله داری بسیار کم	۱
۲	۶۰-۷۵	فاصله داری کم	۰/۷۵
۳	۷۵-۹۰	فاصله داری متوسط	۰/۵
۴	۹۰-۱۰۵	فاصله داری زیاد	۰/۲۵
۵	$> 105$	فاصله داری بسیار زیاد	۰

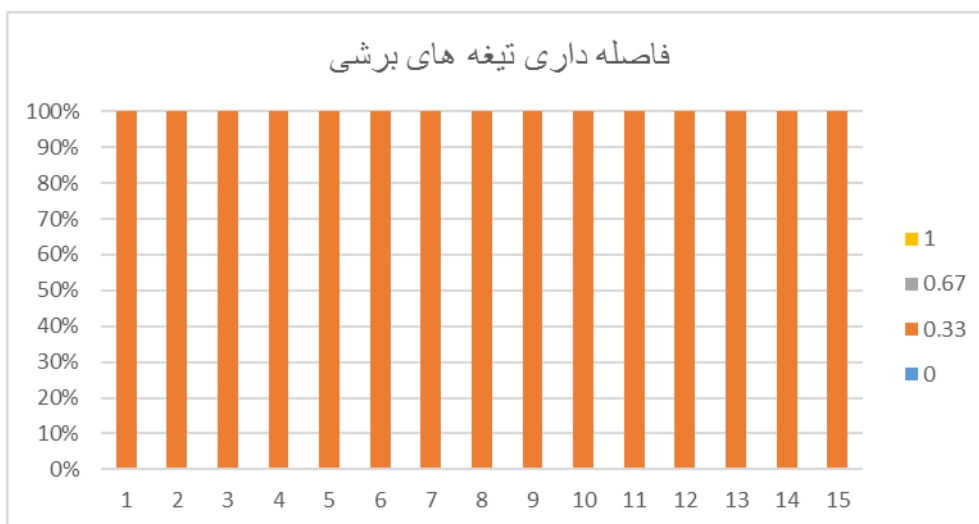




شکل ۴-۳۹: توزیع اماری فاصله داری تیغه های برشی در پهنه های مختلف مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۳

جدول ۴-۳۴: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس فاصله داری تیغه های برشی

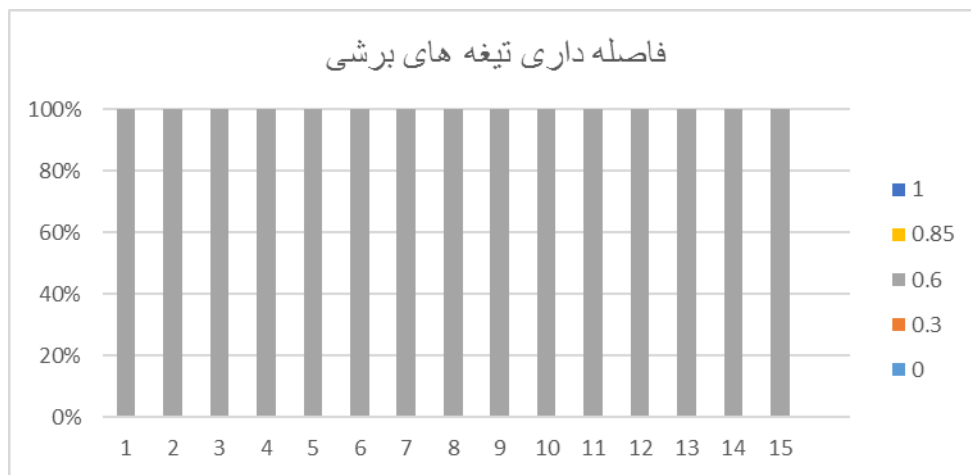
امتیاز	توضیحات	فاصله داری تیغه های برشی (mm)	ردیف
۱	فاصله داری کم	$\leq 65$	۱
۰/۶۷	فاصله داری متوسط	۶۵-۸۰	۲
۰/۳۳	فاصله داری زیاد	۸۰-۹۵	۳
۰	فاصله داری بسیار زیاد	$> 95$	۴



شکل ۴-۴۰: توزیع اماری فاصله داری تیغه های برشی در پهنه های مختلف مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۴

جدول ۴-۳۵: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس فاصله داری تیغه‌های برشی

رتبه	فاصله داری تیغه های برشی (mm)	توضیحات	امتیاز
۱	<۶۰	فاصله داری بسیار کم	۱
۲	۶۰-۷۵	فاصله داری کم	۰/۸۵
۳	۷۵-۹۰	فاصله داری متوسط	۰/۵
۴	۹۰-۱۰۵	فاصله داری زیاد	۰/۳
۵	>۱۰۵	فاصله داری بسیار زیاد	۰



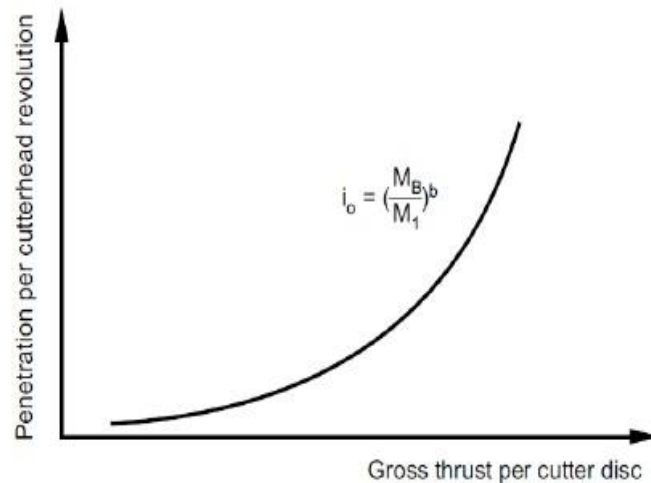
شکل ۴-۴۱: توزیع آماری فاصله‌داری تیغه‌های برشی در پهنه‌های مختلف مسیر تونل بر اساس ۴-۳۵

#### ۴-۶-۳- نیروی پیشران ماشین TBM

یکی از عوامل تاثیرگذار بر نرخ نفوذ ماشین حفار میزان نیروی هر تیغه برشی می‌باشد. به طوری که این عامل در مدل NTNU به عنوان مهمترین پارامتر ماشین TBM در نظر گرفته می‌شود. از اینرو که، با افزایش نیروی هر تیغه برشی میزان نفوذ تیغه برشی در سنگ بیشتر می‌شود و باعث افزایش نرخ نفوذ ماشین حفار می‌گردد. انرژی انتقال یافته از راس حفار به سنگ با افزایش میزان نرخ نفوذ به خوبی منتقل شده است (Bruland, ۱۹۹۸). پارامتر مورد استفاده در مدل NTNU برای بیان نیروی تیغه‌های برشی، از تقسیم نیروی پیشران بر تعداد تیغه‌ها به دست می‌آید. در شکل ۴-۴۱ اثر نیروی متوسط هر تیغه برشی بر روی نرخ نفوذ پایه (نفوذ ۱ میلی‌متری ماشین TBM بر حسب

(mm/rev)، نشان داده شده است. به منظور طبقه‌بندی عامل مذکور در طول مسیر تونل انتقال آب

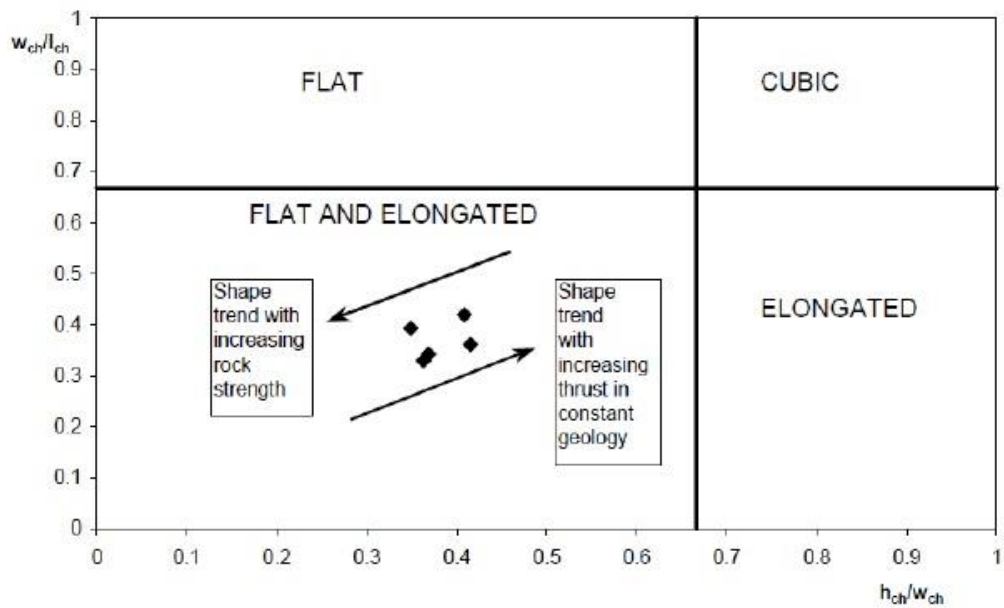
کرج- تهران از اطلاعات گردآوری شده ۱۰ پروژه، استفاده گردیده است.



شکل ۴-۴۲: تاثیر نیروی پیشران در نرخ نفوذ کله حفار در هر چرخش (Eide, ۲۰۱۴)

- $M_b$  - نیروی متوسط هر تیغه برشی (KN/cutter)
- $M_1$  - تراست بحرانی (نیروی مورد نیاز برای نرخ نفوذ ۱ mm/rev) (KN/cutter)
- $b$  - ضریب نفوذ

بر اساس مدل NTNU، نرخ نفوذ با افزایش نیروی تراست به سرعت افزایش می‌یابد. همچنین گانگ و همکاران، (۲۰۰۶) بیان کردند نفوذ در هر چرخش راس حفار زمانی که نیروی هر تیغه برشی بیش از تراست بحرانی است، افزایش می‌یابد (Gong, et al., ۲۰۰۶). آن‌ها همچنین بر روی بر روی ابعاد ذرات حفاری شده نیز بررسی‌هایی انجام دادند و بدان نتیجه رسیدند که با افزایش نیروی پیشران، اندازه ذرات نیز بزرگتر شده و فرایند شکست سنگ با راندمان بهتری انجام می‌شود. آن‌ها نیز متوجه شدند همزمان با افزایش نیروی تراست شکل شیارهای تشکیل شده بین دو کاتر مجاور از حالت مسطح (flat) به حالت دراز (elongated) تغییر شکل یافته است (شکل ۴-۴۲).



شکل ۴-۴۳: تغییر شکل شیپارهای ایجاد شده در دو کاتر مجاور همزمان با افزایش نیروی پیشران (Eide, ۲۰۱۴)

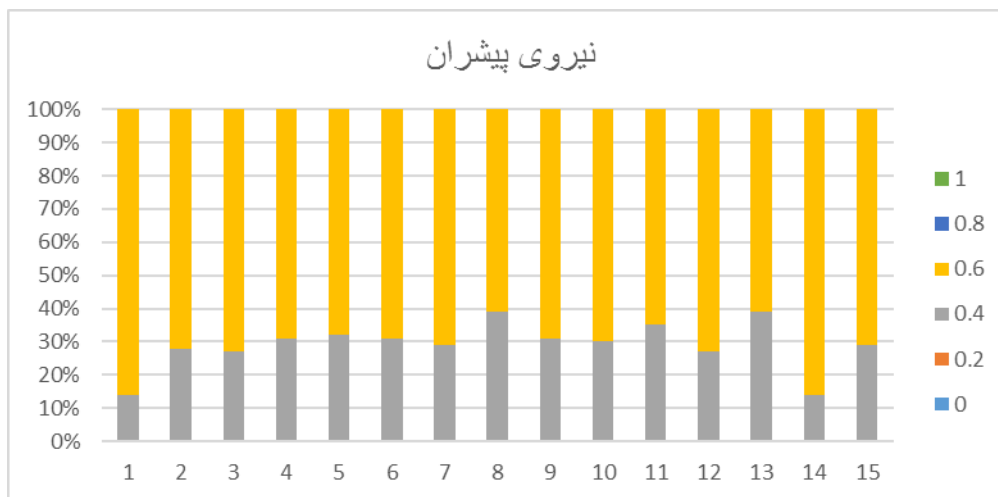
از عوامل محدود کننده برای کاربرد نیروی تراست در ماشین TBM می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

(Bruland, ۱۹۹۸)

- جنس فلز مورد استفاده در ساخت تیغه برشی
- ظرفیت تاب آوری محور تیغه برشی
- ظرفیت سیستم ترابری ماشین TBM
- زمانی که جنس سنگ خیلی سخت باشد یا مواد رسی و دیگر مواد ضعیف اجازه دسترسی به نیروهای تراست بالا را به ماشین حفار نمی‌دهند.

جدول ۴-۳۶: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس نیروی پیشران

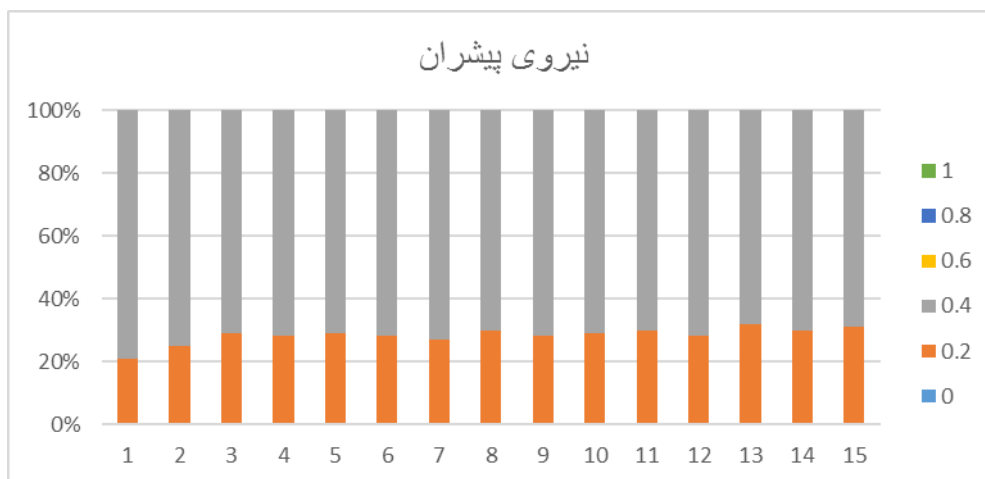
امتیاز	توضیحات	نیروی تراست (KN)	ردیف
۰	نیروی تراست بسیار کم	$\leq 1500$	۱
۰/۲	نیروی تراست کم	۱۵۰۰-۳۰۰۰	۲
۰/۴	نیروی تراست متوسط	۳۰۰۰-۴۵۰۰	۳
۰/۶	نیروی تراست زیاد	۴۵۰۰-۶۰۰۰	۴
۰/۸	نیروی تراست بسیار زیاد	۶۰۰۰-۷۵۰۰	۵
۱	نیروی تراست بحرانی	$> 7500$	۶



شکل ۴-۴۴: توزیع آماری نیروی پیشران در پهناهای مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۶

جدول ۴-۳۷: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس نیروی پیشران

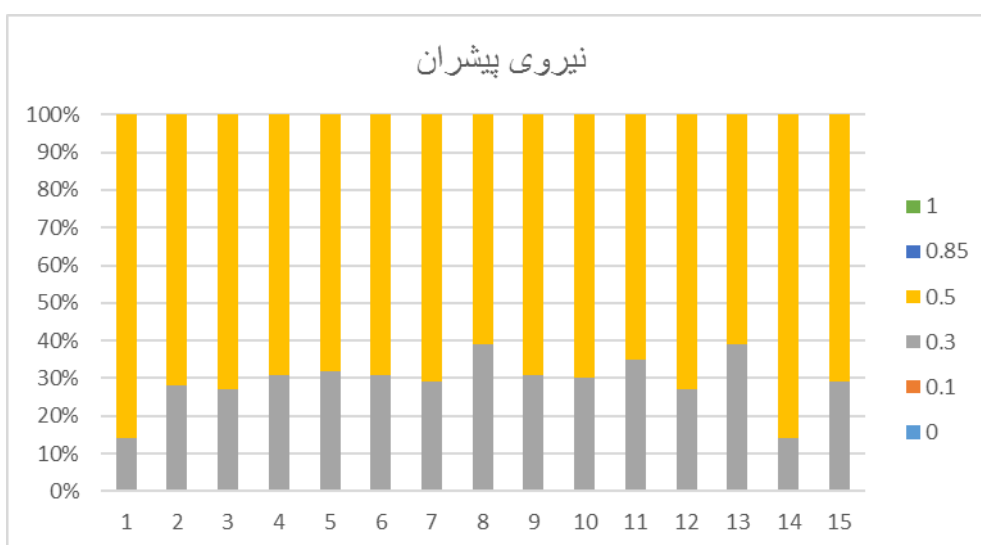
امتیاز	توضیحات	نیروی پیشران (KN)	ردیف
۰	نیروی تراست بسیار کم	$\leq 1000$	۱
۰/۲	نیروی تراست کم	۱۰۰۰-۳۵۰۰	۲
۰/۴	نیروی تراست متوسط	۳۵۰۰-۶۰۰۰	۳
۰/۶	نیروی تراست زیاد	۶۰۰۰-۸۵۰۰	۴
۰/۸	نیروی تراست بسیار زیاد	۸۵۰۰-۱۱۰۰۰	۵
۱	نیروی تراست بحرانی	$> 11000$	۶



شکل ۴-۴۵: توزیع آماری نیروی پیشران در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۷

جدول ۴-۳۸: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس نیروی پیشران

ردیف	نیروی پیشران (KN)	توضیحات	امتیاز
۱	< ۱۵۰۰	نیروی تراست بسیار کم	۰
۲	۱۵۰۰-۳۰۰۰	نیروی تراست کم	۰/۱
۳	۳۰۰۰-۴۵۰۰	نیروی تراست متوسط	۰/۳
۴	۴۵۰۰-۶۰۰۰	نیروی تراست زیاد	۰/۵
۵	۶۰۰۰-۷۵۰۰	نیروی تراست بسیار زیاد	۰/۸۵
۶	> ۷۵۰۰	نیروی تراست بحرانی	۱



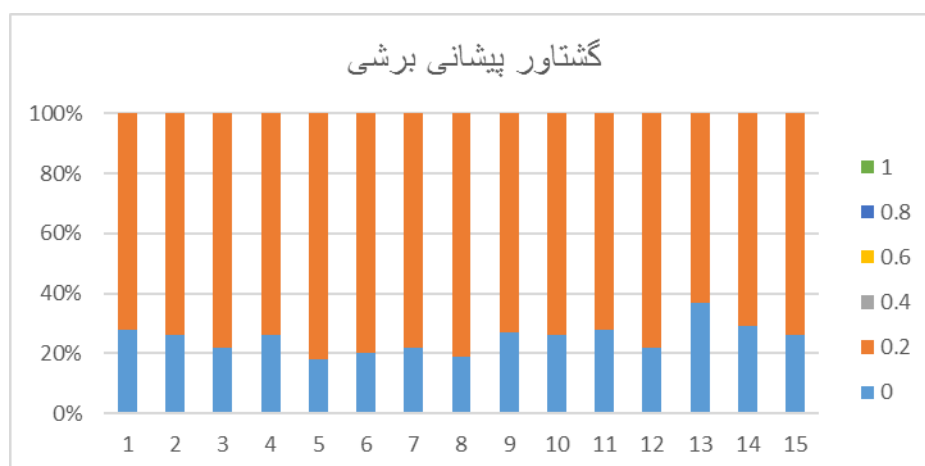
شکل ۴-۴۶: توزیع آماری نیروی پیشران در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۸

#### ۴-۶-۴- گشتاور

اهمیت گشتاور و محدودیت‌های گشتاور توسط گروهی از محققین در سال (۲۰۱۲) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند گشتاور یک عامل تعیین کننده در محاسبه نرخ نفوذ می‌باشد. گشتاور مورد نیاز TBM به عوامل مختلفی همچون، قطر راس حفار، تعداد تیغه‌های برشی بر روی راس حفار و نیروی تراست وارد بر هر تیغه وابسته است (Eide, ۲۰۱۴). به منظور طبقه‌بندی عامل مذکور در طول مسیر تونل انتقال آب کرج- تهران از اطلاعات گردآوری شده TBM، ۱۰ پروژه، استفاده گردیده است.

جدول ۴-۳۹: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس گشتاور پیشانی برشی

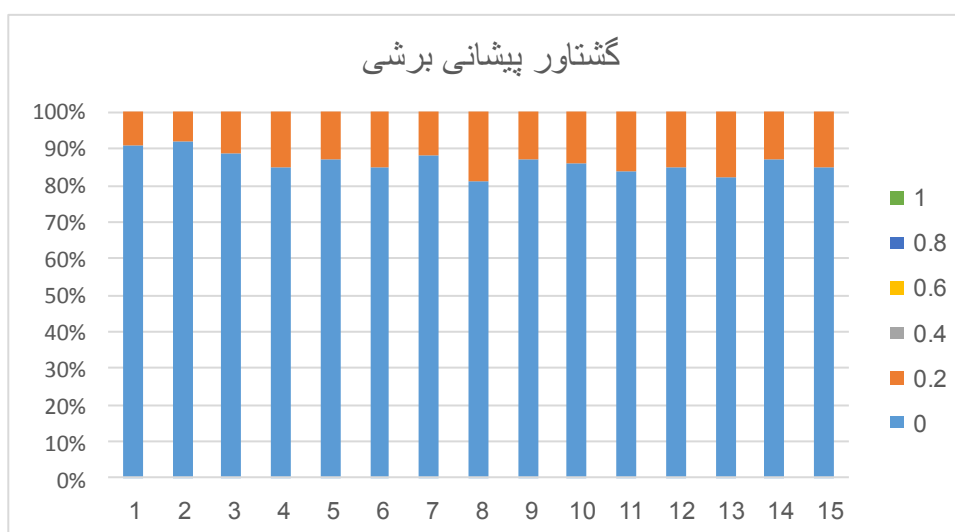
ردیف	گشتاور (KN.m)	توضیحات	امتیاز
۱	$\leq 500$	گشتاور بسیار کم	۰
۲	۵۰۰-۱۰۰۰	گشتاور کم	۰/۲
۳	۱۰۰۰-۱۵۰۰	گشتاور متوسط	۰/۴
۴	۱۵۰۰-۲۰۰۰	گشتاور زیاد	۰/۶
۵	۲۰۰۰-۲۵۰۰	گشتاور بسیار زیاد	۰/۸
۶	$> 2500$	گشتاور بحرانی	۱



شکل ۴-۴۷: توزیع آماری گشتاور پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۳۹

جدول ۴-۴۰: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس گشتاور پیشانی برشی

امتیاز	توضیحات	گشتاور (KN.m)	ردیف
۰	گشتاور بسیار کم	$\leq 750$	۱
۰/۲	گشتاور کم	۷۵۰-۱۲۵۰	۲
۰/۴	گشتاور متوسط	۱۲۵۰-۱۷۵۰	۳
۰/۶	گشتاور زیاد	۱۷۵۰-۲۲۵۰	۴
۰/۸	گشتاور بسیار زیاد	۲۲۵۰-۲۷۵۰	۵
۱	گشتاور بحرانی	$> 2750$	۶

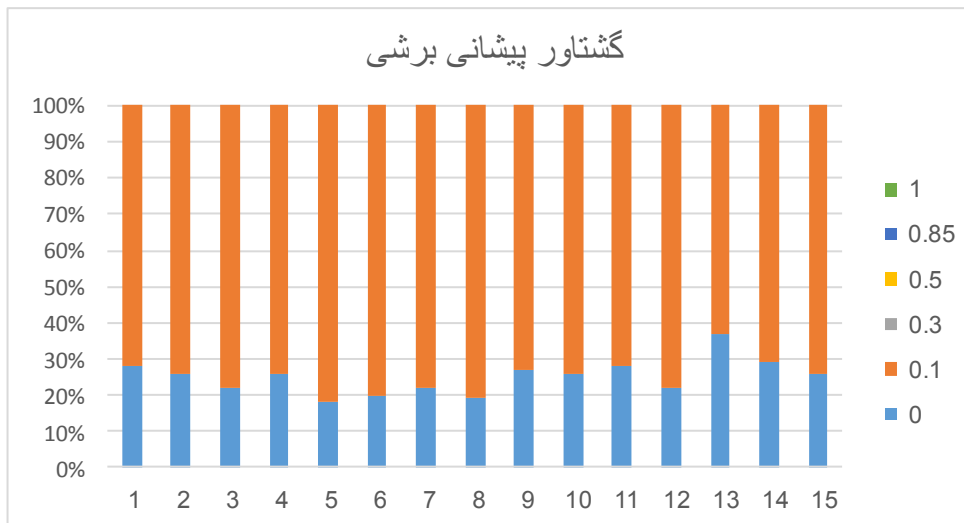


شکل ۴-۴۸: توزیع آماری گشتاور پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴۰

جدول ۴-۴۱: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس گشتاور پیشانی برشی

امتیاز	توضیحات	گشتاور (KN.m)	ردیف
۰	گشتاور بسیار کم	$< 500$	۱
۰/۱	گشتاور کم	۵۰۰-۱۰۰۰	۲
۰/۳	گشتاور متوسط	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۳
۰/۵	گشتاور زیاد	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۴
۰/۸۵	گشتاور بسیار زیاد	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۵
۱	گشتاور بحرانی	$> 2500$	۶





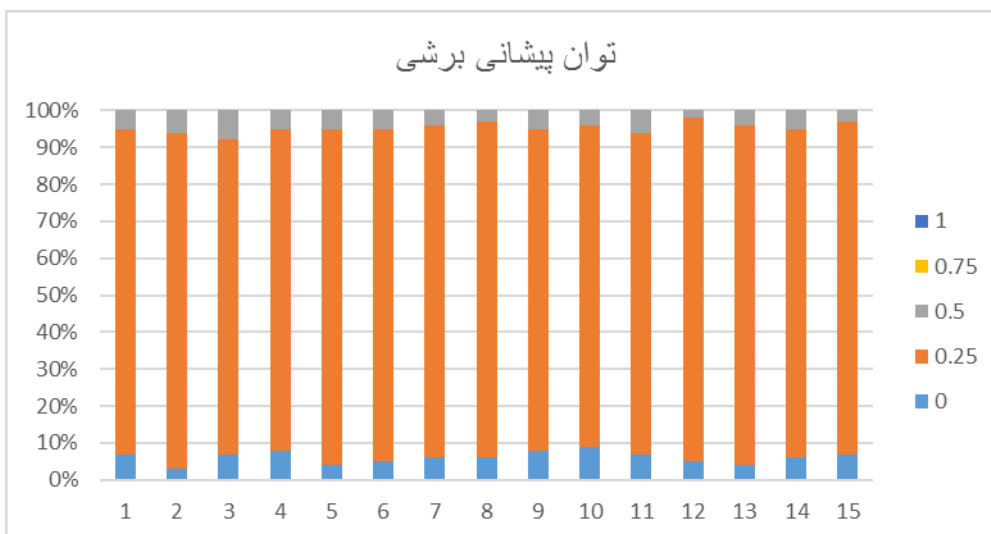
شکل ۴-۴: توزیع آماری گشتاور پیشانی برشی در پهناهای مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴۱

#### ۴-۶-۵- توان راس حفار

زمانی که ماشین حفار تمام مقطع برای رسیدن به نرخ نفوذ بالا کار می کند میزان توان راس حفار باید به اندازه کافی بالا باشد تا نیروی تراست وارده را به خوبی به سنگ وارد کند (Eide, ۲۰۱۴). به منظور طبقه بندی عامل مذکور در طول مسیر تونل انتقال آب کرج- تهران از اطلاعات گردآوری شده TBM در ۱۰ پروژه، استفاده گردیده است.

جدول ۴-۴۲: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس توان پیشانی برشی

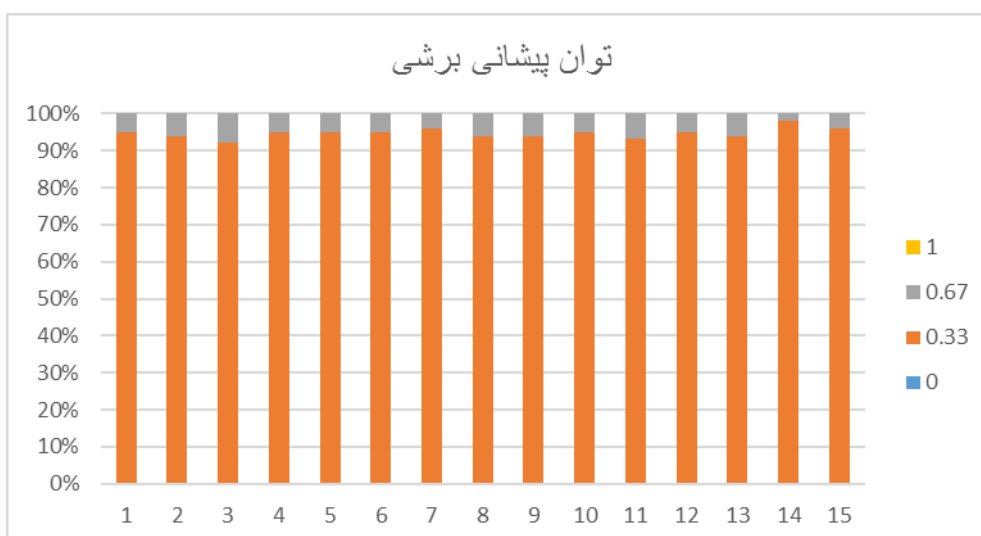
امتیاز	توضیحات	توان پیشانی برشی (KW)	ردیف
۰	توان برشی بسیار کم	$\leq 40\%$	۱
۰/۲۵	توان برشی کم	۴۰٪-۵۰٪	۲
۰/۵	توان برشی متوسط	۵۰٪-۶۰٪	۳
۰/۷۵	توان برشی زیاد	۶۰٪-۷۰٪	۴
۱	توان برشی بسیار زیاد	$> 70\%$	۵



شکل ۴-۵۰: توزیع آماری توان پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴۲

جدول ۴-۴۳: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس توان پیشانی برشی

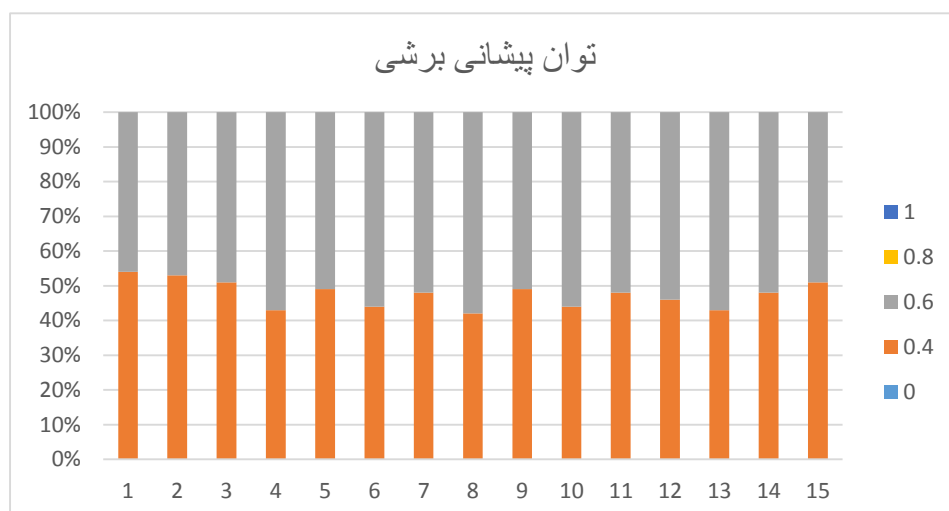
ردیف	توان برشی پیشانی برشی (KW)	توضیحات	امتیاز
۱	$\leq 30\%$	توان برشی بسیار کم	۰
۲	۳۰٪-۵۰٪	توان برشی کم	۰/۳۳
۳	۵۰٪-۷۰٪	توان برشی متوسط	۰/۶۷
۴	$> 70\%$	توان برشی زیاد	۱



شکل ۴-۵۱: توزیع آماری توان پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴۳

جدول ۴-۴: معیار طبقه بندی ماشین TBM بر اساس توان پیشانی برشی

رتبه	توان پیشانی برشی (KW)	توضیحات	امتیاز
۱	<۳۰٪	توان برشی بسیار کم	۰
۲	۳۰-۴۵٪	توان برشی کم	۰/۴
۳	۴۵-۶۰٪	توان برشی متوسط	۰/۶
۴	۶۰-۷۵٪	توان برشی زیاد	۰/۸
۵	>۷۵٪	توان برشی بسیار زیاد	۱



شکل ۴-۵: توزیع آماری توان پیشانی برشی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس جدول ۴-۴

#### ۴-۷- جمع‌بندی

در این فصل به بیان مفهوم عملکرد TBM و محاسبه نرخ پیشروی ماشین حفار برای ۱۵ پهنه مسیر تونل انتقال آب کرج- تهران پرداخته شد. در ادامه به معرفی عوامل موثر بر عملکرد ماشین حفار تمام مقطع نیز پرداخته شد. برای هر یک از عوامل نیز یک معیار طبقه‌بندی ارائه شد که با توجه به شرایط بهینه کارکرد Double Shield-TBM، به هریک از دسته‌ها با توجه به معیار طبقه‌بندی مورد استفاده امتیازی تخصیص داده شده است. همچنین اطلاعات مربوط به تونل مورد بررسی بر اساس معیارهای ارائه شده، طبقه‌بندی گردید.

در فصل بعد با استفاده از اطلاعات تونل انتقال آب کرج- تهران که در این فصل طبقه‌بندی شده است و با بهره‌گیری از روش قطعی، به برآورد ضریب عملکرد TBM مورد استفاده پرداخته می‌شود.

## ۵ فصل پنجم

برآورد ضریب عملکرد ماشین حفرتام مقطع در سنگ سخت مبتنی بر روش قطعی

## ۵-۱- مقدمه

در علم کامپیوتر یک الگوریتم قطعی دارای ورودی‌های مشخص بوده و همیشه نتایج خروجی آن مقادیر ثابتی هستند. محاسبات یک الگوریتم قطعی بر اساس محاسبات ریاضی انجام می‌پذیرد. امروزه با توجه به پدیدار شدن عدم قطعیت‌ها در مسایل مختلف از روش‌های قطعی کمتر استفاده می‌شود.

## ۵-۲- روش‌های قطعی و پدیدار شدن روش‌های احتمالاتی

روش‌های قطعی و شبیه‌سازی دارای پایه و اساس یکسانی هستند، به طوری که هر دو شامل یک معادله که پارامترهای مختلف دخیل در حل مسئله را به هم مرتبط می‌کند، می‌باشند. با این وجود آن‌ها در نوع داده‌های ورودی با هم دارای تفاوت هستند:

- روش‌های قطعی، غالباً دارای نقاط تخمینی می‌باشند.
- روش‌های شبیه‌سازی، برای هر کدام از متغیرها یک تابع توزیع تعریف می‌شود.

تخمین نقاط و توابع توزیع ارایه شده در روش‌های قطعی و احتمالاتی می‌تواند بر اساس مطالعات آزمایشگاهی، مطالعات صحرایی و یا قضاوت مهندسی بر اساس داده‌هایی که وجود ندارند باشد.

## ۵-۳- روش قطعی در تخمین عملکرد ماشین حفر تمام مقطع

برای تخمین عملکرد ماشین حفر تمام مقطع در سنگ سخت با استفاده از روش قطعی، داده‌های ورودی به صورت عددی قطعی از امتیازات هر عامل در پهنه‌های مختلف مسیر به دست آمده و سپس مجموع امتیازات به عنوان شاخص نفوذ در هر پهنه در نظر گرفته می‌شود.

$$PI = \sum_{i=1}^{14} P_i$$

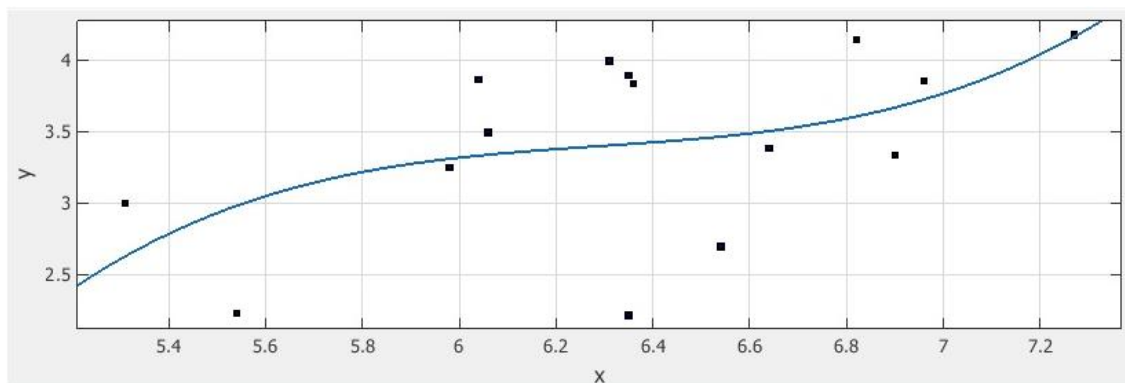
(۱-۵)

امتیاز هر عامل در پهنه‌های مختلف مسیر با توجه به طبقه‌بندی آماری ارائه شده در فصل قبل قابل محاسبه است. شاخص نفوذ برای هر نوع طبقه‌بندی به صورت جداگانه محاسبه شده و بهترین ضریب همبستگی در بین نتایج انتخاب شده و طبقه‌بندی مربوطه به عنوان مناسب‌ترین طبقه‌بندی انتخاب می‌شود.

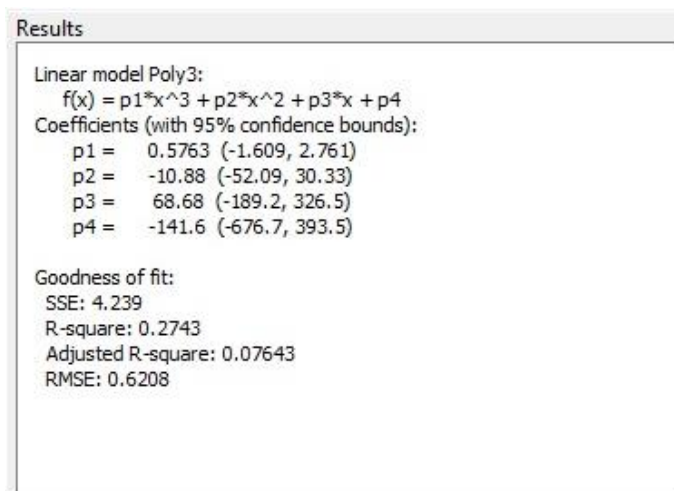
در تصاویر زیر بهترین منحنی برآزش شده بر داده‌های مربوط به طبقه‌بندی‌های مختلف مشاهده می‌شود. در جدول ۱-۵ مقادیر مربوط به شاخص نفوذ مبتنی بر روش قطعی، منتج از طبقه بندی نوع اول که در فصل قبل ارایه شد، آورده شده است.

جدول ۱-۵: مقادیر قطعی شاخص نفوذ مربوط به طبقه‌بندی نوع اول برای ۱۵ پهنه مسیر تونل انتقال آب کرج-تهران

پهنه	شاخص نفوذ	نرخ نفوذ واقعی (m/h)
۱ (S.۱)	۶/۵۴	۲/۷
۲ (S.۲)	۵/۹۸	۳/۲۵
۳ (S.۳)	۶/۳۵	۲/۲۲
۴ (S.۴)	۶/۰۶	۳/۵
۵ (S.۵)	۶/۹۶	۳/۸۶
۶ (S.۶)	۶/۳۵	۳/۹
۷ (S.۷)	۶/۰۴	۳/۸۷
۸ (S.۸)	۶/۳۶	۳/۸۴
۹ (S.۹)	۶/۸۲	۴/۱۵
۱۰ (S.۱۰)	۶/۳۲	۴
۱۱ (S.۱۱)	۷/۲۷	۴/۱۸
۱۲ (S.۱۲)	۶/۶۴	۳/۳۹
۱۳ (S.۱۳)	۶/۹	۳/۳۴
۱۴ (S.۱۴)	۵/۳۱	۳
۱۵ (S.۱۵)	۵/۵۴	۲/۲۳



الف: منحنی برازش شده بر روی مقادیر قطعی شاخص نفوذ مربوط به طبقه‌بندی نوع اول



ب: تابع منحنی برازش شده در قسمت (الف)

شکل ۵-۱: منحنی و معادله منحنی برازش شده بر روی شاخص نفوذ و میزان نفوذ واقعی مربوط به طبقه‌بندی نوع اول

در این منحنی  $X = PI$  و  $F(X) = PR$  می‌باشد.

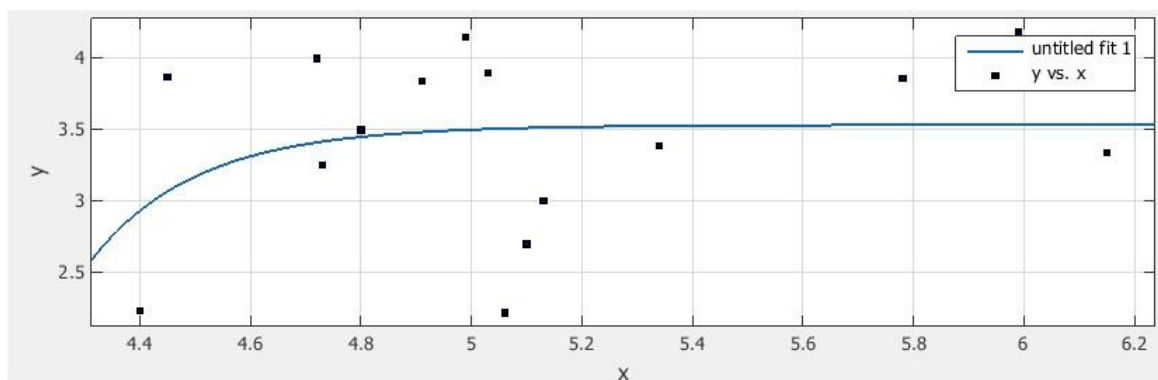
در جدول ۵-۲ مقادیر مربوط به شاخص نفوذ مبتنی بر روش قطعی، منتج از طبقه‌بندی نوع

دوم که در فصل قبل ارایه شد، آورده شده است.



جدول ۵-۲: مقادیر قطعی شاخص نفوذ مربوط به طبقه‌بندی نوع دوم برای ۱۵ پهنه مسیر تونل انتقال آب کرج- تهران

پهنه	شاخص نفوذ	نرخ نفوذ واقعی (m/h)
۱ (S.۱)	۵/۱	۲/۷
۲ (S.۲)	۴/۷۳	۳/۲۵
۳ (S.۳)	۵/۰۶	۲/۲۲
۴ (S.۴)	۴/۸	۳/۵
۵ (S.۵)	۵/۷۸	۳/۸۶
۶ (S.۶)	۵/۰۳	۳/۹
۷ (S.۷)	۴/۴۵	۳/۸۷
۸ (S.۸)	۴/۹۱	۳/۸۴
۹ (S.۹)	۴/۹۹	۴/۱۵
۱۰ (S.۱۰)	۴/۷۲	۴
۱۱ (S.۱۱)	۵/۹۹	۴/۱۸
۱۲ (S.۱۲)	۵/۳۴	۳/۳۹
۱۳ (S.۱۳)	۶/۱۵	۳/۳۴
۱۴ (S.۱۴)	۵/۱۳	۳
۱۵ (S.۱۵)	۴/۴	۲/۲۳



الف: منحنی برازش شده بر روی مقادیر قطعی شاخص نفوذ مربوط به طبقه‌بندی نوع دوم

Results	
General model Power2:	
$f(x) = a \cdot x^b + c$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a =	-2.022e+14 (-3.96e+16, 3.92e+16)
b =	-22.58 (-154, 108.9)
c =	3.534 (2.88, 4.188)
Goodness of fit:	
SSE:	5.388
R-square:	0.07766
Adjusted R-square:	-0.07607
RMSE:	0.6701

ب: تابع منحنی برازش شده در قسمت (الف)

شکل ۲-۵: منحنی و معادله منحنی برازش شده بر روی شاخص نفوذ و میزان نفوذ واقعی مربوط به طبقه‌بندی نوع دوم

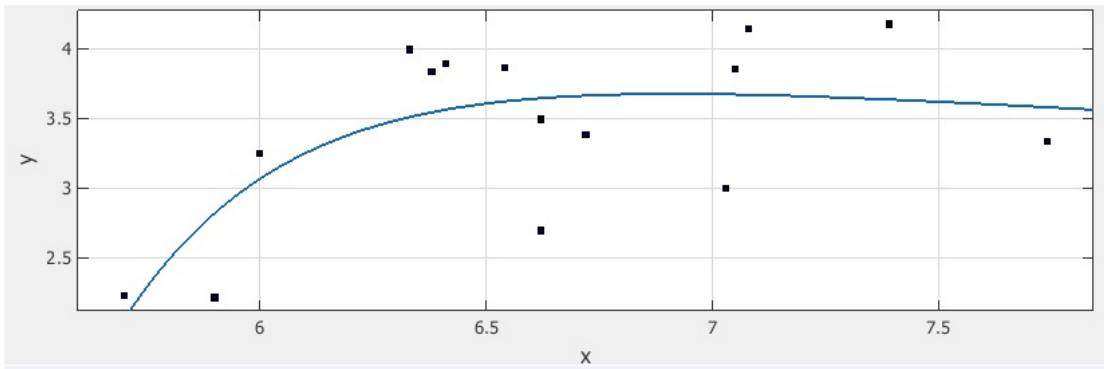
در این منحنی  $X = PI$  و  $F(X) = PR$  می‌باشد.

در جدول ۳-۵ مقادیر مربوط به شاخص نفوذ مبتنی بر روش قطعی، منتج از طبقه‌بندی نوع

سوم که در فصل قبل ارایه شد، آورده شده است.

جدول ۳-۵: مقادیر قطعی شاخص نفوذ مربوط به طبقه‌بندی نوع سوم برای ۱۵ پهنه مسیر تونل انتقال آب کرج-تهران

پهنه	شاخص نفوذ	نرخ نفوذ واقعی
۱ (S.۱)	۶/۶۲	۲/۷
۲ (S.۲)	۵/۹۹	۳/۲۵
۳ (S.۳)	۵/۹	۲/۲۲
۴ (S.۴)	۶/۶۲	۳/۵
۵ (S.۵)	۷/۰۵	۳/۸۶
۶ (S.۶)	۶/۴۱	۳/۹
۷ (S.۷)	۶/۵۴	۳/۸۷
۸ (S.۸)	۶/۳۹	۳/۸۴
۹ (S.۹)	۷/۰۸	۴/۱۵
۱۰ (S.۱۰)	۶/۳۴	۴
۱۱ (S.۱۱)	۷/۳۹	۴/۱۸
۱۲ (S.۱۲)	۶/۷۲	۳/۳۹
۱۳ (S.۱۳)	۷/۷۴	۳/۳۴
۱۴ (S.۱۴)	۷/۰۳	۳
۱۵ (S.۱۵)	۵/۶۹	۲/۲۳



الف: منحنی برازش شده بر روی مقادیر قطعی شاخص نفوذ مربوط به طبقه‌بندی نوع سوم

Results	
General model Exp2:	
$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a =	5.467 (-16.29, 27.22)
b =	-0.05421 (-0.5909, 0.4825)
c =	-7.599e+06 (-3.362e+08, 3.21e+08)
d =	-2.662 (-10.52, 5.193)
Goodness of fit:	
SSE:	2.988
R-square:	0.4885
Adjusted R-square:	0.349
RMSE:	0.5212

ب: تابع منحنی برازش شده در قسمت (الف)

شکل ۳-۵: منحنی و معادله منحنی برازش شده بر روی شاخص نفوذ و میزان نفوذ واقعی مربوط به طبقه‌بندی نوع سوم

در این منحنی  $X = PI$  و  $F(X) = PR$  می‌باشد.

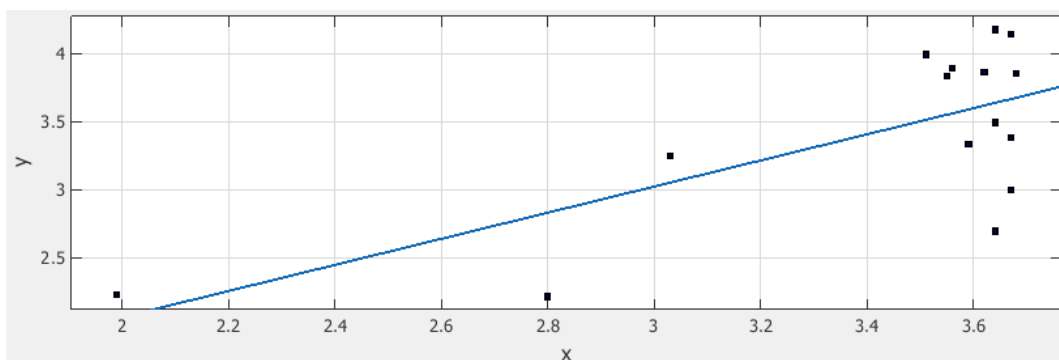
با توجه به نتایج به دست آمده از ضریب همبستگی، مربوط به طبقه‌بندی‌های مختلف آرایه شده در فصل ۴، طبقه‌بندی نوع سوم دارای  $R^2 = 0.4885$  می‌باشد. پس نتایج به دست آمده از این نوع طبقه‌بندی به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد. جدول ۴-۵ نرخ نفوذهای بدست آمده از رابطه منحنی برازش شده بر روی داده‌های طبقه‌بندی نوع سوم را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۵: مقادیر نرخ نفوذ پیش‌بینی شده برای طبقه‌بندی نوع سوم مبتنی بر روش قطعی

پهنه	شاخص نفوذ	نرخ نفوذ پیش‌بینی شده	نرخ نفوذ واقعی
۱ (S.۱)	۶/۶۲	۳/۶۴	۲/۷
۲ (S.۲)	۵/۹۹	۳/۰۳	۳/۲۵
۳ (S.۳)	۵/۹	۲/۸	۲/۲۲
۴ (S.۴)	۶/۶۲	۳/۶۴	۳/۵
۵ (S.۵)	۷/۰۵	۳/۶۸	۳/۸۶
۶ (S.۶)	۶/۴۱	۳/۵۶	۳/۹
۷ (S.۷)	۶/۵۴	۳/۶۲	۳/۸۷
۸ (S.۸)	۶/۳۹	۳/۵۵	۳/۸۴
۹ (S.۹)	۷/۰۸	۳/۶۷	۴/۱۵
۱۰ (S.۱۰)	۶/۳۴	۳/۵۱	۴
۱۱ (S.۱۱)	۷/۳۹	۳/۶۴	۴/۱۸
۱۲ (S.۱۲)	۶/۷۲	۳/۶۷	۳/۳۹
۱۳ (S.۱۳)	۷/۷۴	۳/۵۹	۳/۳۴
۱۴ (S.۱۴)	۷/۰۳	۳/۶۷	۳
۱۵ (S.۱۵)	۵/۶۹	۱/۹۹	۲/۲۳

شکل ۴-۵ نحوه همبستگی بین مقادیر نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ واقعی را نشان

داده است.



شکل ۴-۵: منحنی برازش شده بین مقادیر نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ واقعی

## ۵-۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل به بررسی نتایج حاصل از انواع طبقه‌بندی ارائه شده در فصل قبل پرداخته شده است. سپس با توجه به امتیاز هر عامل در پهنه‌های مختلف مسیر، بهترین برآزش داده‌ها بر روی نتایج انجام شده و منحنی مربوط به طبقه‌بندی نوع سوم دارای بالاترین میزان  $R^2=0/4885$  در بین منحنی‌های مختلف بوده است. از این طبقه‌بندی در فصل بعد برای برآورد ضریب عملکرد ماشین حفر تمام مقطع مبتنی بر رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ استفاده می‌شود.



## ۶ فصل هشتم

برآورد ضریب عملکرد ماشین حار تمام مقطع در سنگ سخت

مبتنی بر رویکرد سیستم مهندسی سنگ

## ۶-۱- مقدمه

هدف نهایی از پژوهش حاضر، برآورد عملکرد TBM به کمک شاخص نرخ نفوذ است. در این فصل با بهره‌گیری از روش کدگذاری احتمالاتی PESQ، به کدگذاری ماتریس اندرکنش پرداخته شده و وزن هر یک از عوامل در مساله مورد نظر مشخص شده است. سپس با استفاده از وزن‌های مذکور و توزیع آماری مقادیر عوامل موثر که در فصل قبل ارائه شد، با بهره‌گیری از روش مدل‌سازی احتمالاتی مونت کارلو، شاخص نرخ نفوذ برای هر یک از پهنه‌های مسیر محاسبه می‌شود. در نهایت نیز با مقایسه‌ی مقادیر شاخص نفوذ و نرخ نفوذ واقعی محاسبه شده برای هر یک از پهنه‌های مسیر، رابطه‌ی ای‌ارایه می‌گردد. با استفاده از این رابطه، می‌توان شاخص نرخ نفوذ TBM تونل مورد مطالعه را برای ادامه مسیر برآورد نمود. همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، استفاده از روش کدگذاری PESQ موجب کاهش خطای قضاوت مهندسی در تعیین درایه‌های ماتریس اندرکنش می‌شود.

## ۶-۲- تحلیل اندرکنش عوامل با استفاده از رویکرد RES

در این بخش ماتریس اندرکنش لازم برای تحلیل مساله تشکیل و با استفاده از روش نیمه عددی خبره‌ی احتمالاتی (PESQ) کدگذاری می‌شود. سپس وزن هر یک از عوامل در مساله به صورت احتمالاتی تعیین می‌گردد.

### ۶-۲-۱- کدگذاری ماتریس اندرکنش

همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، در روش کدگذاری نیمه عددی خبره احتمالاتی (PESQ) به جای استفاده از یک کارشناس، از چندین کارشناس استفاده می‌شود و نظرات آن‌ها به صورت احتمالاتی تحلیل می‌گردد. با توجه به این‌که مطابق جدول ۴-۲، ۱۴ عامل در مساله حاضر در نظر



گرفته شده است، ماتریس‌های اندرکنش حاصل به صورت  $14 \times 14$  خواهد بود.

در این پژوهش از نظرات ۱۰ کارشناس برای کدگذاری ماتریس اندرکنش استفاده شده است. پیاده‌سازی روش کدگذاری PESQ از طریق تشکیل ۵ ماتریس اندرکنش (به هر یک از عوامل، مقادیر ۰ تا ۴ تخصیص می‌یابد) ممکن می‌گردد. این ماتریس‌ها با نام‌های  $M_1$  تا  $M_4$  شناخته می‌شوند. ۱۴ عامل یاد شده در امتداد قطر اصلی این ماتریس‌ها قرار می‌گیرند. همان‌طور که اشاره شد، در روش PESQ احتمال‌ها برای تمام مقادیر کدها در نظر گرفته و اختصاص می‌یابند. برای محاسبه‌ی هر یک از اندرکنش‌ها به صورت احتمالی، تعداد نظراتی که کارشناسان برای آن اندرکنش (مقادیر ۰ تا ۴) داده‌اند تقسیم بر تعداد کارشناسان (در این مساله ۱۰) می‌شود. بنابراین به جای تعیین یک مقدار قطعی برای هر اندرکنش، احتمال امکان در نظر گرفتن مقادیر مختلف کدها (در این مورد ۰ تا ۴) به اندرکنش‌ها اختصاص می‌یابد. این احتمالات در ۵ ماتریس نشان داده می‌شوند، که در آن‌ها درایه‌های غیر اصلی در برگیرنده‌ی احتمال رخداد یک کد مخصوص برای یک اندرکنش خاص است (جداول ۶-۱ تا ۶-۵).

به عنوان مثالی از فرایند کدگذاری، نحوه تخصیص پنج مقدار کد به اثر عامل سرعت چرخش راس حفار ( $P_1$ ) بر فاصله‌داری تیغه‌های برشی ( $P_2$ )، در ماتریس‌های  $M_1$  تا  $M_4$  توضیح داده می‌شود. احتمال‌های اختصاص یافته عبارتند از: ۲۰٪ برای رخداد کد ۰ (بدون اندرکنش)، ۲۰٪ برای رخداد کد ۱ (اندرکنش ضعیف)، ۵۰٪ برای رخداد کد ۲ (اندرکنش متوسط)، ۱۰٪ برای رخداد کد ۳ (اندرکنش قوی) و در نهایت ۰ درصد برای احتمال رخداد کد ۴ (اندرکنش بحرانی).

جدول ۱-۶: ماتریس اندرکنش  $M_6$  برای احتمال کد صفر

$P_1$	۲۰	۲۰	۱۰	۰	۶۰	۸۰	۶۰	۱۰۰	۵۰	۵۰	۴۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۰	$P_2$	۱۰	۳۰	۰	۷۰	۷۰	۶۰	۱۰۰	۸۰	۴۰	۵۰	۱۰۰	۱۰۰
۰	۰	$P_3$	۰	۰	۶۰	۷۰	۵۰	۱۰۰	۸۰	۵۰	۴۰	۱۰۰	۱۰۰
۰	۰	۱۰	$P_4$	۰	۶۰	۶۰	۵۰	۱۰۰	۷۰	۷۰	۵۰	۱۰۰	۹۰
۰	۷۰	۰	۰	$P_5$	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۰	$P_6$	۰	۱۰	۰	۴۰	۰	۳۰	۹۰	۹۰
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۰	۰	$P_7$	۱۰	۰	۳۰	۰	۲۰	۹۰	۹۰
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۰	۲۰	۲۰	$P_8$	۰	۲۰	۲۰	۱۰	۹۰	۹۰
۸۰	۱۰۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	$P_9$	۱۰۰	۰	۰	۳۰	۶۰
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۵۰	۵۰	۳۰	۲۰	$P_{10}$	۲۰	۲۰	۹۰	۲۰
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	$P_{11}$	۱۰	۱۰۰	۴۰
۲۰	۳۰	۲۰	۲۰	۰	۱۰	۱۰	۱۰	۰	۵۰	۰	$P_{12}$	۹۰	۹۰
۲۰	۷۰	۲۰	۶۰	۳۰	۱۰	۱۰	۹۰	۰	۹۰	۰	۸۰	$P_{13}$	۹۰
۱۰	۱۰۰	۱۰	۱۰	۰	۳۰	۳۰	۰	۴۰	۶۰	۰	۰	۰	$P_{14}$

$P_1$ : سرعت چرخش راس حفار؛  $P_2$ : فاصله‌داری تیغه‌های برشی؛  $P_3$ : نیروی تراست؛  $P_4$ : گشتاور راس حفار؛  $P_5$ : توان الکتریکی راس حفار؛  $P_6$ : مقاومت تراکمی تک محوره؛  $P_7$ : مقاومت کششی؛  $P_8$ : وجود ناپیوستگی‌ها؛  $P_9$ : هوازدگی؛  $P_{10}$ : جهت ناپیوستگی‌ها با محور تونل؛  $P_{11}$ : شاخص شکنندگی؛  $P_{12}$ : وجود آب زیرزمینی؛  $P_{13}$ : وجود محتوی کوارتز؛  $P_{14}$ : وجود سینه‌کار مختلط.

جدول ۲-۶: ماتریس اندرکنش  $M_1$  برای احتمال کد ۱

$P_1$	۲۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۲۰	۰	۲۰	۰	۴۰	۰	۰
۰	$P_2$	۲۰	۰	۲۰	۰	۲۰	۳۰	۰	۲۰	۲۰	۴۰	۰	۰
۰	۰	$P_3$	۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۱۰	۲۰	۰	۰
۱۰	۱۰	۰	$P_4$	۰	۱۰	۳۰	۴۰	۰	۲۰	۱۰	۱۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	$P_5$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰	۲۰	۱۰	۱۰	۰	$P_6$	۳۰	۰	۲۰	۲۰	۱۰	۰	۰	۰
۱۰	۲۰	۰	۰	۰	۲۰	$P_7$	۰	۲۰	۰	۱۰	۱۰	۰	۰
۳۰	۲۰	۱۰	۳۰	۱۰	۳۰	۲۰	$P_8$	۰	۰	۱۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۴۰	۰	۰	۰	۰	$P_9$	۰	۳۰	۶۰	۷۰	۴۰
۴۰	۲۰	۲۰	۳۰	۴۰	۰	۰	۳۰	۲۰	$P_{10}$	۳۰	۰	۰	۳۰
۱۰	۲۰	۱۰	۱۰	۲۰	۴۰	۲۰	۲۰	۸۰	۱۰	$P_{11}$	۴۰	۰	۳۰
۰	۵۰	۰	۱۰	۸۰	۶۰	۱۰	۳۰	۰	۱۰	۰	$P_{12}$	۱۰	۰
۶۰	۳۰	۳۰	۲۰	۶۰	۰	۵۰	۰	۳۰	۰	۰	۰	$P_{13}$	۱۰
۰	۰	۰	۰	۱۰	۱۰	۰	۶۰	۰	۰	۰	۴۰	۶۰	$P_{14}$

$P_1$ : سرعت چرخش راس حفار؛  $P_2$ : فاصله‌داری تیغه‌های برشی؛  $P_3$ : نیروی تراست؛  $P_4$ : گشتاور راس حفار؛  $P_5$ : توان الکتریکی راس حفار؛  $P_6$ : مقاومت تراکمی تک محوره؛  $P_7$ : مقاومت کششی؛  $P_8$ : وجود ناپیوستگی‌ها؛  $P_9$ : هوازدگی؛  $P_{10}$ : جهت ناپیوستگی‌ها با محور تونل؛  $P_{11}$ : شاخص شکنندگی؛  $P_{12}$ : وجود آب زیرزمینی؛  $P_{13}$ : وجود محتوی کوارتز؛  $P_{14}$ : وجود سینه‌کار مختلط.

جدول ۳-۶: ماتریس اندرکنش  $M_{22}$  برای کد ۲

$P_1$	۵۰	۱۰	۱۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰
۴۰	$P_2$	۳۰	۶۰	۴۰	۲۰	۱۰	۱۰	۰	۰	۳۰	۱۰	۰	۰
۴۰	۵۰	$P_3$	۳۰	۰	۱۰	۰	۱۰	۰	۱۰	۲۰	۴۰	۰	۰
۱۰	۵۰	۲۰	$P_4$	۱۰	۱۰	۰	۱۰	۰	۰	۱۰	۴۰	۰	۱۰
۲۰	۲۰	۰	۰	$P_5$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۰	۳۰	۰	۳۰	۵۰	$P_6$	۴۰	۳۰	۸۰	۰	۱۰	۷۰	۱۰	۱۰
۰	۱۰	۲۰	۶۰	۵۰	۸۰	$P_7$	۲۰	۸۰	۵۰	۱۰	۶۰	۱۰	۱۰
۲۰	۲۰	۵۰	۶۰	۴۰	۱۰	۱۰	$P_8$	۲۰	۲۰	۲۰	۱۰	۱۰	۱۰
۲۰	۰	۴۰	۲۰	۰	۰	۰	۴۰	$P_9$	۰	۴۰	۴۰	۰	۰
۳۰	۷۰	۲۰	۲۰	۴۰	۴۰	۳۰	۱۰	۱۰	$P_{10}$	۴۰	۴۰	۱۰	۵۰
۲۰	۱۰	۰	۰	۲۰	۱۰	۴۰	۵۰	۲۰	۲۰	$P_{11}$	۳۰	۰	۳۰
۷۰	۲۰	۵۰	۶۰	۲۰	۳۰	۴۰	۰	۰	۴۰	۳۰	$P_{12}$	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۱۰	۵۰	۲۰	۰	۲۰	۰	۰	۱۰	$P_{13}$	۰
۰	۰	۰	۰	۳۰	۶۰	۶۰	۰	۶۰	۲۰	۱۰	۰	۴۰	$P_{14}$

$P_1$ : سرعت چرخش راس حفار؛  $P_2$ : فاصله‌داری تیغه‌های برشی؛  $P_3$ : نیروی تراست؛  $P_4$ : گشتاور راس حفار؛  $P_5$ : توان الکتریکی راس حفار؛  $P_6$ : مقاومت تراکمی تک محوره؛  $P_7$ : مقاومت کششی؛  $P_8$ : وجود ناپیوستگی‌ها؛  $P_9$ : هوازدگی؛  $P_{10}$ : جهت ناپیوستگی‌ها با محور تونل؛  $P_{11}$ : شاخص شکنندگی؛  $P_{12}$ : وجود آب زیرزمینی؛  $P_{13}$ : وجود محتوی کوارتز؛  $P_{14}$ : وجود سینه‌کار مختلط.

جدول ۴-۶: ماتریس اندرکنش  $M_3$  برای کد ۳

$P_1$	۱۰	۴۰	۳۰	۳۰	۴۰	۲۰	۲۰	۰	۱۰	۲۰	۲۰	۰	۰
۲۰	$P_2$	۳۰	۰	۴۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰	۰
۳۰	۲۰	$P_3$	۲۰	۴۰	۰	۱۰	۱۰	۰	۰	۲۰	۰	۰	۰
۳۰	۴۰	۲۰	$P_4$	۱۰	۲۰	۱۰	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰	۰
۱۰	۱۰	۴۰	۲۰	$P_5$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳۰	۱۰	۳۰	۲۰	۵۰	$P_6$	۳۰	۳۰	۰	۴۰	۰	۰	۰	۰
۴۰	۴۰	۵۰	۲۰	۴۰	۰	$P_7$	۱۰	۰	۲۰	۱۰	۱۰	۰	۰
۴۰	۲۰	۳۰	۰	۳۰	۴۰	۵۰	$P_8$	۶۰	۴۰	۴۰	۴۰	۰	۰
۰	۰	۶۰	۴۰	۰	۴۰	۴۰	۶۰	$P_9$	۰	۳۰	۰	۰	۰
۲۰	۰	۳۰	۴۰	۱۰	۱۰	۲۰	۳۰	۵۰	$P_{10}$	۱۰	۲۰	۰	۰
۴۰	۵۰	۵۰	۸۰	۶۰	۴۰	۳۰	۲۰	۰	۲۰	$P_{11}$	۲۰	۰	۰
۰	۰	۳۰	۱۰	۰	۰	۴۰	۵۰	۲۰	۰	۷۰	$P_{12}$	۰	۱۰
۰	۰	۲۰	۰	۰	۱۰	۱۰	۰	۵۰	۰	۱۰	۱۰	$P_{13}$	۰
۷۰	۰	۴۰	۶۰	۶۰	۰	۱۰	۲۰	۰	۰	۴۰	۲۰	۰	$P_{14}$

$P_1$ : سرعت چرخش راس حفار؛  $P_2$ : فاصله‌داری تیغه‌های برشی؛  $P_3$ : نیروی تراست؛  $P_4$ : گشتاور راس حفار؛  $P_5$ : توان الکتریکی راس حفار؛  $P_6$ : مقاومت تراکمی تک محوره؛  $P_7$ : مقاومت کششی؛  $P_8$ : وجود ناپیوستگی‌ها؛  $P_9$ : هوازدگی؛  $P_{10}$ : جهت ناپیوستگی‌ها با محور تونل؛  $P_{11}$ : شاخص شکنندگی؛  $P_{12}$ : وجود آب زیرزمینی؛  $P_{13}$ : وجود محتوی کوارتز؛  $P_{14}$ : وجود سینه‌کار مختلط.

جدول ۵-۶: ماتریس اندرکنش  $M_4$  برای کد ۴

$P_1$	۰	۲۰	۵۰	۶۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳۰	$P_2$	۱۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳۰	۳۰	$P_3$	۴۰	۶۰	۲۰	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰	۰	۰
۵۰	۰	۵۰	$P_4$	۹۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰	۰	۰
۷۰	۰	۶۰	۸۰	$P_5$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳۰	۳۰	۵۰	۳۰	۰	$P_6$	۰	۳۰	۰	۰	۸۰	۰	۰	۰
۴۰	۲۰	۲۰	۱۰	۱۰	۰	$P_7$	۶۰	۰	۰	۷۰	۰	۰	۰
۰	۳۰	۰	۰	۲۰	۰	۰	$P_8$	۲۰	۲۰	۱۰	۴۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۶۰	۶۰	۰	$P_9$	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	$P_{10}$	۰	۲۰	۰	۰
۲۰	۱۰	۳۰	۰	۰	۱۰	۱۰	۱۰	۰	۰	$P_{11}$	۰	۰	۰
۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۸۰	۰	۰	$P_{12}$	۰	۰
۲۰	۰	۳۰	۲۰	۰	۳۰	۱۰	۱۰	۰	۱۰	۹۰	۰	$P_{13}$	۰
۲۰	۰	۵۰	۳۰	۰	۰	۰	۲۰	۰	۲۰	۵۰	۴۰	۰	$P_{14}$

$P_1$ : سرعت چرخش راس حفار؛  $P_2$ : فاصله‌داری تیغه‌های برشی؛  $P_3$ : نیروی تراست؛  $P_4$ : گشتاور راس حفار؛  $P_5$ : توان

الکتریکی راس حفار؛  $P_6$ : مقاومت تراکمی تک محوره؛  $P_7$ : مقاومت کششی؛  $P_8$ : وجود ناپیوستگی‌ها؛  $P_9$ : هوازدگی؛  $P_{10}$ : جهت ناپیوستگی‌ها با محور تونل؛  $P_{11}$ : شاخص شکنندگی؛  $P_{12}$ : وجود آب زیرزمینی؛  $P_{13}$ : وجود محتوی کوارتز؛  $P_{14}$ : وجود سینه‌کار مختلط.

علاوه بر مقادیر احتمالی کدها که ارایه گردید، مقادیر متوسط کدها نیز محاسبه شده است. در جدول ۶-۶ مقادیر متوسط علت و اثر عوامل ارایه گردیده است.

با توجه به جدول ۶-۶ عامل مقاومت کششی و توان ماشین حفار به ترتیب با مقادیر ۲۶/۵ و ۱۱/۶ بیشترین و کمترین تاثیرگذاری را در سیستم دارند. عامل نیروی تراست و کانی‌های ساینده نیز به ترتیب با مقادیر ۳۳/۵ و ۳ دارای بیشترین و کمترین تاثیرپذیری در سیستم هستند.

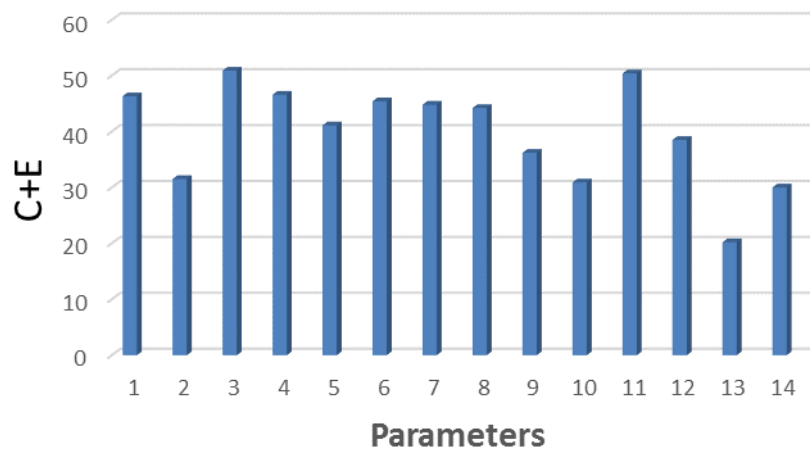
مجموع علت و اثر (C+E) هر عامل تحت عنوان شدت اندرکنش آن عامل مطرح می‌شود، که نشان دهنده اهمیت عامل مذکور در سیستم مورد بررسی است. با استفاده از جدول ۶-۶، شدت اندرکنش متوسط عوامل محاسبه شده است (شکل ۶-۱). همانطور که مشاهده می‌شود، عوامل نیروی تراست، شاخص شکنندگی و گشتاور دارای بیشترین شدت اندرکنش در سیستم هستند. همچنین عوامل کانی‌های ساینده و سینه‌کار مختلط دارای کمترین میزان اندرکنش در سیستم هستند.

نمودار علت-اثر این سیستم با استفاده از مقادیر متوسط کدها در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. غالب بودن یک عامل در سیستم یعنی اثرگذاری عامل مذکور، چه مقدار از اثرپذیری آن در سیستم بیشتر است (یعنی C-E). یک عامل غالب در سیستم، در نمودار علت-اثر نسبت به خط  $C=E$  در سمت محور علت (C) قرار دارد و هر چه عامل غالب‌تر باشد فاصله بیشتری با خط  $C=E$  خواهد داشت. مشابه یک عامل مغلوب در سیستم، در نمودار علت-اثر نسبت به خط  $C=E$  در سمت محور (E) بوده و هر چه عامل مغلوب‌تر باشد در فاصله بیشتری نسبت به خط  $C=E$  قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۶-۲ عامل کانی‌های ساینده و سینه‌کار مختلط، غالب‌ترین عوامل در سیستم هستند.

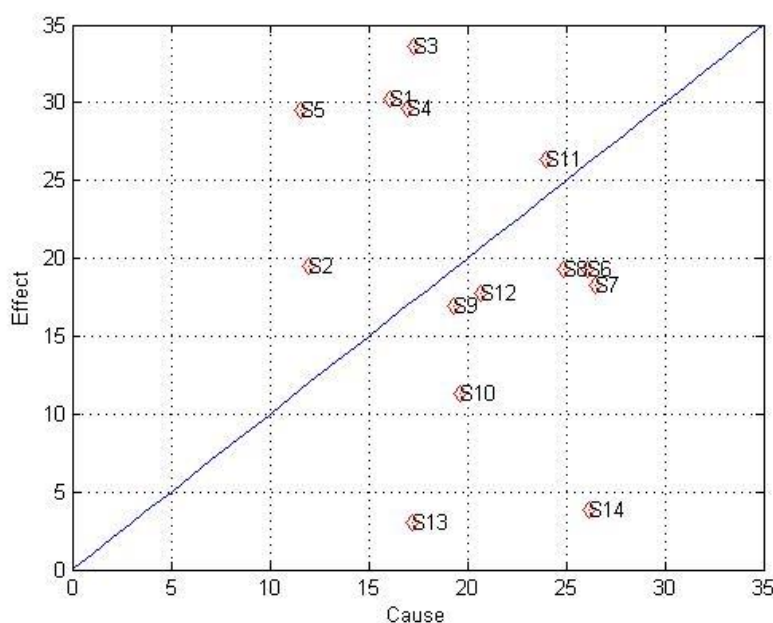
همچنین مغلوب‌ترین عامل در این سیستم توان برشی راس حفار می‌باشد.

جدول ۶-۶: ماتریس اندرکنش متوسط

$P_1$	۱.۵	۲.۳	۳.۱	۳.۵	۱.۲	۰.۶	۰.۸	۰	۰.۹	۱.۲	۱	۰	۰	۱۶.۱
۲.۶	$P_2$	۲.۱	۱.۶	۲.۲	۰.۷	۰.۴	۰.۵	۰	۰.۲	۱.۱	۰.۶	۰	۰	۱۲
۲.۹	۲.۸	$P_3$	۲.۹	۳.۶	۱.۱	۰.۵	۰.۸	۰	۰.۶	۱.۱	۱	۰	۰	۱۷.۳
۳.۲	۲.۳	۳	$P_4$	۴.۱	۰.۹	۰.۶	۰.۶	۰	۰.۶	۰.۶	۰.۹	۰	۰.۲	۱۷
۳.۵	۰.۷	۳.۶	۳.۸	$P_5$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱.۶
۲.۶	۲.۳	۳	۲.۵	۲.۵	$P_6$	۲	۲.۷	۱.۸	۱.۴	۳.۵	۱.۴	۰.۲	۰.۲	۲۶.۱
۲.۹	۲.۴	۲.۷	۲.۲	۲.۶	۱.۸	$P_7$	۳.۱	۱.۸	۱.۶	۳.۴	۱.۶	۰.۲	۰.۲	۲۶.۵
۱.۹	۲.۴	۲	۱.۵	۲.۶	۱.۷	۱.۹	$P_8$	۳	۲.۴	۲.۱	۳	۰.۲	۰.۲	۲۴.۹
۰.۴	۰	۲.۶	۲	۰	۳.۶	۳.۶	۲.۶	$P_9$	۰	۲	۱.۴	۰.۷	۰.۴	۱۹.۳
۱.۶	۱.۶	۲.۳	۱.۹	۱.۵	۱.۱	۱.۲	۱.۴	۱.۹	$P_{10}$	۱.۴	۲.۲	۰.۲	۱.۳	۱۹.۶
۲.۵	۲.۳	۲.۸	۲.۵	۲.۴	۲.۲	۲.۲	۲.۲	۱.۲	۱.۱	$P_{11}$	۱.۶	۰	۰.۹	۲۴
۱.۸	۰.۹	۱.۹	۱.۶	۱.۲	۱.۲	۲.۱	۲.۲	۳.۸	۰.۹	۲.۷	$P_{12}$	۰.۱	۰.۳	۲۰.۷
۱.۴	۰.۳	۲.۱	۱	۰.۸	۲.۵	۱.۶	۰.۴	۲.۲	۰.۴	۳.۹	۰.۵	$P_{13}$	۰.۱	۱۷.۲
۲.۹	۰	۳.۲	۳	۲.۵	۱.۳	۱.۵	۲	۱.۲	۱.۲	۳.۴	۲.۶	۱.۴	$P_{14}$	۲۶.۲
۳۰.۲	۱۹.۵	۳۳.۶	۲۹.۶	۲۹.۵	۱۹.۳	۱۸.۳	۱۹.۳	۱۶.۹	۱۱.۳	۲۶.۴	۱۷.۸	۳	۳.۸	



شکل ۶-۱: شدت اندرکنش عوامل موثر بر نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت

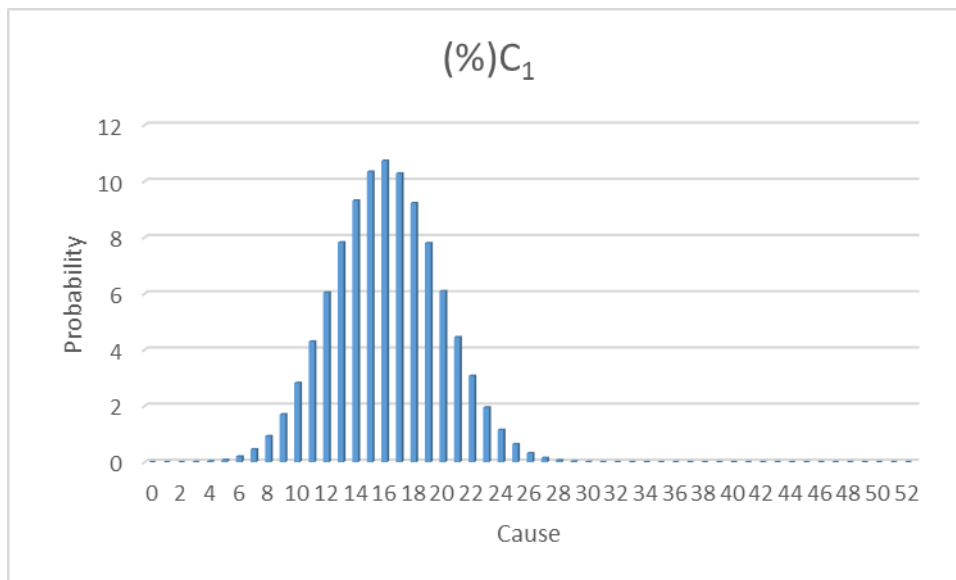


شکل ۶-۲: نمودار علت-اثر عوامل موثر بر نرخ نفوذ TBM در سنگ سخت

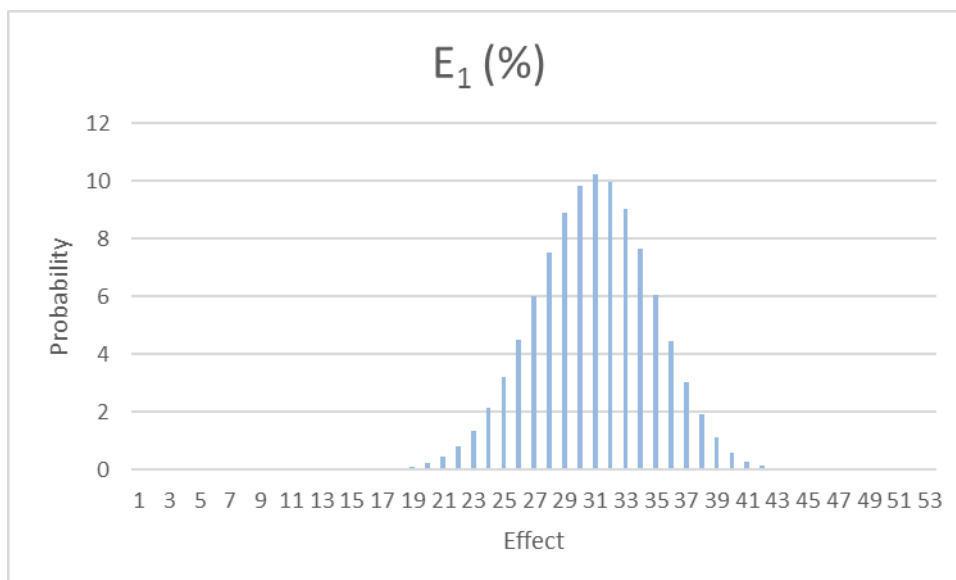
همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، در ماتریس کدگذاری شده با روش ESQ، اثر هر عامل بر روی سیستم و اثر سیستم بر روی هر عامل به ترتیب با مجموع کدهای سطر و ستون هر عامل در ماتریس اندرکنش محاسبه می‌شود. با این حال، در روش کدگذاری PESQ احتمال‌های هر کد در درایه‌های غیر اصلی ماتریس وجود دارد و به این معنی است که در این روش به جای مقادیر قطعی و یکتای  $C_i$  و  $E_i$ ، توزیع‌های احتمال  $C_i$  و  $E_i$  عوامل قابل محاسبه است.

همچنین با استفاده از این توزیع‌ها و بکارگیری قوانین ساده و پایه‌ای احتمالات می‌توان مقادیر محتمل  $C_i$  و  $E_i$  را برای عامل  $P_i$  محاسبه نمود. در ادامه شکل ۶-۳ تا شکل ۶-۱۶ توزیع‌های احتمال را برای علت و اثر عوامل  $P_1$  و  $P_{14}$  نشان می‌دهند. شایان ذکر است به دلیل این که در هر سطر و ستون ۱۳ درایه غیر اصلی با مقادیر اندرکنش صفر تا ۴ وجود دارد. مقادیر توزیع‌های  $C$  و  $E$  مابین صفر و ۵۲ خواهد بود. برای مثال همان‌طور که در نمودارهای شکل ۶-۳ دیده می‌شود، برای عامل سرعت چرخش راس حفار ( $P_1$ )، مقادیر  $C_1$  با احتمال بیش از ۵۰٪ مابین ۱۲ تا ۲۲ خواهد بود، و

همین‌طور مقدار  $E_1$  با احتمال بیش از ۵۰٪ مابین اعداد ۲۶ تا ۳۶ می‌باشد، چنین تحلیلی برای تمام عوامل قابل بیان است.



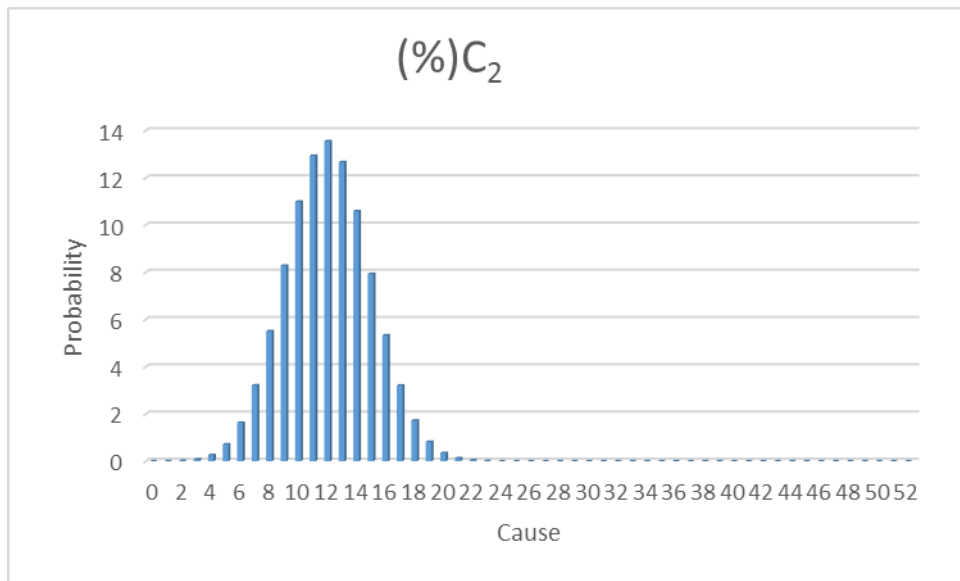
(الف): علت (C)



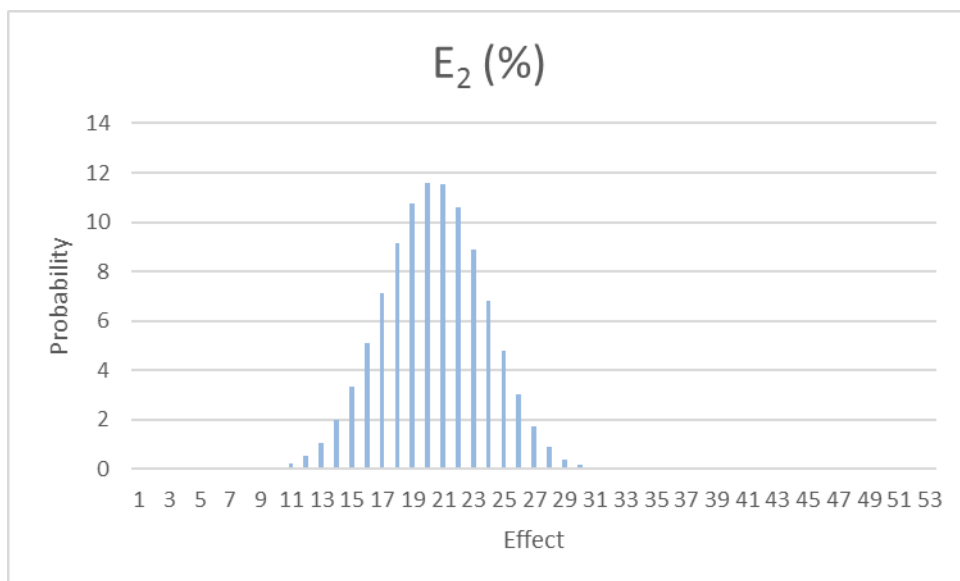
(ب): اثر (E)

شکل ۳-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل (سرعت چرخش پیشانی برشی)



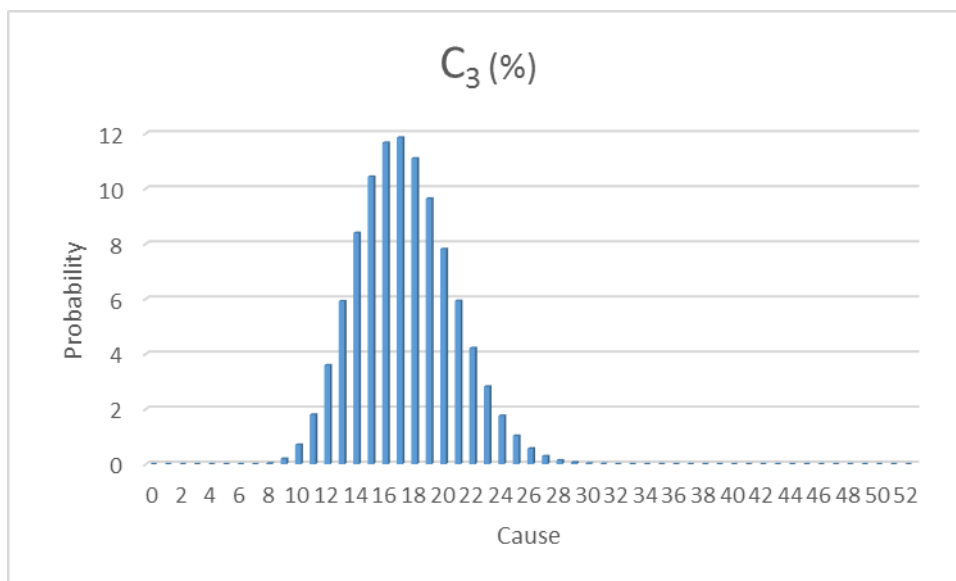


(الف): علت (C)

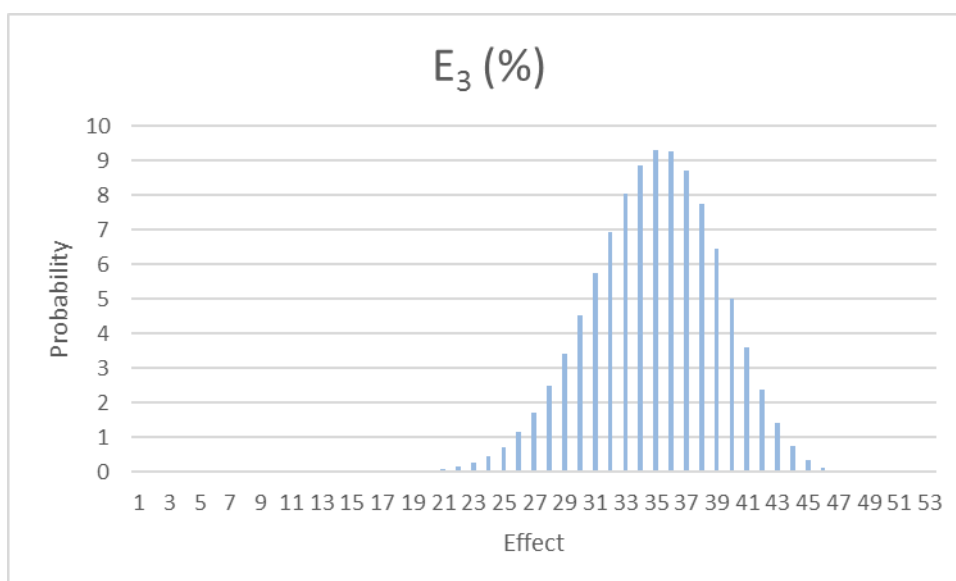


(ب): اثر (E)

شکل ۴-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (فاصله‌داری تیغه‌های برشی)

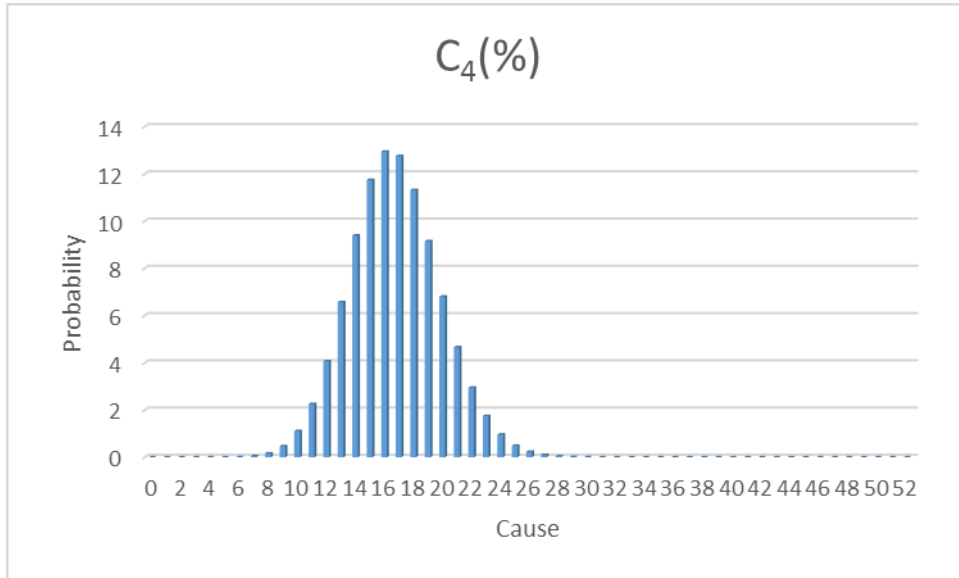


(الف): علت (C)

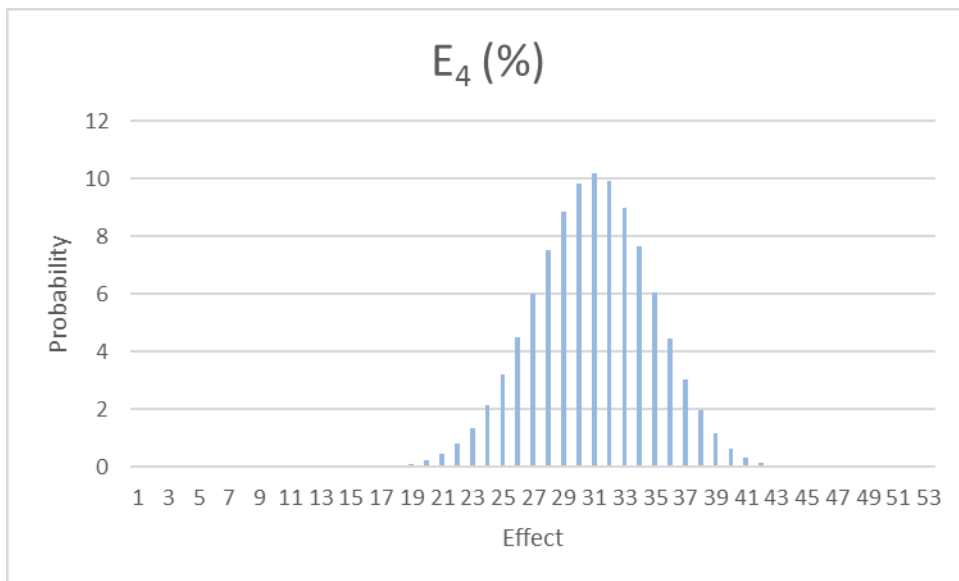


(ب): اثر (E)

شکل ۶-۵: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (نیروی پیشران)

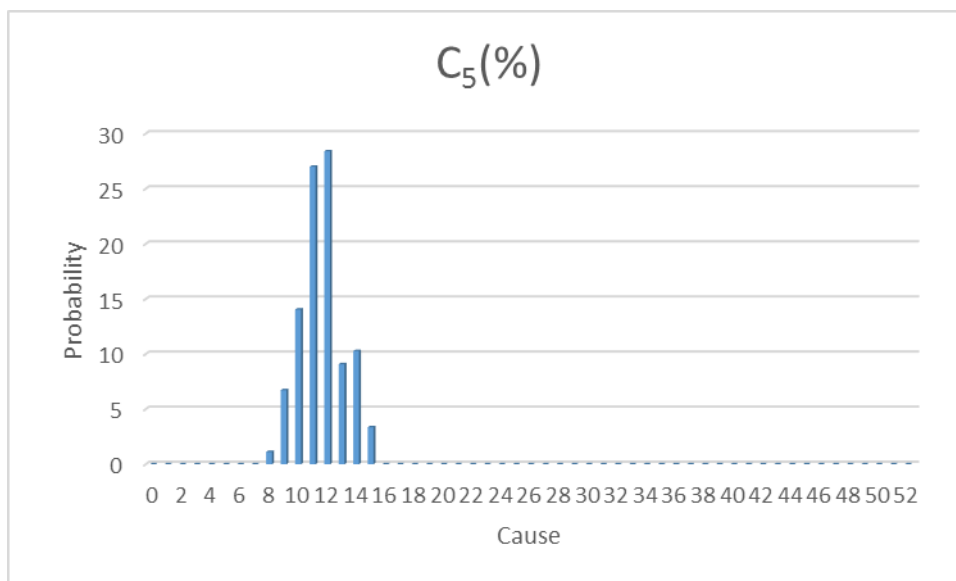


(الف): علت (C)

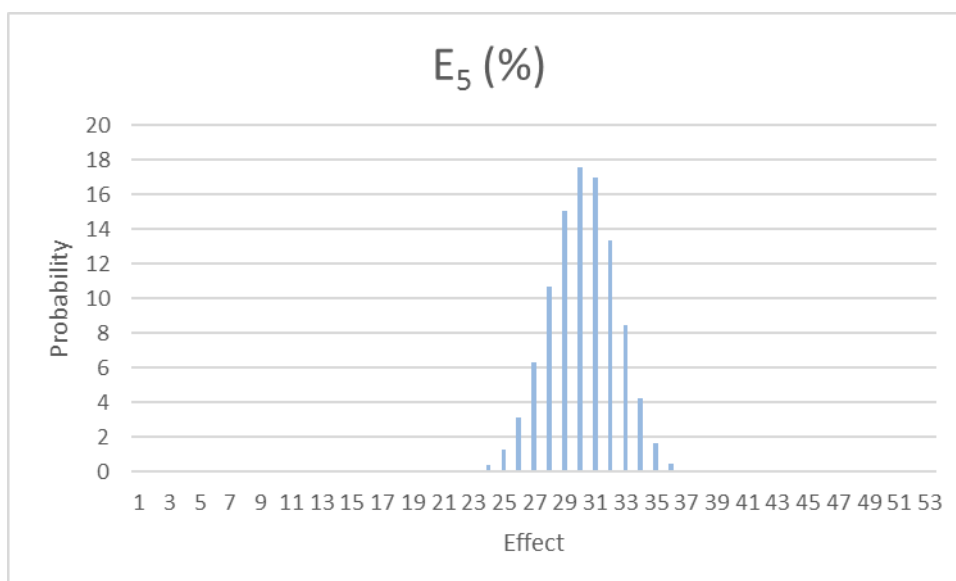


(ب): اثر (E)

شکل ۶-۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (گشتاور)

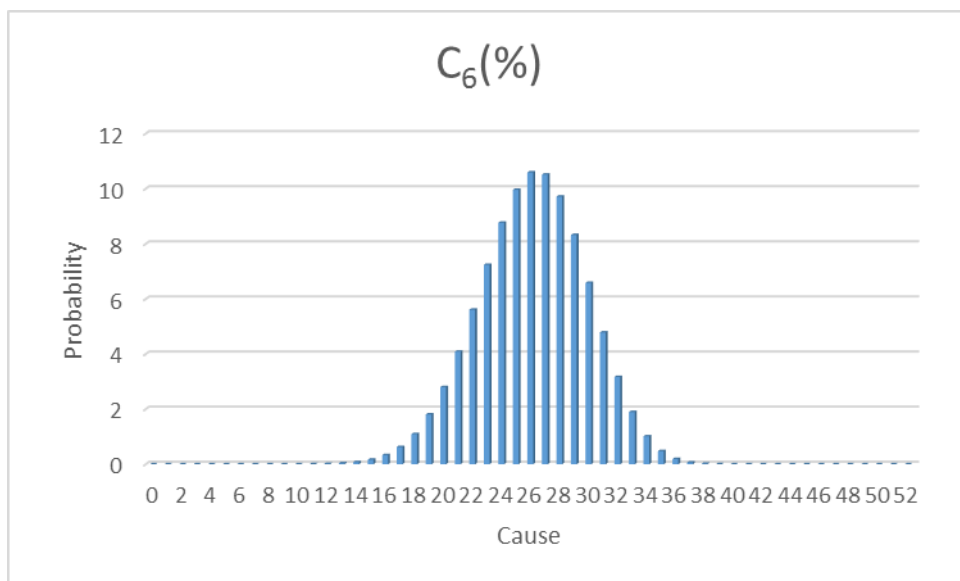


(الف): علت (C)

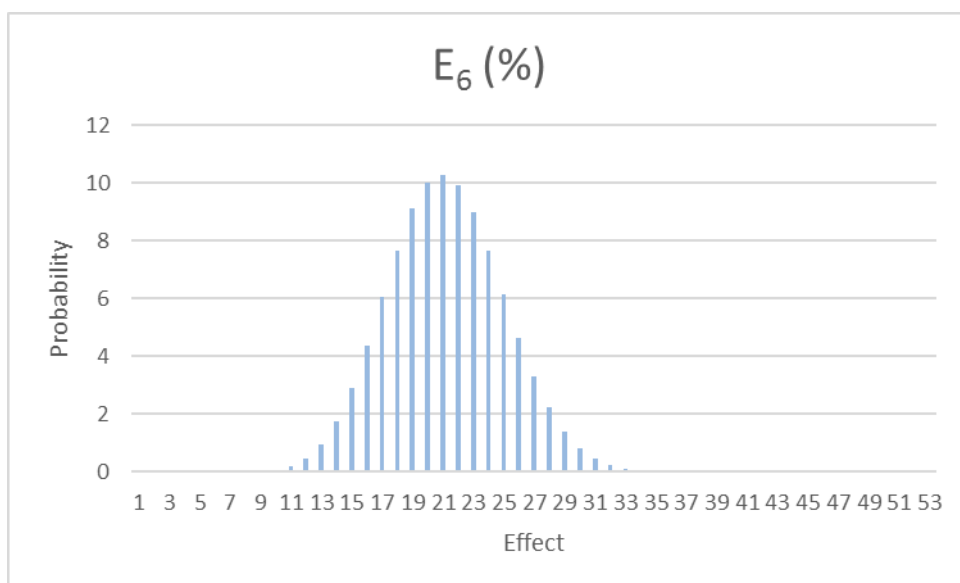


(ب): اثر (E)

شکل ۶-۷: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (توان برشی کله حفار)

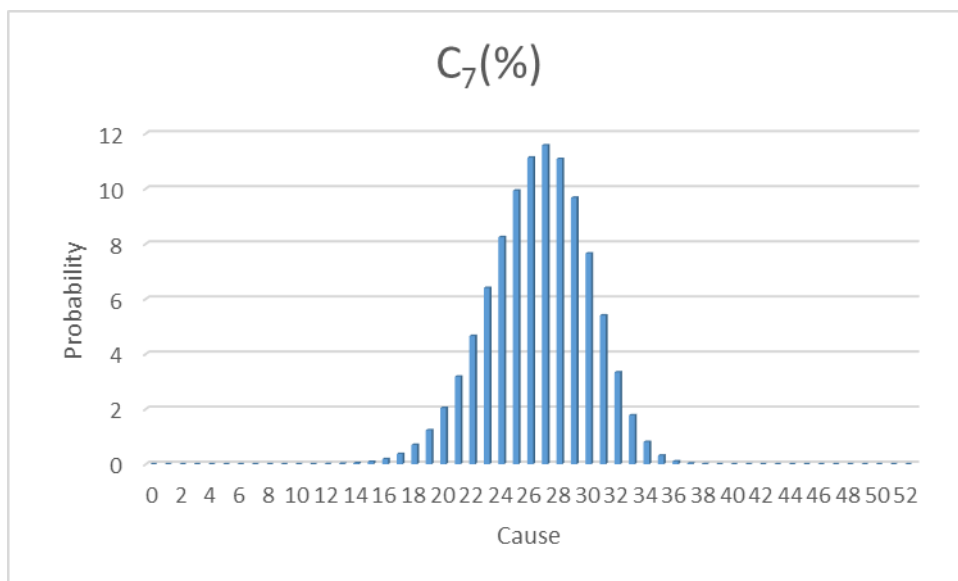


(الف): علت (C)

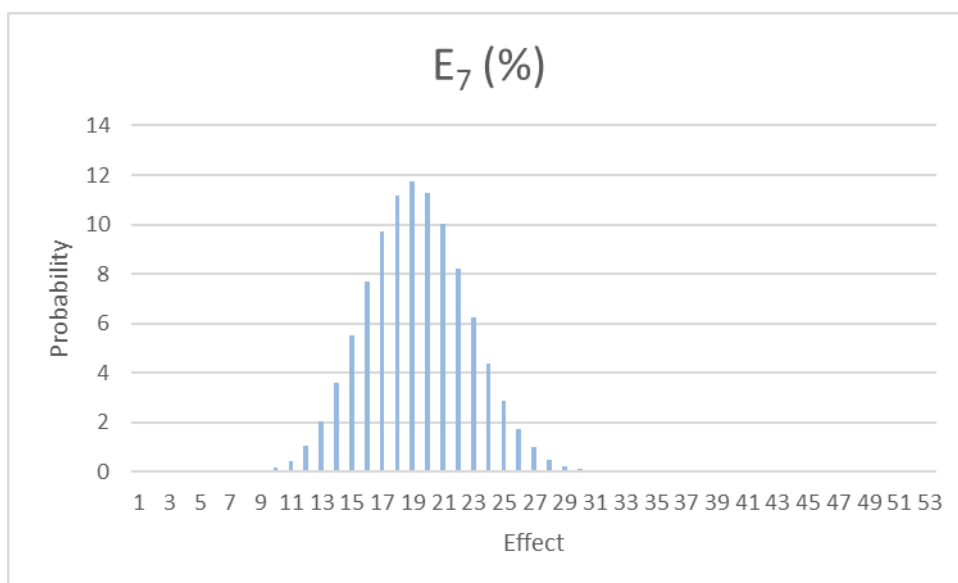


(ب): اثر (E)

شکل ۶-۸: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (مقاومت تراکمی تک محوره)

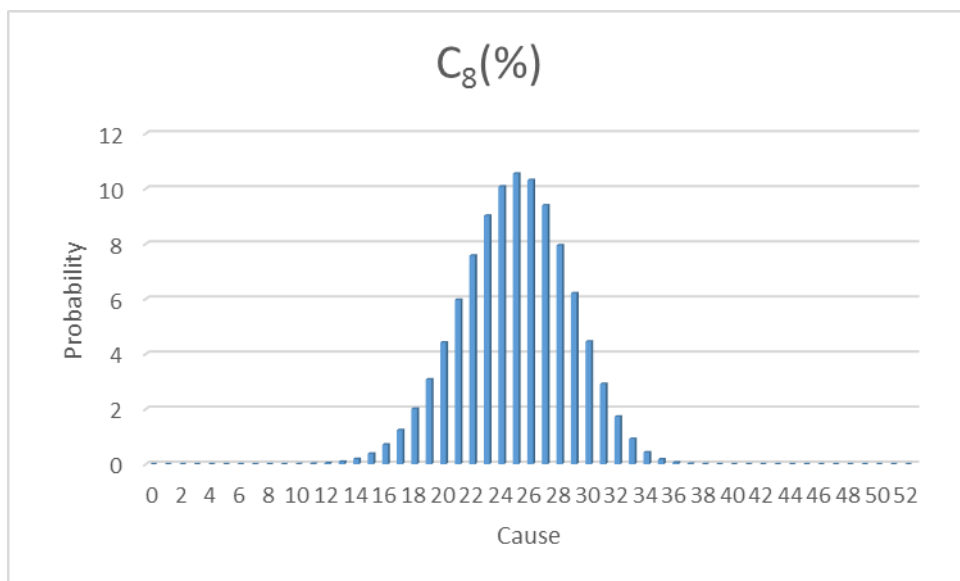


(الف): علت (C)

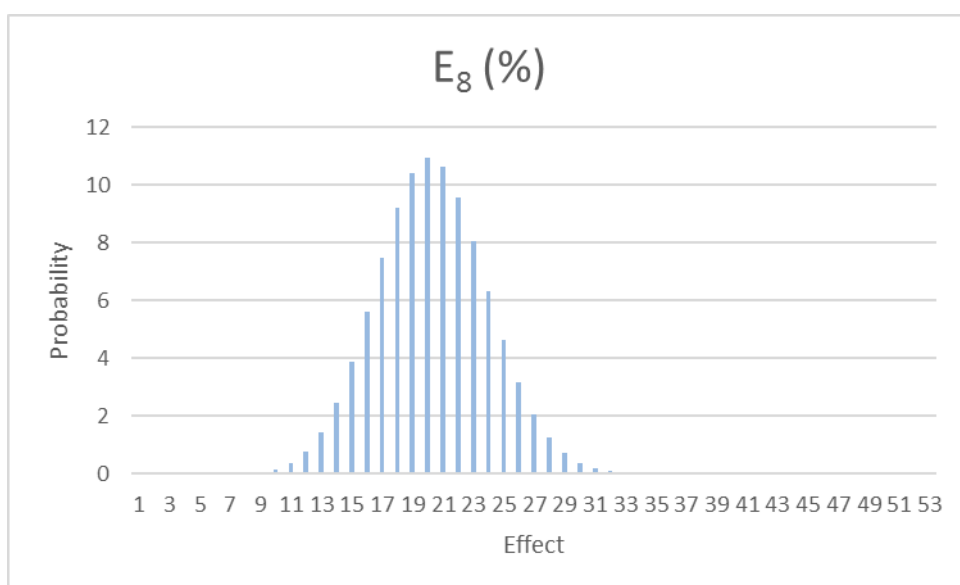


(ب): اثر (E)

شکل ۶-۹: توزیع‌های احتمال‌های علت و اثر عامل (مقاومت کششی)

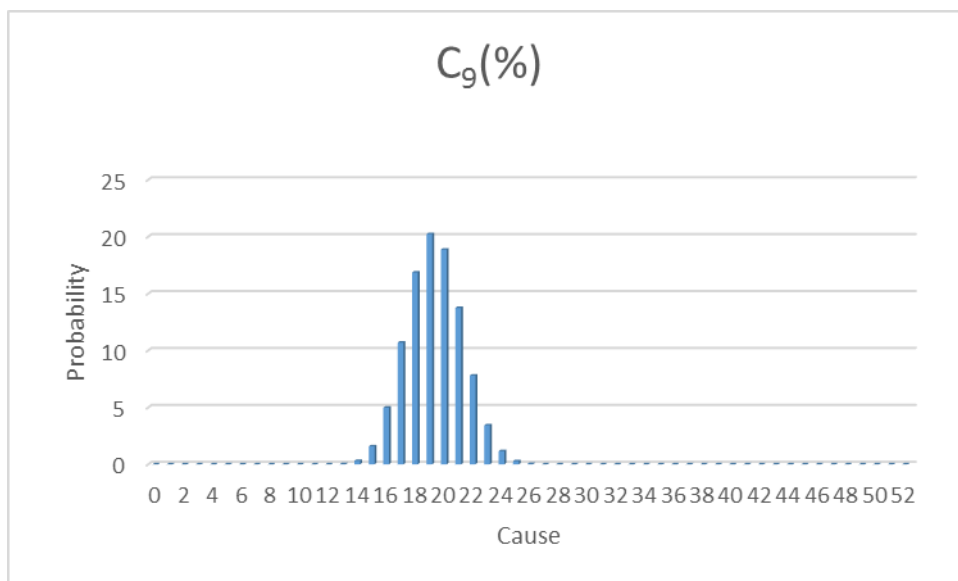


(الف): علت (C)

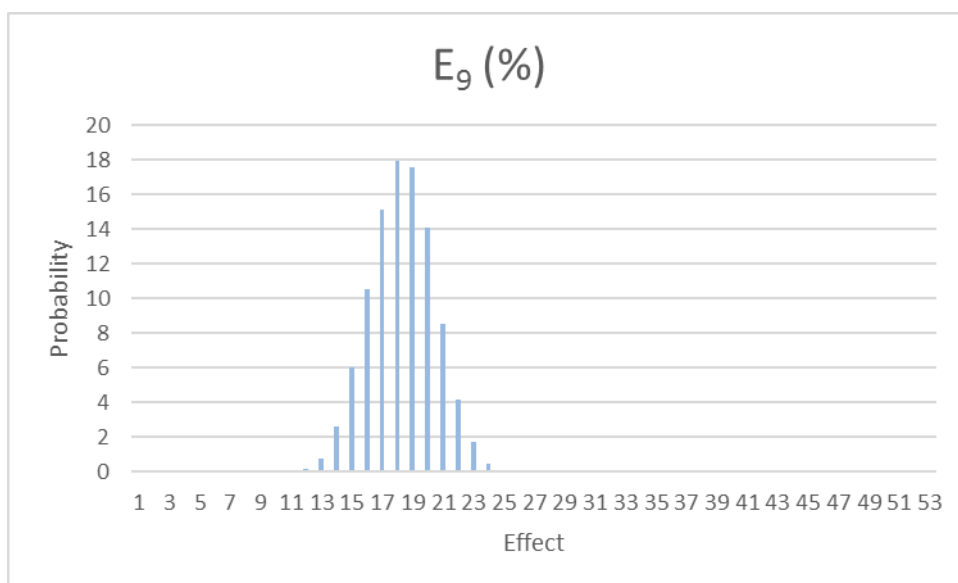


(ب): اثر (E)

شکل ۶-۱۰: توزیع‌های احتمال‌های علت و اثر عامل (تعداد درزه‌ها در واحد حجم)



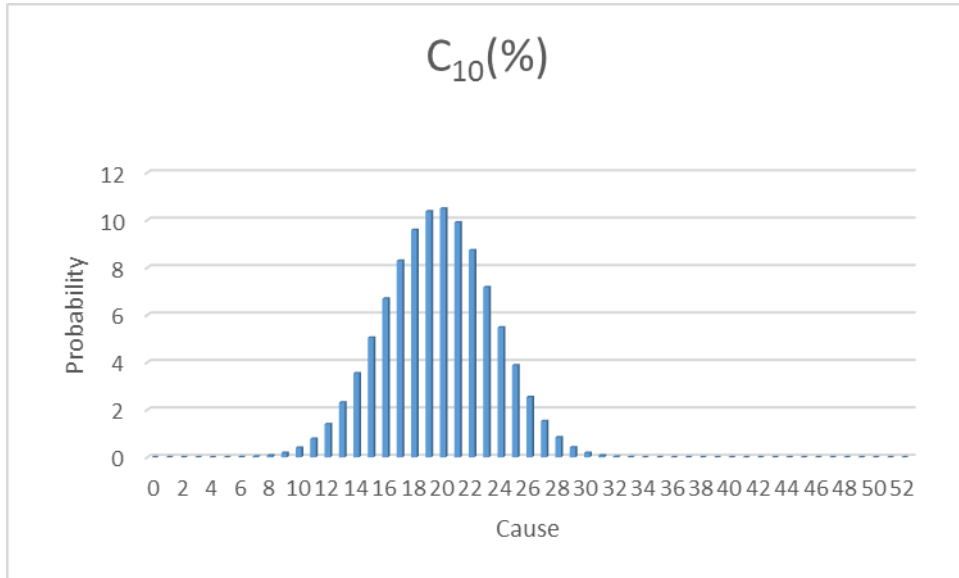
(الف): علت (C)



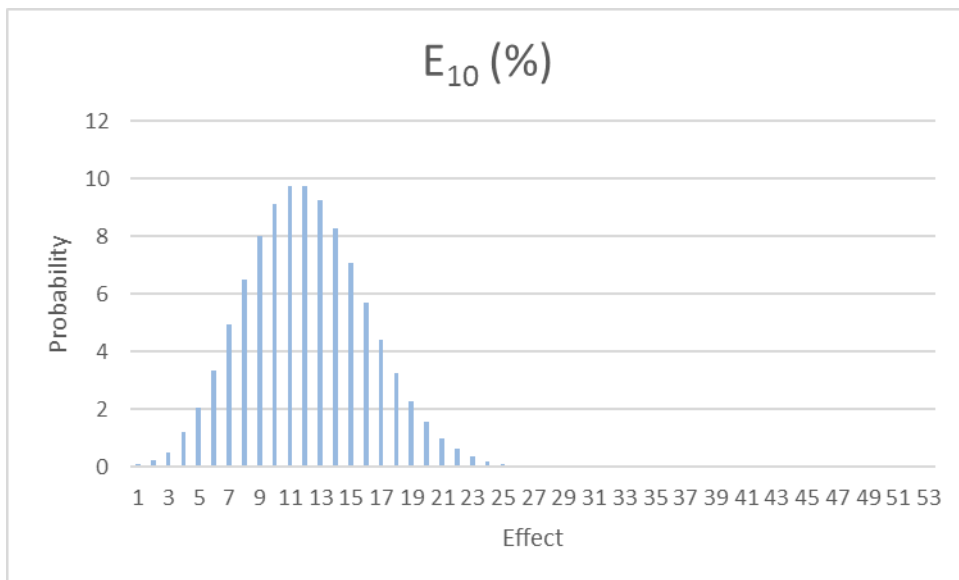
(ب): اثر (E)

شکل ۶-۱۱: توزیع‌های احتمال‌های علت و اثر عامل (درجه هوازدگی)



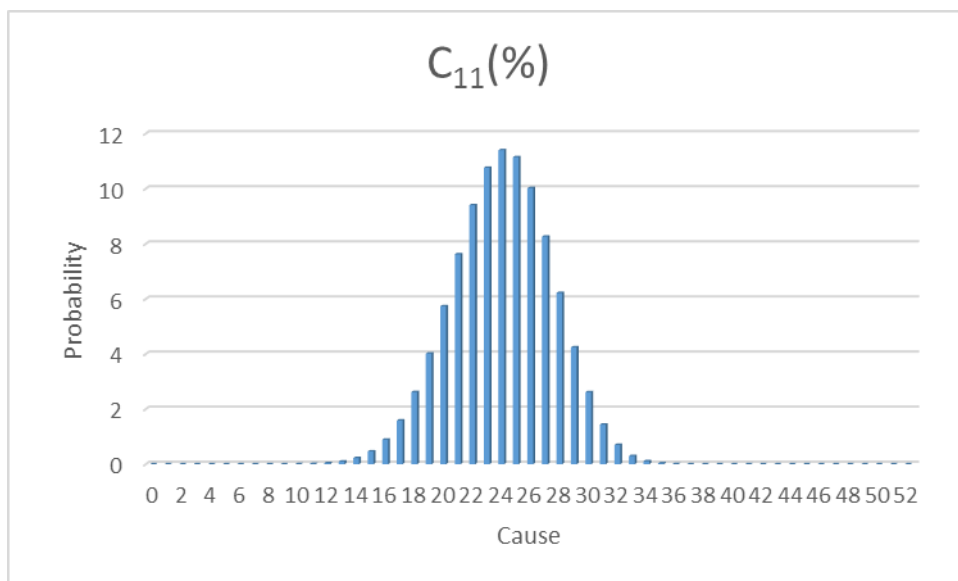


(الف): علت (C)

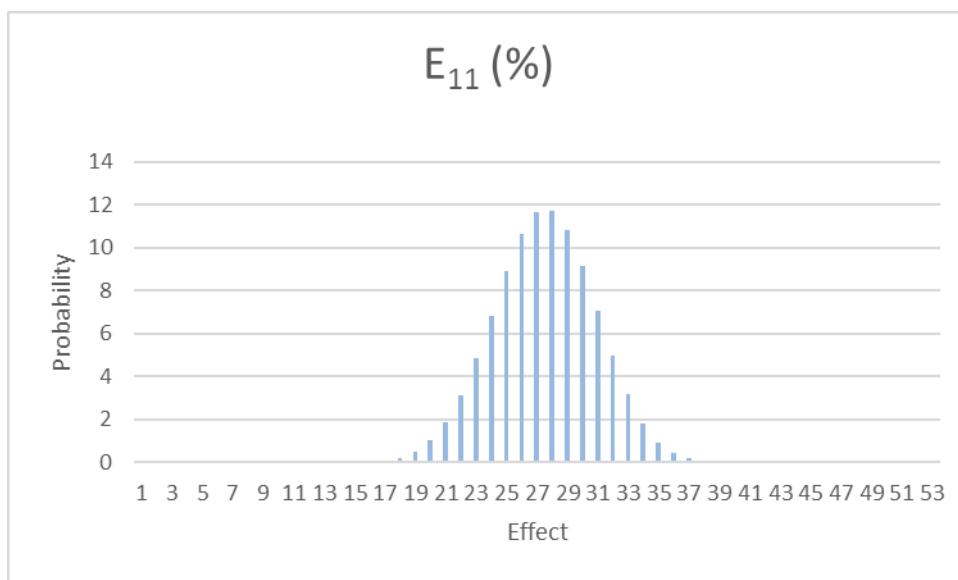


(ب): اثر (E)

شکل ۶-۱۲: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل)

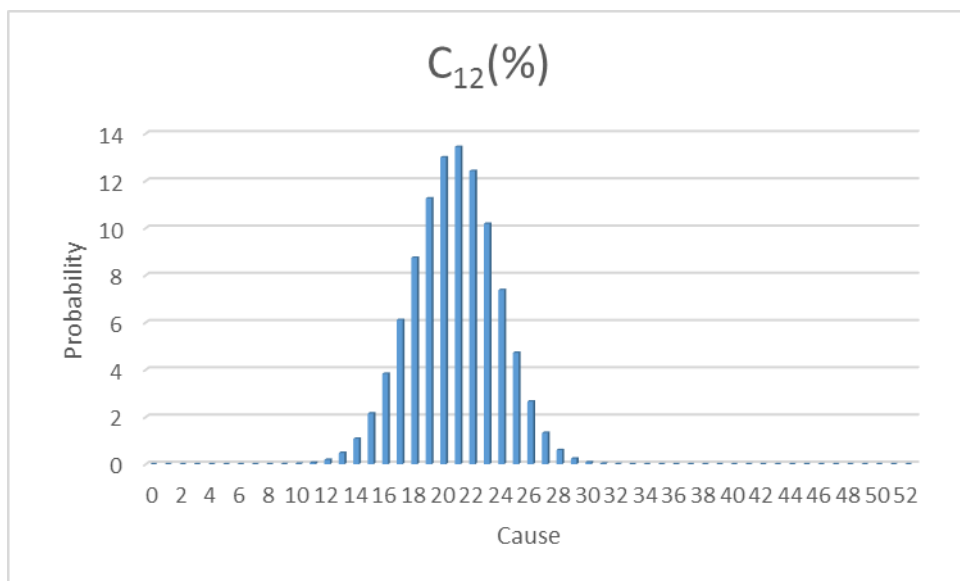


(الف): علت (C)

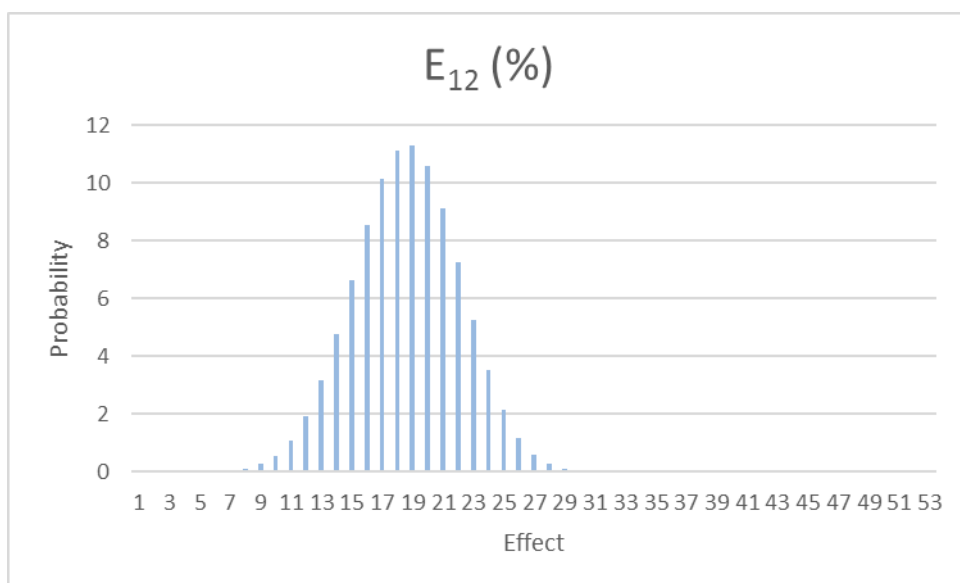


(ب): اثر (E)

شکل ۶-۱۳: توزیع‌های احتمال‌های علت و اثر عامل (شاخص شکنندگی)

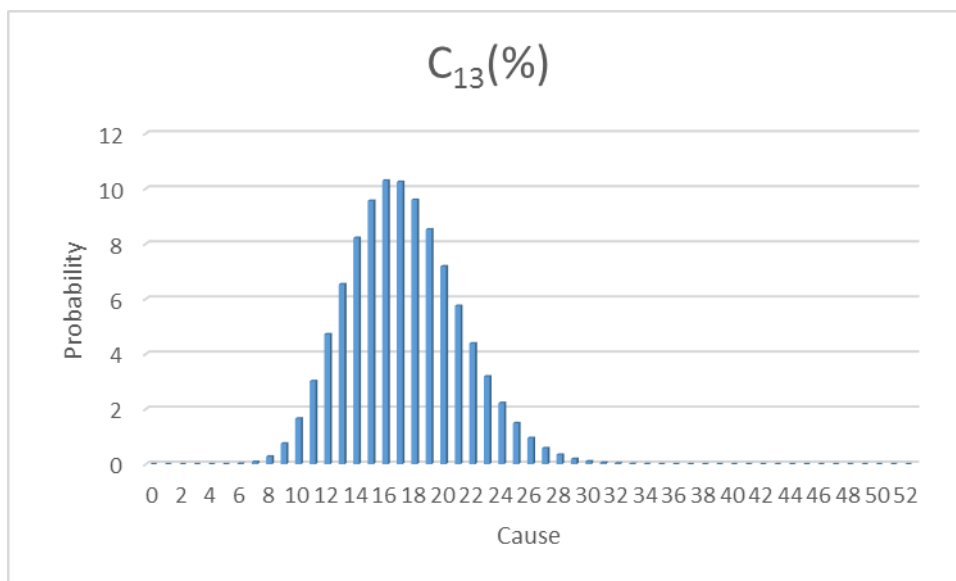


(الف): علت (C)

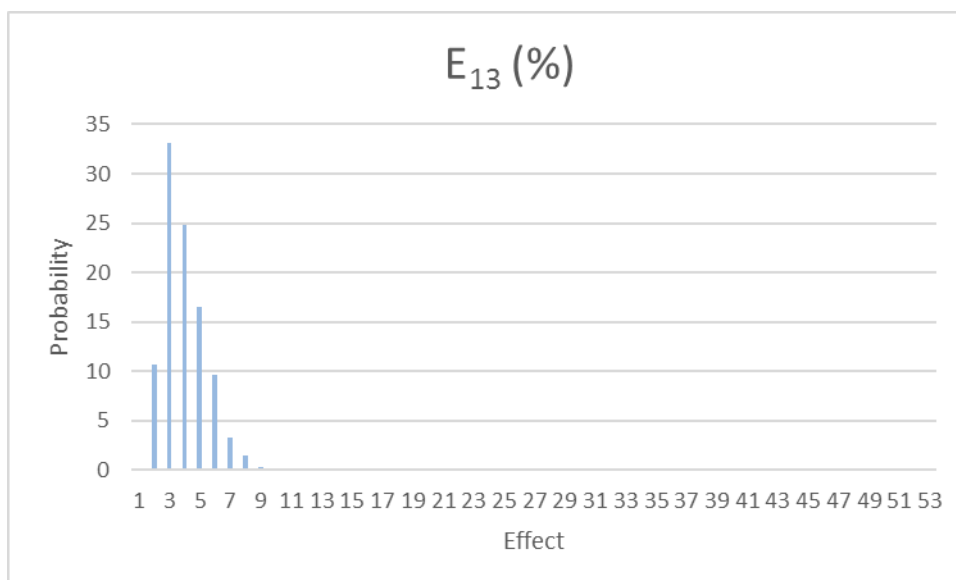


(ب): اثر (E)

شکل ۶-۱۴: توزیع‌های احتمال‌های علت و اثر عامل (جریان آب زیرزمینی)

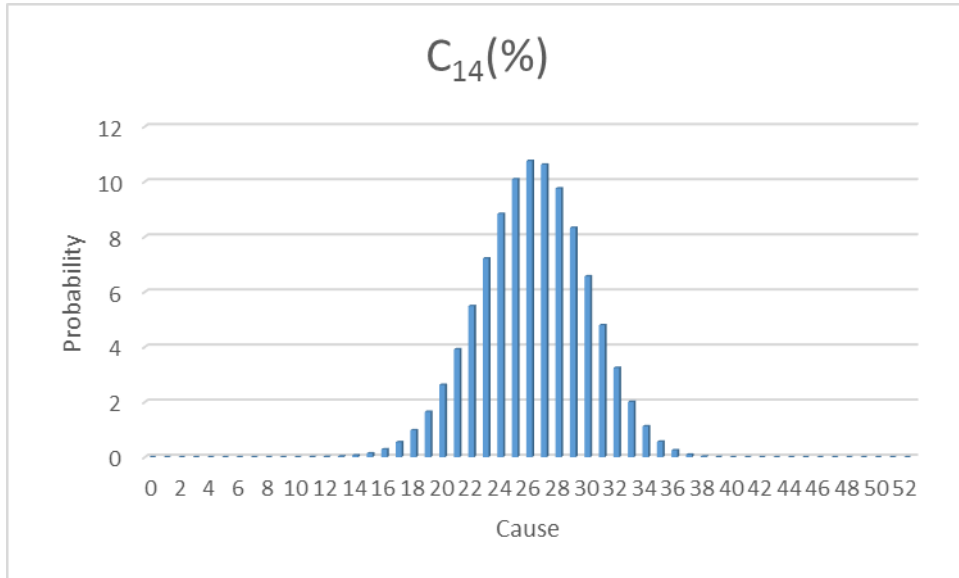


(الف): علت (C)

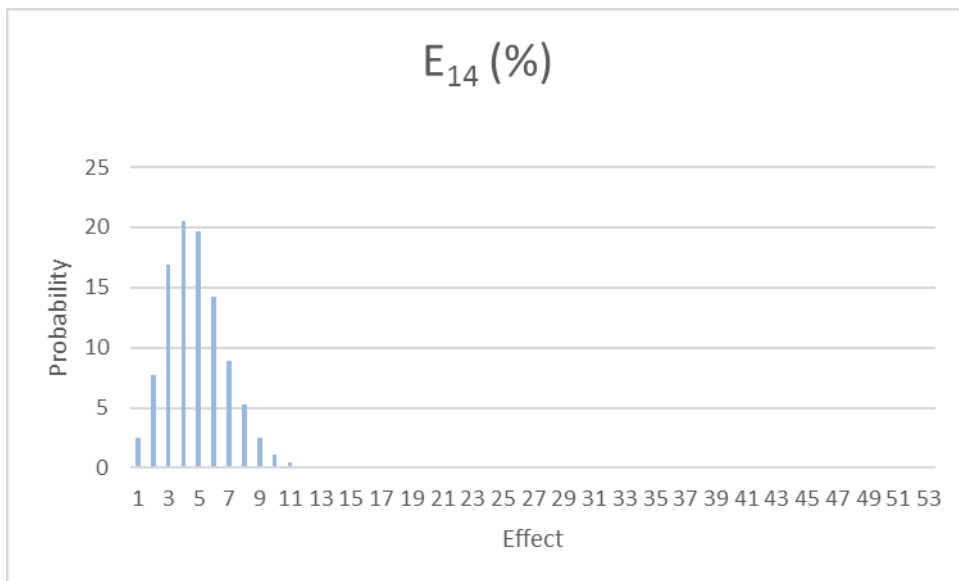


(ب): اثر (E)

شکل ۶-۱۵: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (محتوی کوارتز)



(الف): علت (C)



(ب): اثر (E)

شکل ۶-۱۶: توزیع‌های احتمال علت و اثر عامل (سینه کار مختلط)

## ۶-۲-۲- تعیین وزن عوامل

شدت اندرکنش هر عامل در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ، مجموع علت و اثر (C+E) آن عامل است. مقادیر توزیع‌های  $C_i$  و  $E_i$  در این پژوهش مابین صفر و ۵۲ است، بنابراین مقادیر توزیع‌های  $C_i+E_i$  از صفر تا ۱۰۴ خواهد بود. شدت اندرکنش هر عامل، بیانگر اهمیت عامل مذکور در سیستم مورد بررسی است. در نتیجه مطابق رابطه‌ی (۶-۱)، مقدار درصد شدت اندرکنش عوامل به عنوان ضریب وزن آن‌ها در مساله در نظر گرفته می‌شود (Mazzoccola, et al., ۱۹۹۶).

$$a_i = \frac{(C_i + E_i)}{\sum_i (C_i + E_i)} (\%) \quad (۶-۱)$$

در این رابطه  $C_i$  و  $E_i$  به ترتیب علت و اثر عامل  $i$  ام و  $i$  شمارنده عامل است. بدیهی است  $a_i$  مقداری بین صفر تا یک به خود اختصاص می‌دهد. مقادیر متوسط شدت اندرکنش عوامل در پژوهش حاضر، در شکل ۶-۱ ارایه گردید. با توجه به این که روش محاسباتی در نظر گرفته شده برای پژوهش حاضر به صورت احتمالاتی است. از مقادیر شدت اندرکنش احتمالی در محاسبات استفاده شده است. علت اصلی استفاده از وزن احتمالی برای عوامل، کاهش خطای قضاوت مهندسی کارشناسان در تعیین اندرکنش عوامل است. بنابراین صورت رابطه‌ی (۶-۱)، یک توزیع احتمال است. مخرج این کسر نیز یک توزیع احتمال بوده ولی با توجه به این که تنها در حالتی می‌توان دو توزیع احتمال را بر هم تقسیم نمود که مستقل از یکدیگر باشند و در این رابطه صورت بخشی از مخرج است، برای مخرج این کسر، مقدار متوسط مجموع علت‌ها و اثرها در نظر گرفته شده است. این مقدار متوسط در پژوهش حاضر ۲۷۸/۵ در نظر گرفته شده است. بنابراین در این مساله برای تعیین وزن هر یک از عوامل به صورت احتمالی ( $a_i$ )، مقدار توزیع احتمال شدت اندرکنش ( $C_i+E_i$ ) مربوطه محاسبه گردیده و بر مقدار ۲۷۸/۵ تقسیم شده است (شکل ۶-۱ تا ۶-۳۰). به عنوان مثال، وزن عامل سرعت چرخش راس حفار ( $a_1$ ) که از شدت اندرکنش آن در سیستم ( $C_1+E_1$ ) محاسبه شده است، در جدول ۶-۷ مشاهده می‌شود. بدیهی است که تفاوت دو توزیع  $C_i+E_i$  و  $a_i$  در مقادیر آن‌هاست (محور افقی

نمودارها)، در حالی که شکل توزیع با توجه به ثابت بودن احتمالات (محور عمودی نمودارها) تغییری نمی‌کند.

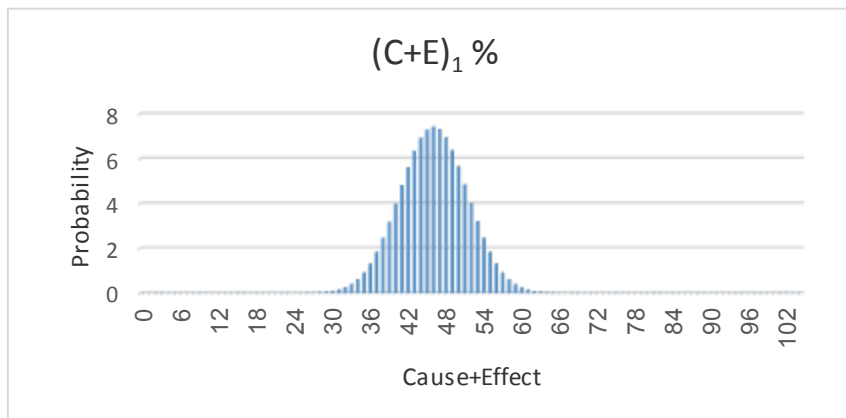
جدول ۶-۷: شدت اندرکنش و وزن عامل سرعت چرخش پیشانی برشی

احتمال	وزن عامل (a1)	شدت اندرکنش (C1+E1)	احتمال	وزن عامل (a1)	شدت اندرکنش (C1+E1)
۰	۰	۰	۱/۳۱۵۴	۰/۱۲۹۳	۳۶
۰	۰/۰۰۳۶	۱	۱/۸۲۶۴	۰/۱۳۲۹	۳۷
۰	۰/۰۰۷۲	۲	۲/۴۴۹۶	۰/۱۳۶۴	۳۸
۰	۰/۰۱۰۸	۳	۳/۱۷۳۷	۰/۱۴	۳۹
۰	۰/۰۱۴۴	۴	۳/۹۷۲۵	۰/۱۴۳۶	۴۰
۰	۰/۰۱۸	۵	۴/۸۰۴۲	۰/۱۴۷۲	۴۱
۰	۰/۰۲۱۵	۶	۵/۶۱۳۷	۰/۱۵۰۸	۴۲
۰	۰/۰۲۵۱	۷	۶/۳۳۷۹	۰/۱۵۴۴	۴۳
۰	۰/۰۲۸۷	۸	۶/۹۱۳۹	۰/۱۵۸	۴۴
۰	۰/۰۳۲۳	۹	۷/۲۸۷۴	۰/۱۶۱۶	۴۵
۰	۰/۰۳۵۹	۱۰	۷/۴۲۱۴	۰/۱۶۵۲	۴۶
۰	۰/۰۳۹۵	۱۱	۷/۳۰۱۹	۰/۱۶۸۸	۴۷
۰	۰/۰۴۳۱	۱۲	۶/۹۴۰۶	۰/۱۷۲۴	۴۸
۰	۰/۰۴۶۷	۱۳	۶/۳۷۲۹	۰/۱۷۵۹	۴۹
۰	۰/۰۵۰۳	۱۴	۵/۶۵۲۱	۰/۱۷۹۵	۵۰
۰	۰/۰۵۳۹	۱۵	۴/۸۴۱۱	۰/۱۸۳۱	۵۱
۰	۰/۰۵۷۵	۱۶	۴/۰۰۳۸	۰/۱۸۶۷	۵۲
۰	۰/۰۶۱	۱۷	۳/۱۹۶۷	۰/۱۹۰۳	۵۳
۰	۰/۰۶۴۶	۱۸	۲/۴۶۳۳	۰/۱۹۳۹	۵۴
۰	۰/۰۶۸۲	۱۹	۱/۸۳۱۴	۰/۱۹۷۵	۵۵
۰	۰/۰۷۱۸	۲۰	۱/۳۱۳۱	۰/۲۰۱۱	۵۶
۰/۰۰۰۱	۰/۰۷۵۴	۲۱	۰/۹۰۷۶	۰/۲۰۴۷	۵۷
۰/۰۰۰۳	۰/۰۷۹	۲۲	۰/۶۰۴۴	۰/۲۰۸۳	۵۸
۰/۰۰۰۷	۰/۰۸۲۶	۲۳	۰/۳۸۷۵	۰/۲۱۱۸	۵۹
۰/۰۰۱۵	۰/۰۸۶۲	۲۴	۰/۲۳۹	۰/۲۱۵۴	۶۰
۰/۰۰۳۳	۰/۰۸۹۸	۲۵	۰/۱۴۱۷	۰/۲۱۹	۶۱
۰/۰۰۶۹	۰/۰۹۳۴	۲۶	۰/۰۸۰۷	۰/۲۲۲۶	۶۲
۰/۰۱۳۸	۰/۰۹۶۹	۲۷	۰/۰۴۴	۰/۲۲۶۲	۶۳
۰/۰۲۶۶	۰/۱۰۰۵	۲۸	۰/۰۲۳	۰/۲۲۹۸	۶۴
۰/۰۴۹۲	۰/۱۰۴۱	۲۹	۰/۰۱۱۵	۰/۲۳۳۴	۶۵
۰/۰۸۷۶	۰/۱۰۷۷	۳۰	۰/۰۰۵۵	۰/۲۳۷	۶۶
۰/۱۵۰۵	۰/۱۱۱۳	۳۱	۰/۰۰۲۵	۰/۲۴۰۶	۶۷
۰/۲۴۹۳	۰/۱۱۴۹	۳۲	۰/۰۰۱۱	۰/۲۴۴۲	۶۸
۰/۳۹۸۴	۰/۱۱۸۵	۳۳	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴۷۸	۶۹
۰/۶۱۴۵	۰/۱۲۲۱	۳۴	۰/۰۰۰۲	۰/۲۵۱۳	۷۰
۰/۹۱۴۹	۰/۱۲۵۷	۳۵	۰/۰۰۰۱	۰/۲۵۴۹	۷۱

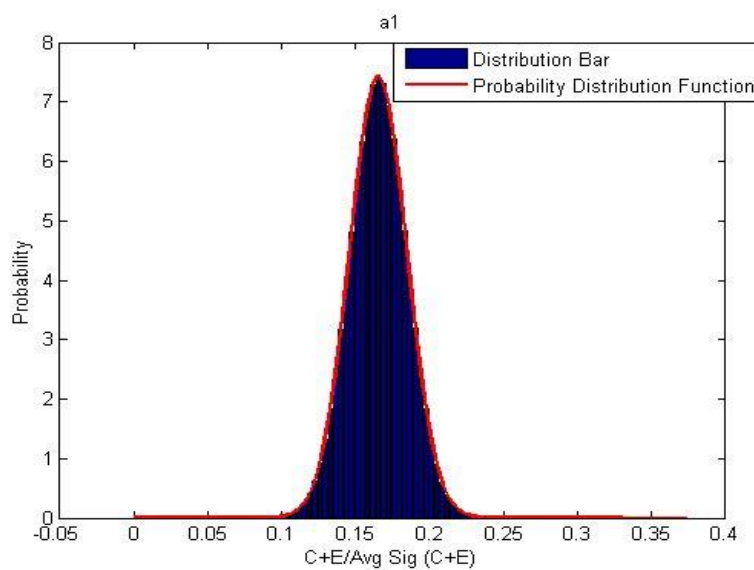
با توجه به آن که مقادیر بعد از ۷۱ دارای احتمال صفر می‌باشند از آوردن مقادیر آن‌ها در



جدول خودداری شده است. در شکل‌های زیر نمودارهای مربوط به شدت اندرکنش و وزن عوامل نشان داده شده است. در شکل‌های زیر توزیع‌های احتمال عامل شدت اندرکنش و وزن عوامل نشان داده شده است (شکل‌های ۶-۱۷ تا ۳۰-۶).

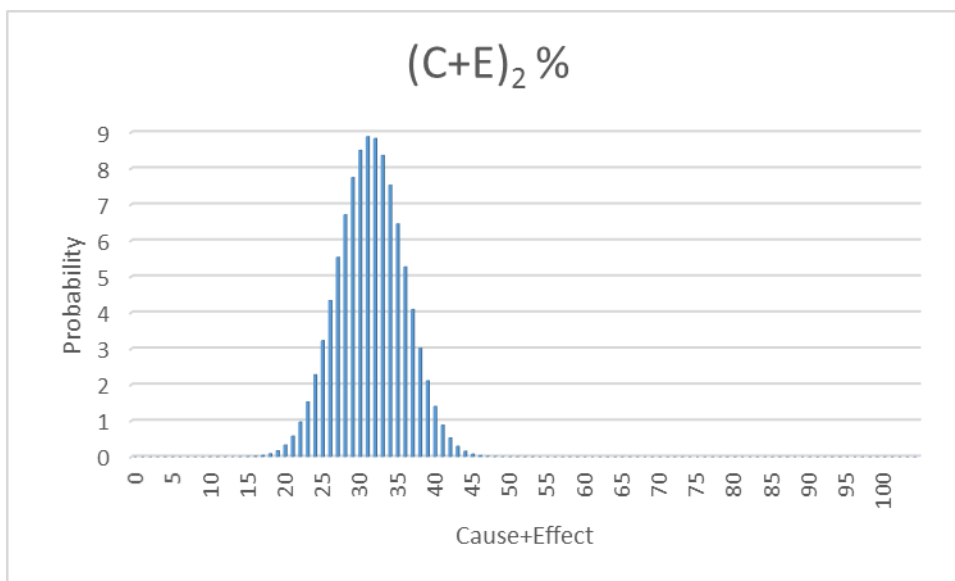


(الف)

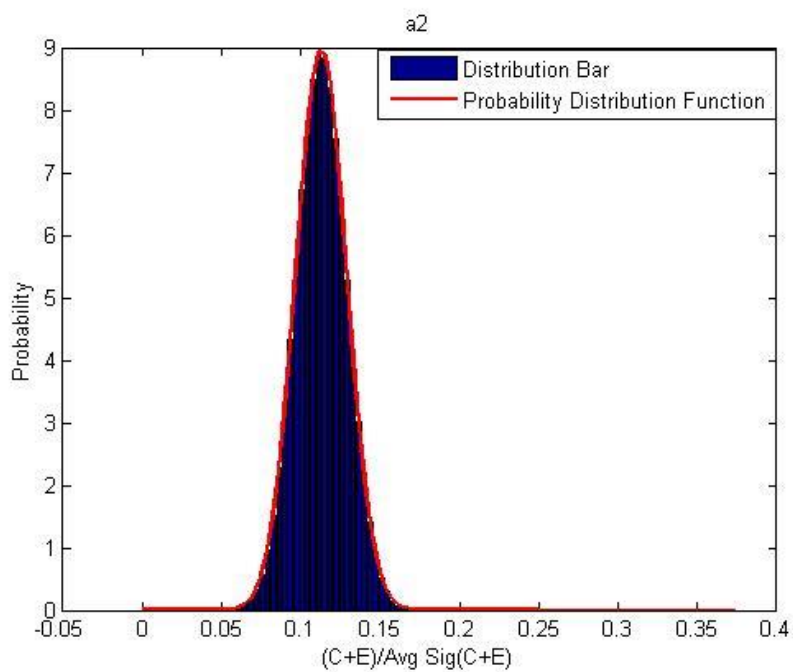


(ب)

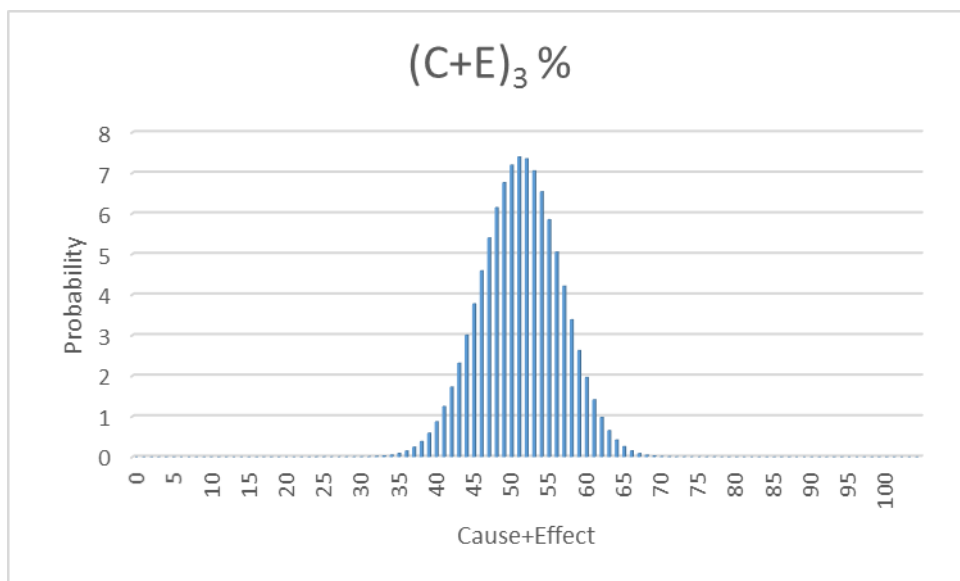
شکل ۶-۱۷: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_1)$  برای عامل سرعت چرخش



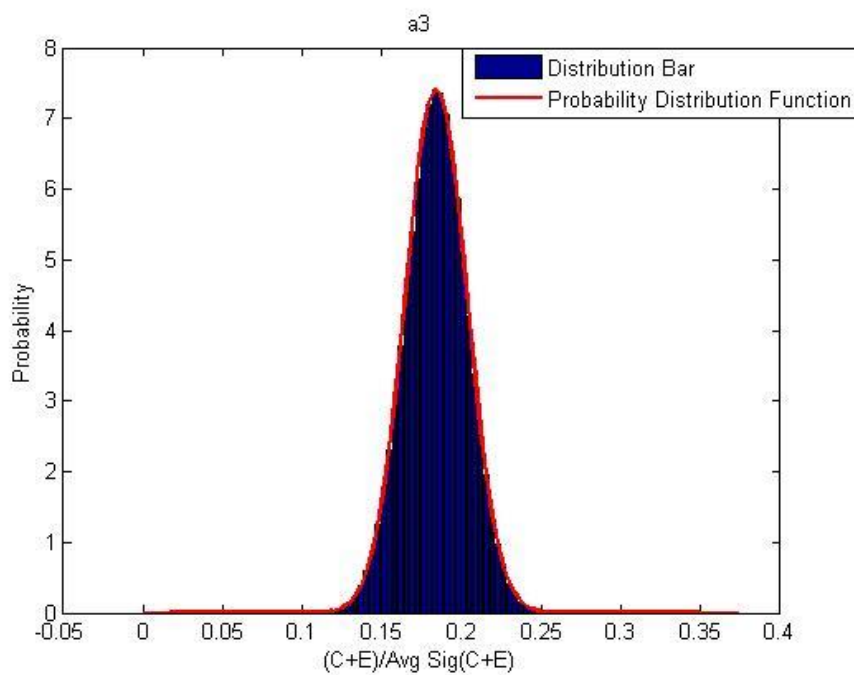
(الف)



شکل ۶-۱۸: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_2)$  برای عامل فاصله‌داری تیغه‌های برشی

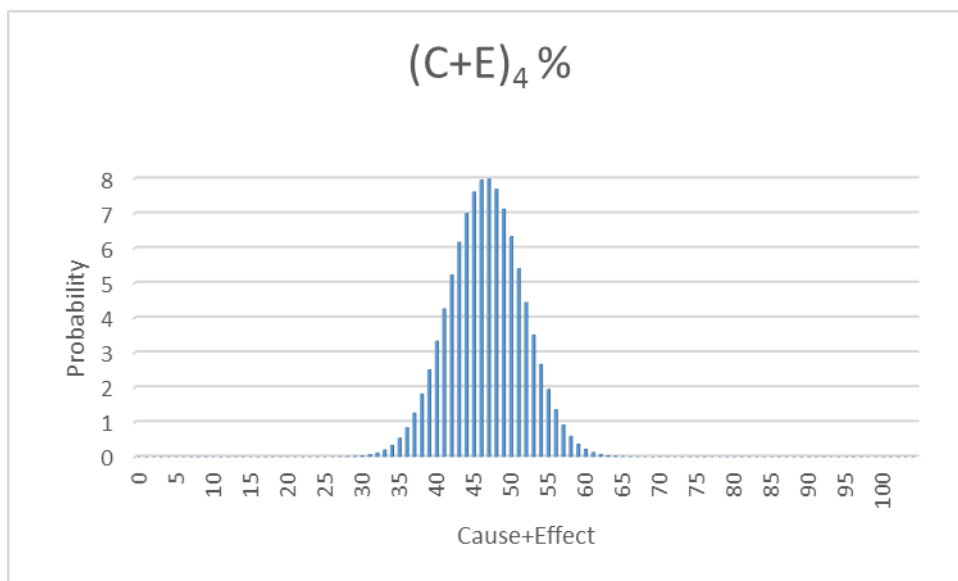


(الف)

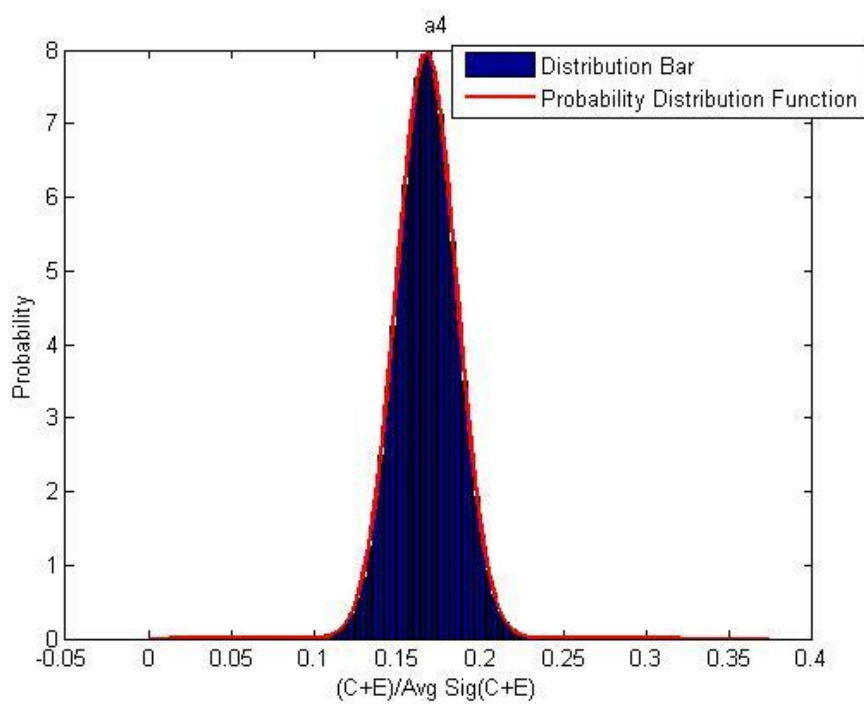


(ب)

شکل ۶-۱۹: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_3)$  برای عامل نیروی پیشران

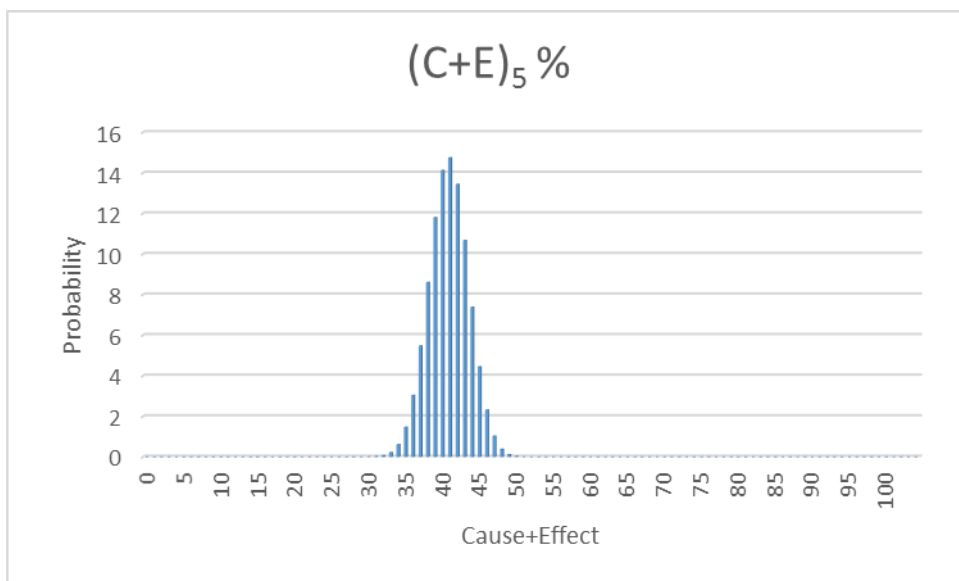


(الف)

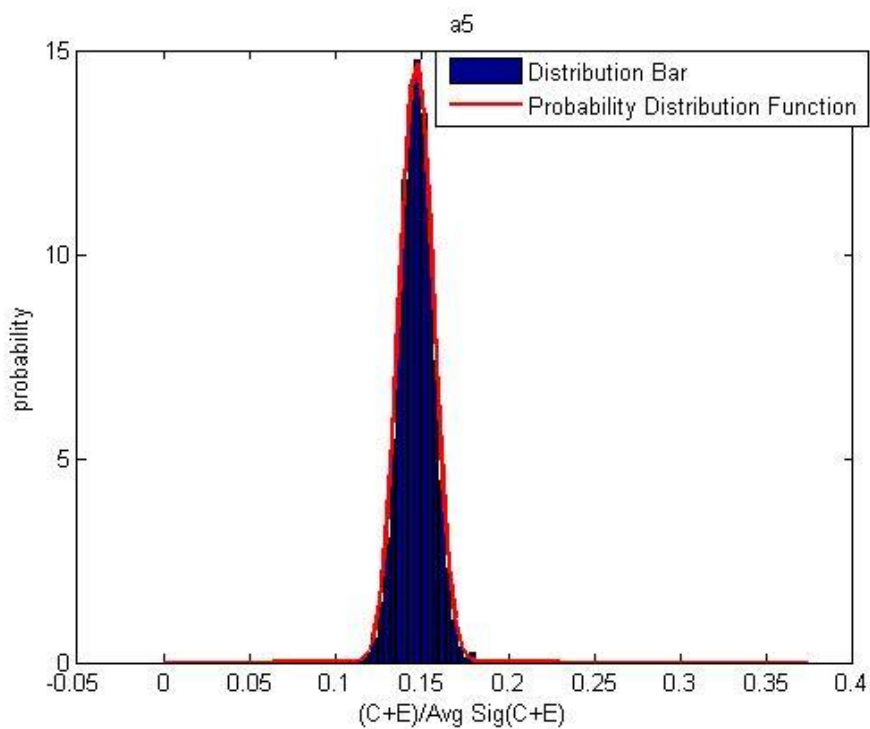


(ب)

شکل ۶-۲۰: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_4)$  برای عامل گشتاور

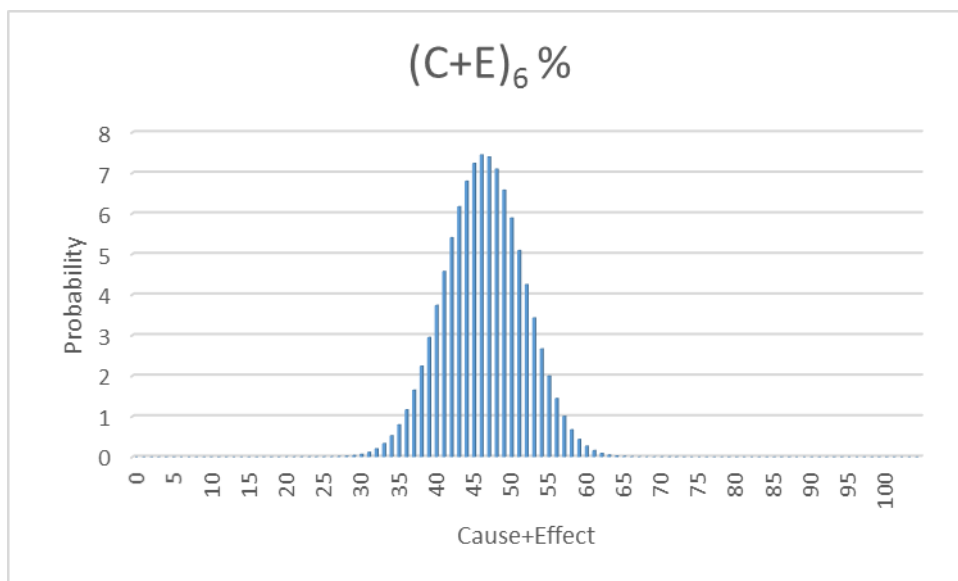


(الف)

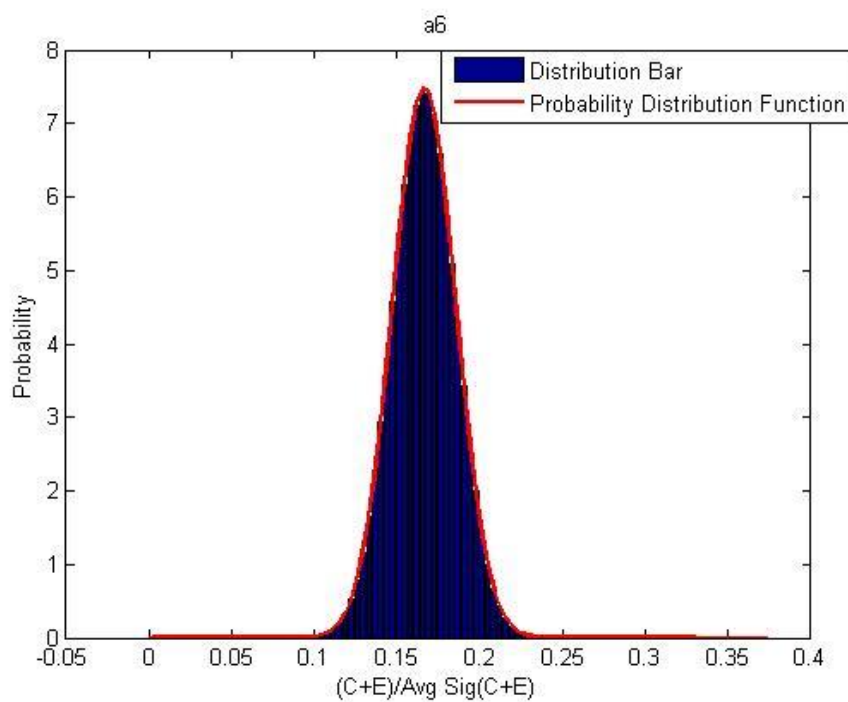


(ب)

شکل ۶-۲۱: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (a<sub>5</sub>) برای عامل توان پیشانی برشی

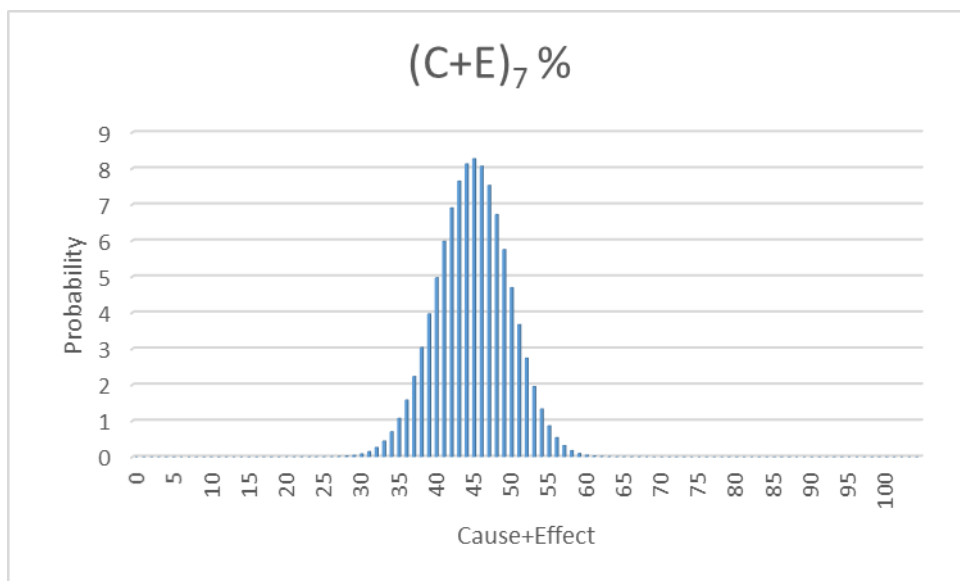


(الف)

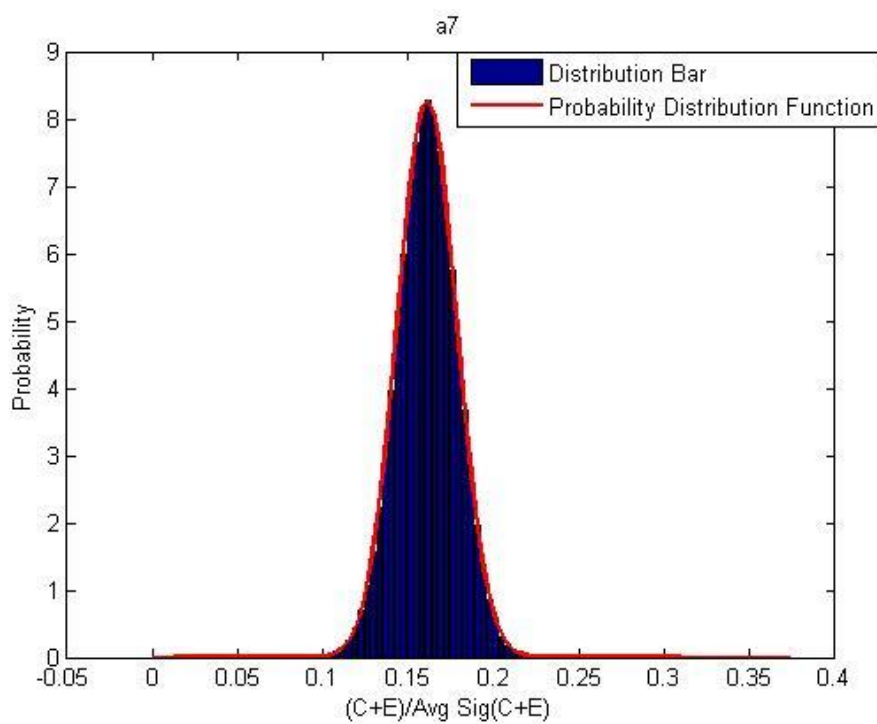


(ب)

شکل ۶-۲۲: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_6)$  برای عامل مقاومت تراکمی تک محوره

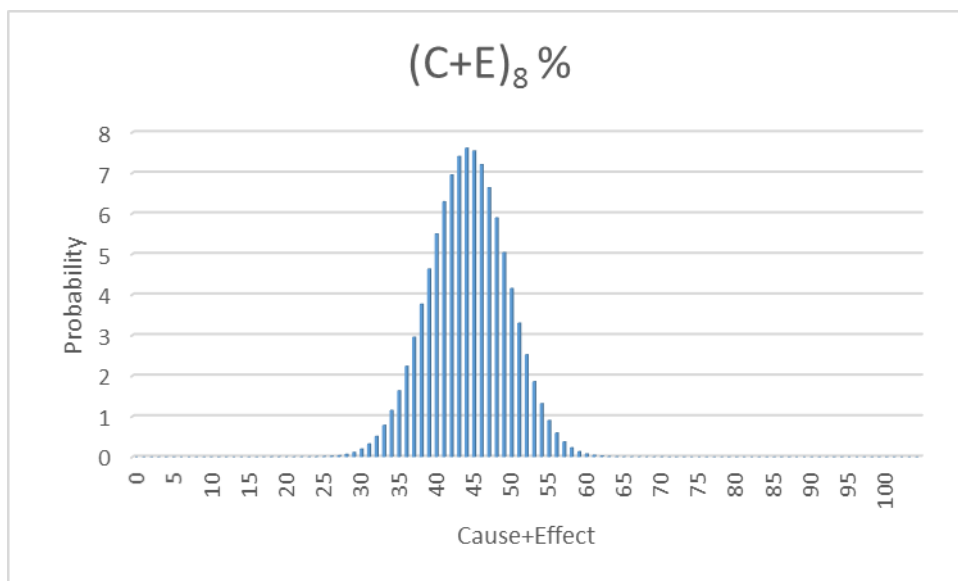


(الف)

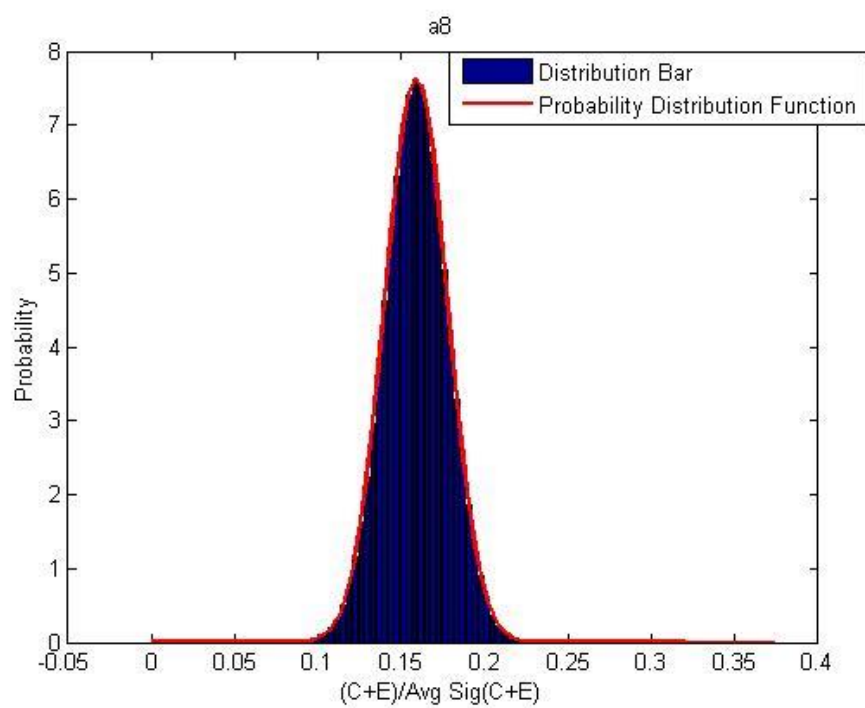


(ب)

شکل ۶-۲۳: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_7)$  برای عامل مقاومت کششی



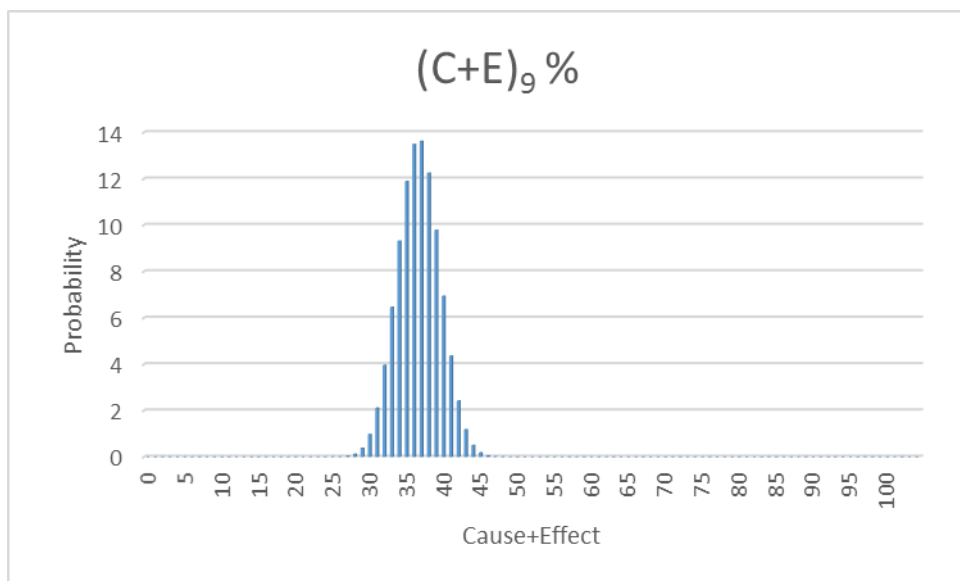
(الف)



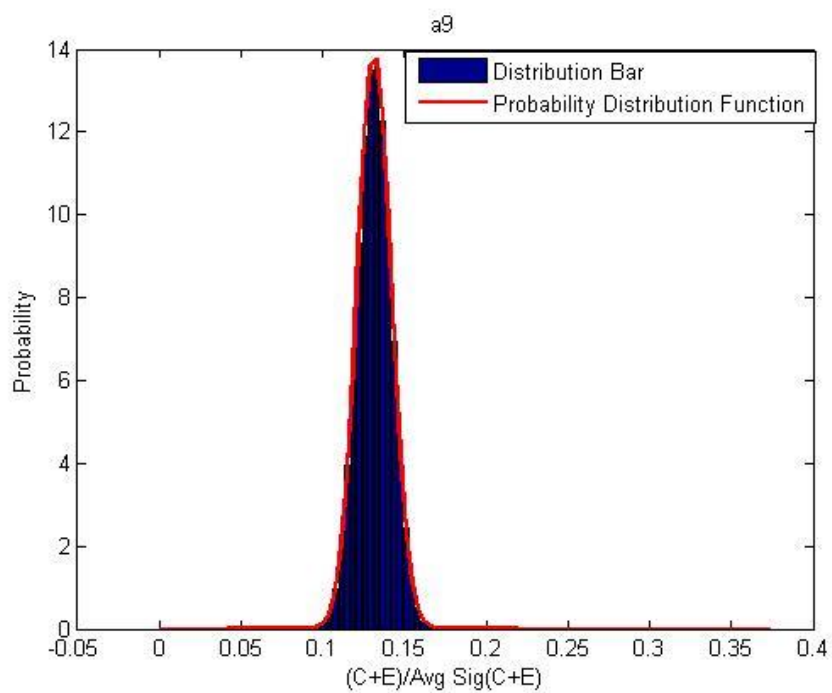
(ب)

شکل ۶-۲۴: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن (a<sub>۸</sub>) برای عامل ناپیوستگی‌ها



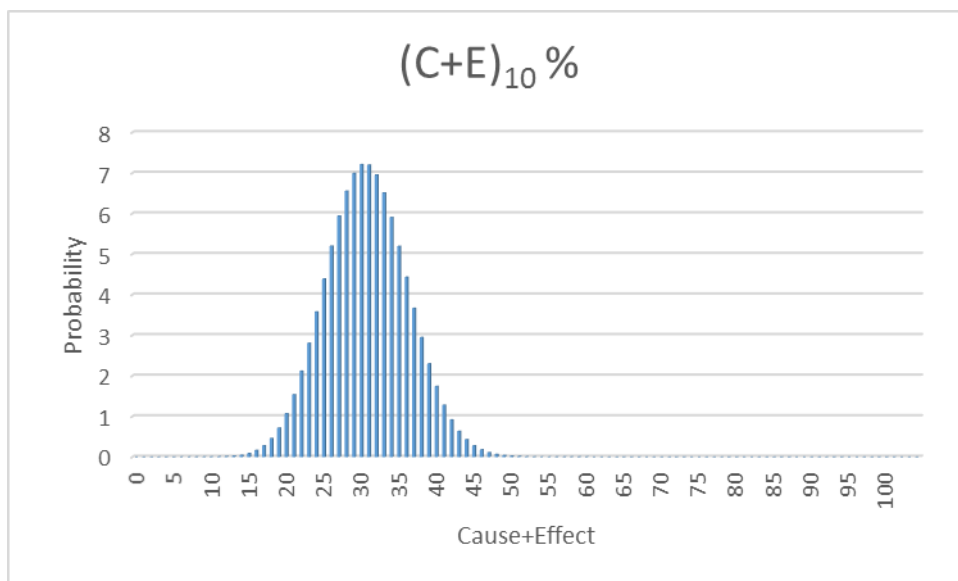


(الف)

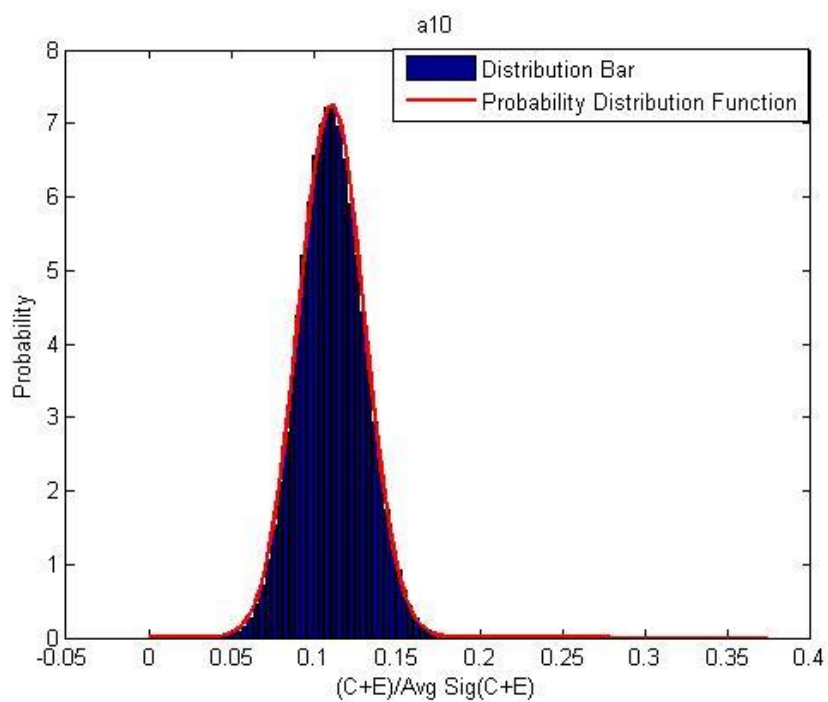


(ب)

شکل ۶-۲۵: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_9)$  برای عامل هوازدگی

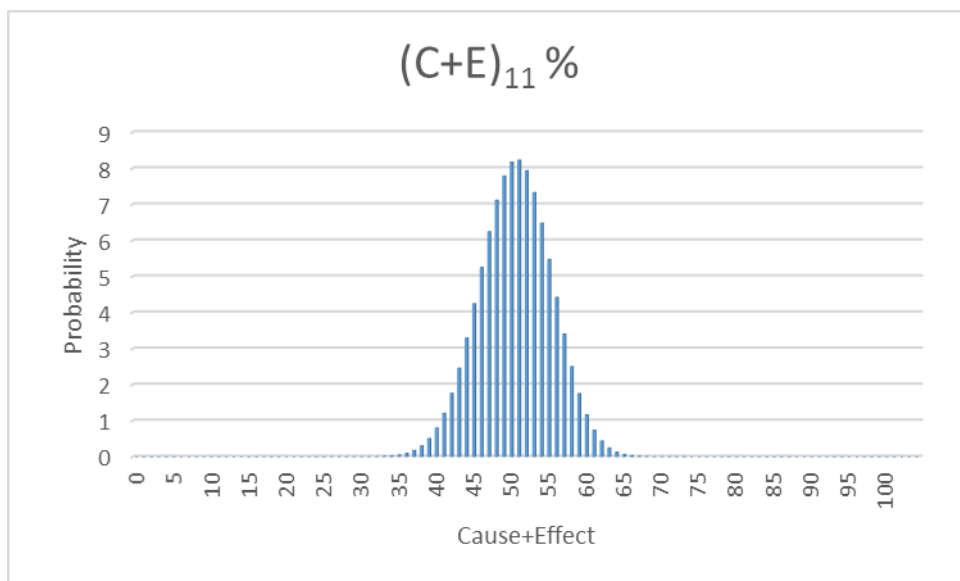


(الف)

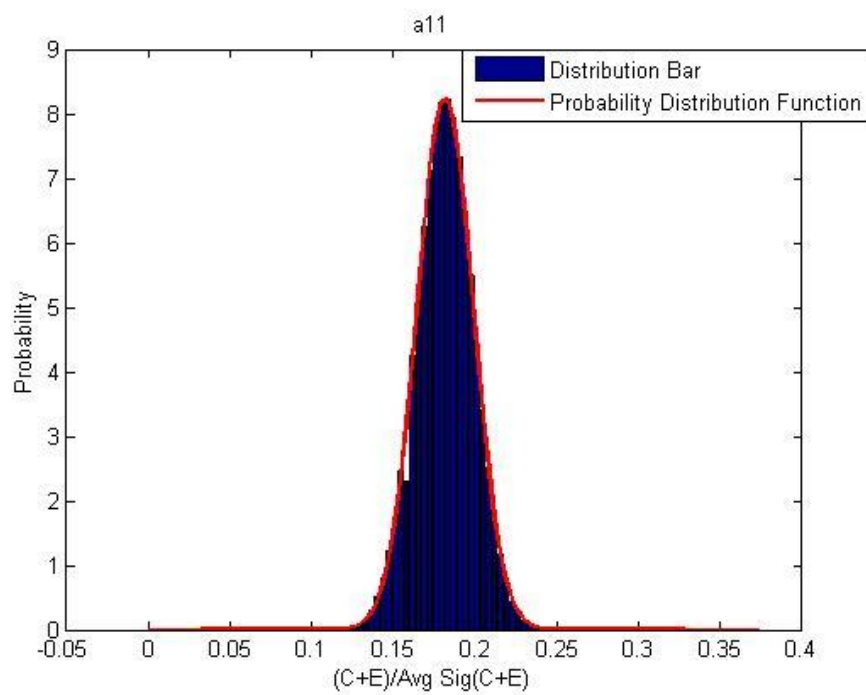


(ب)

شکل ۶-۲۶: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_{10})$  برای عامل زاویه ناپیوستگی‌ها با محور تونل

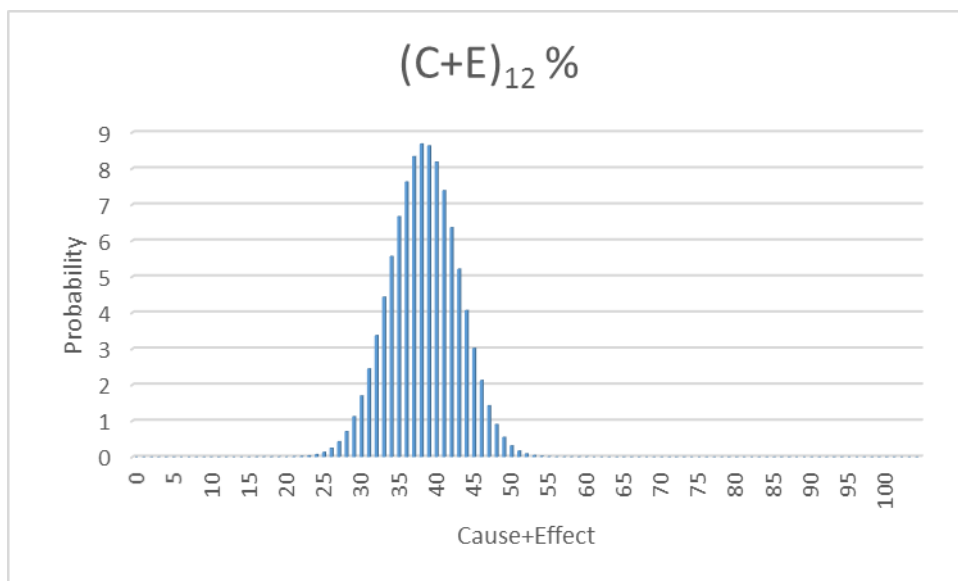


(الف)

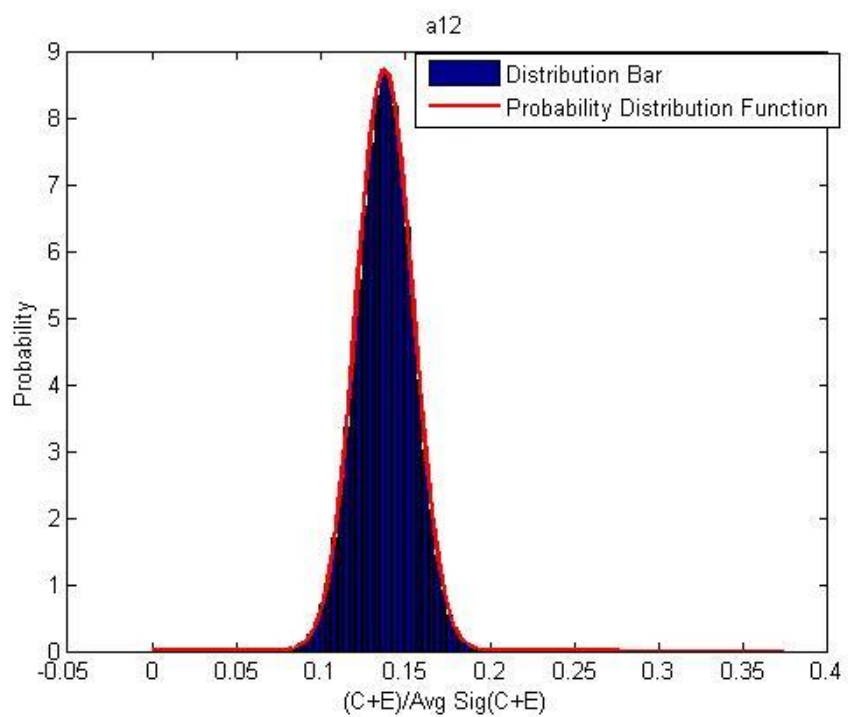


(ب)

شکل ۶-۲۷: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_{11})$  برای عامل شاخص شکنندگی

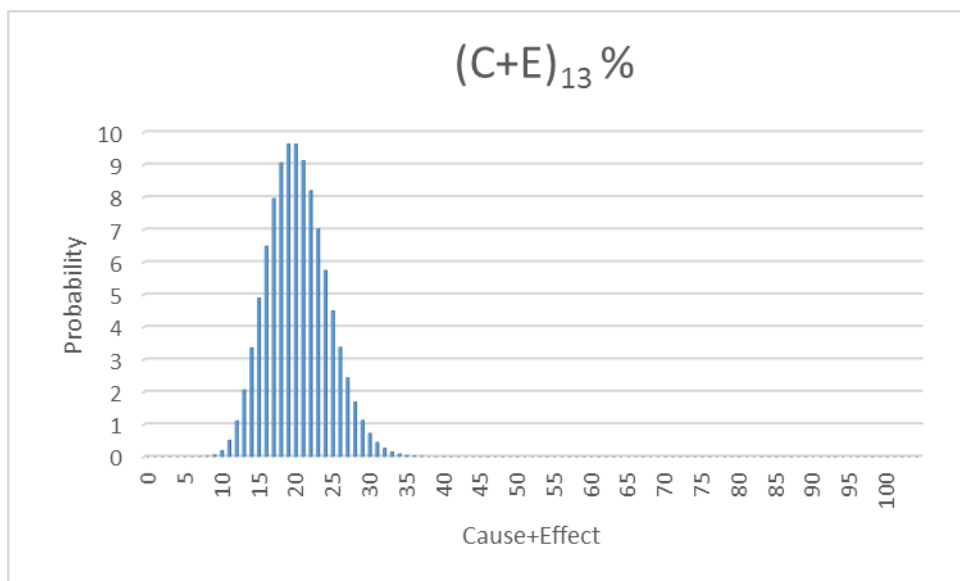


(الف)

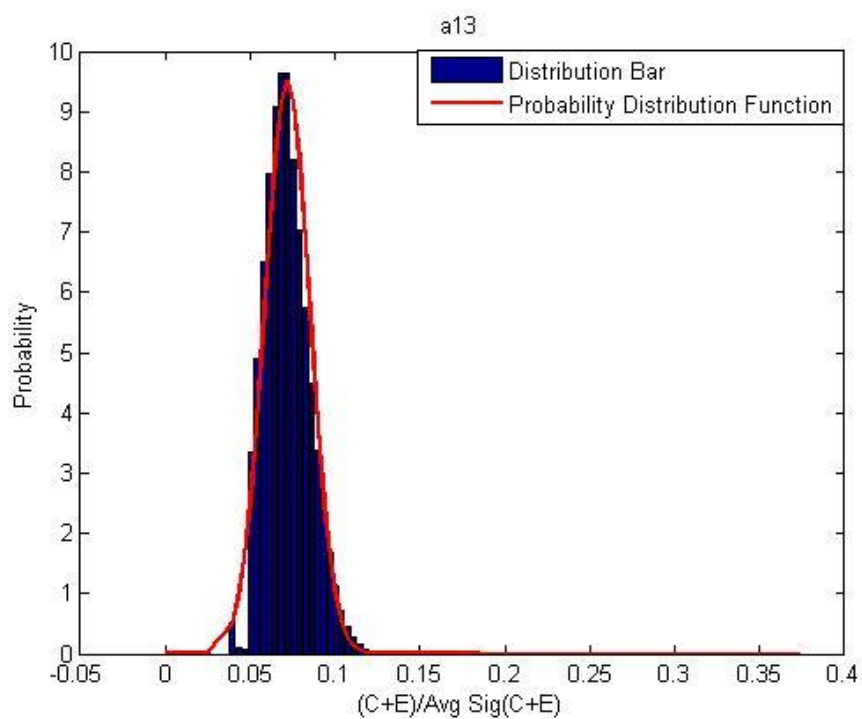


(ب)

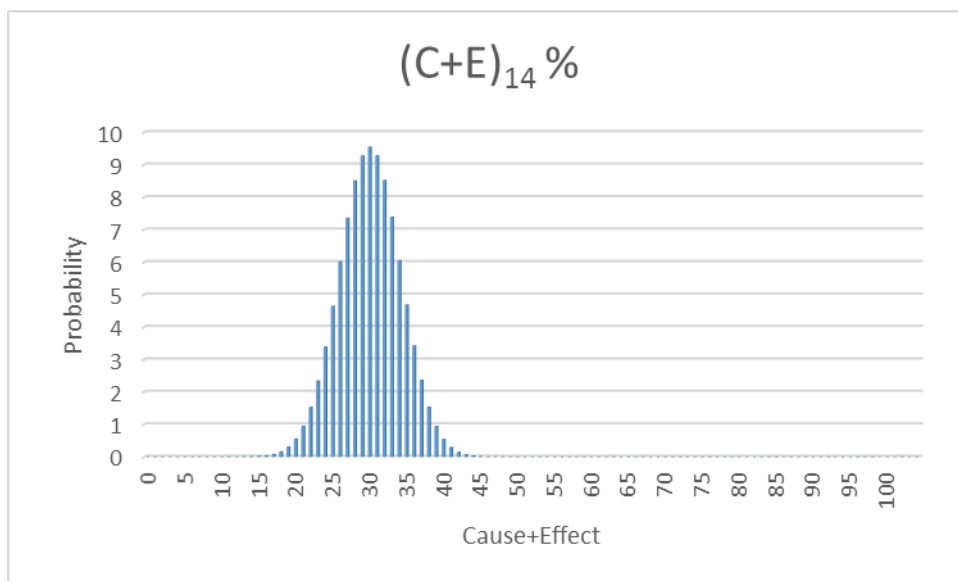
شکل ۶-۲۸: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_{12})$  برای عامل آب زیرزمینی



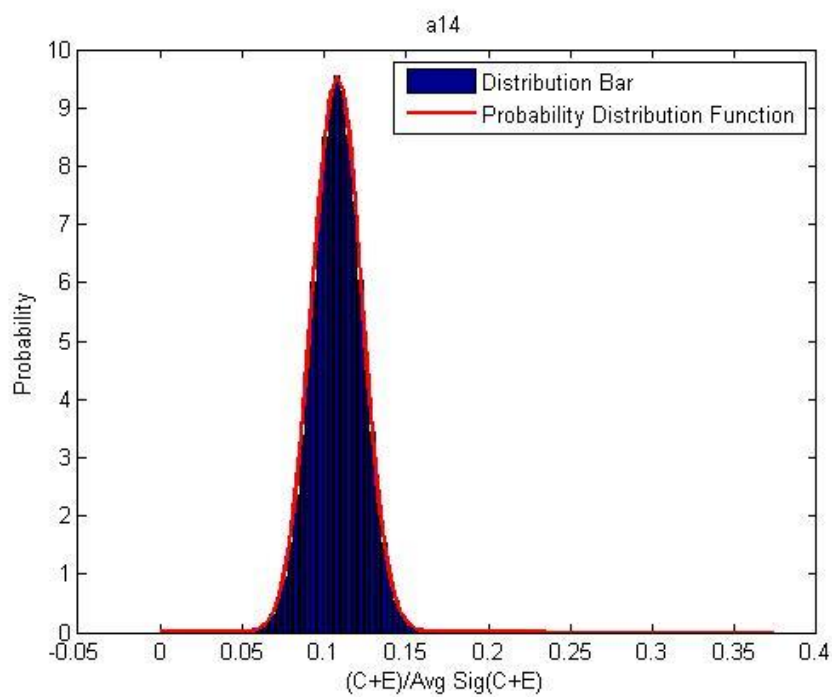
(الف)



شکل ۶-۲۹: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_{13})$  برای عامل کانی‌های ساینده



(الف)



(ب)

شکل ۳۰-۶: توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_{14})$  برای عامل وجود سینه‌کار مختلط

## ۳-۶- برآورد شاخص عملکرد

پس از تعیین وزن هر یک از عوامل، به برآورد شاخص عملکرد (PI) برای ۱۵ پهنه مسیر تونل پرداخته می‌شود. شاخص عملکرد در هر پهنه، نشان‌دهنده‌ی میزان پیشروی بهینه TBM برای پهنه مورد نظر است. به عبارتی هر چه شرایط برای حفاری در پهنه مورد نظر مساعدتر باشد، مقدار شاخص عملکرد در آن پهنه بیشتر خواهد بود. مقدار شاخص عملکرد برای هر پهنه با استفاده از رابطه (۲-۶) محاسبه می‌گردد (Mazzoccola, et al., ۱۹۹۶).

$$PI = \sum_{i=1}^n a \frac{P_i}{P_{\max}} \quad (۲-۶)$$

در این رابطه  $a_i$  وزن عامل  $i$  ام،  $P_i$  امتیاز عامل  $i$  ام،  $i$  شمارنده عامل و  $P_{\max}$  در این تحقیق برابر ۱ است. توزیع مقادیر عوامل ( $P_i$ ) برای ۱۵ پهنه مسیر تونل در فصل چهارم ارائه گردید. به عنوان مثال، معیار طبقه‌بندی عامل مقاومت تراکمی تک محوره دارای امتیازبندی از صفر تا ۱ است، بنابراین حاصل کسر همیشه کمتر از ۱ است و  $a_i$  نیز مقداری بین صفر و ۱ دارد، در نهایت مقادیر PI بین صفر و ۱ قرار می‌گیرد.

از مهم‌ترین روش‌های مدل‌سازی احتمالاتی به کار گرفته شده در مباحث ژئوتکنیکی، روش مونت کارلو<sup>۲۲</sup> است (Malkawi, et al., ۲۰۰۰). به منظور برآورد شاخص عملکرد برای پهنه‌های مسیر تونل با استفاده از رابطه‌ی (۲-۶)، از روش مدل‌سازی احتمالاتی مونت کارلو استفاده شده است. روش مونت کارلو یک روش محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه‌ی نتایج استفاده می‌کند.

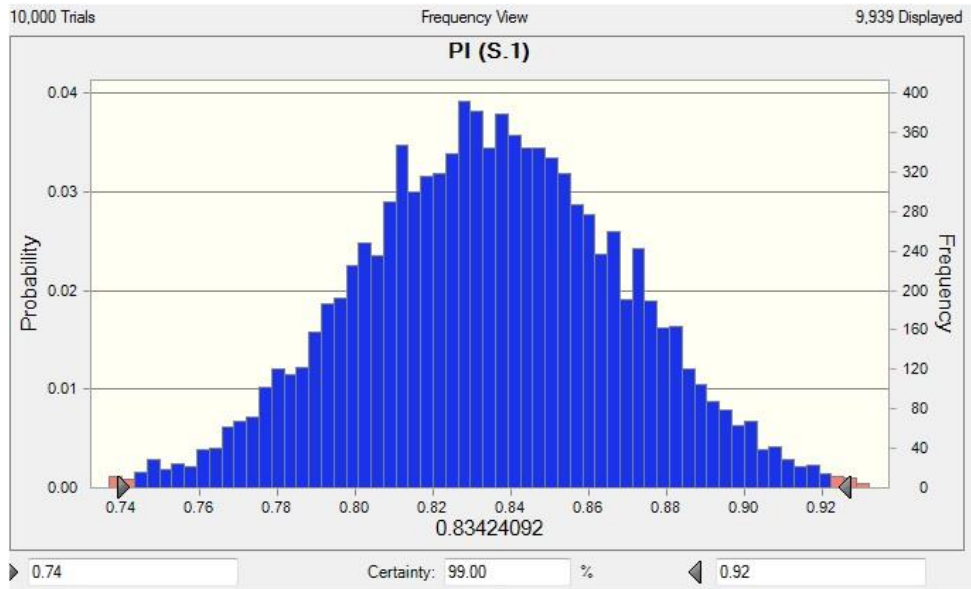
این روش معمولاً برای مدل‌سازی سیستم‌های فیزیکی، ریاضیاتی و اقتصادی استفاده می‌شود. از طرف دیگر روش مونت کارلو از نوع الگوریتم‌های محاسبه‌گر محسوب می‌شود که نتایج آن بر

نمونه‌گیری تکرارشونده تصادفی اتکا دارد. روش شبیه‌سازی مونت کارلو به دلیل اتکای آن بر محاسبات تکراری و اعداد تصادفی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که توسط رایانه اجرا شوند. گرایش به استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو از این جهت که محاسبه پاسخ دقیق با کمک الگوریتم‌های قطعی ناممکن یا ناموجه می‌باشد، روز به روز بیشتر شده است. این روش در مطالعه سیستم‌هایی که در آن تعداد زیادی متغیر با درجه آزادی‌های دو به دو مرتبط وجود دارد مفید است. روش مونت کارلو برای مدل سازی پدیده‌هایی که عدم قطعیت زیادی در ورودی آن‌ها وجود دارد بسیار مفید است. در یک الگوریتم مونت کارلو، راه حل مساله به صورت امید ریاضی<sup>۲۳</sup> یک متغیر تصادفی مدل می‌شود و سپس با میانگین‌گیری بر روی تعداد نسبتاً زیادی مقادیر تصادفی تولید شده از توزیع آن متغیر تصادفی، این امید ریاضی برآورد می‌شود. برای استفاده از این روش باید تابع توزیع هر متغیر آماری شناخته شود. در روش مونت کارلو به جای ایجاد فرمولی برای حل مساله سعی می‌شود، مدل برای چندین بار در شرایط احتمالی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد و هر بار نتایج به دست آمده یادداشت شود. آن‌گاه با تحلیل آماری، به نتایج قابل اعتماد از عملکرد حقیقی سیستم واقعی می‌توان دست یافت. روشن است که تجزیه‌ی چندین هزار بار تنها با استفاده از کامپیوتر عملی و منطقی خواهد بود. این روش از الگوی معین ذیل پیروی می‌کند:

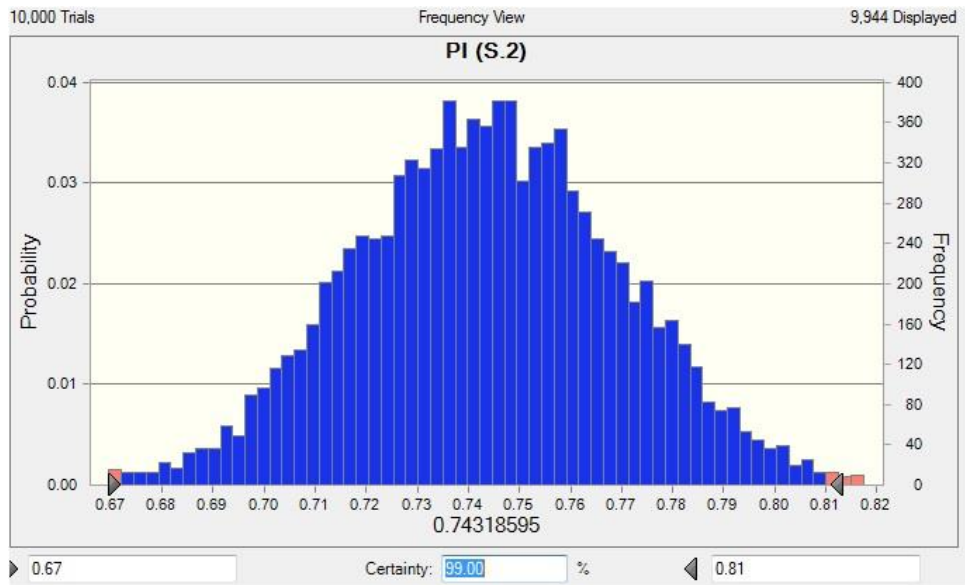
- محدوده‌ای از ورودی‌های ممکن را تعریف می‌کند (عموماً به صورت توزیع آماری)؛
- از آن محدوده ورودی‌های تصادفی را تولید می‌کند؛
- با استفاده از ورودی‌های به دست آمده یک سری محاسبات مشخص را انجام می‌دهند؛
- نتایج هر یک از اجراهای محاسباتی را در پاسخ نهایی ادغام می‌کنند.

در شکل ۶-۳۱ نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از نرم افزار کریستال بال آورده شده است.

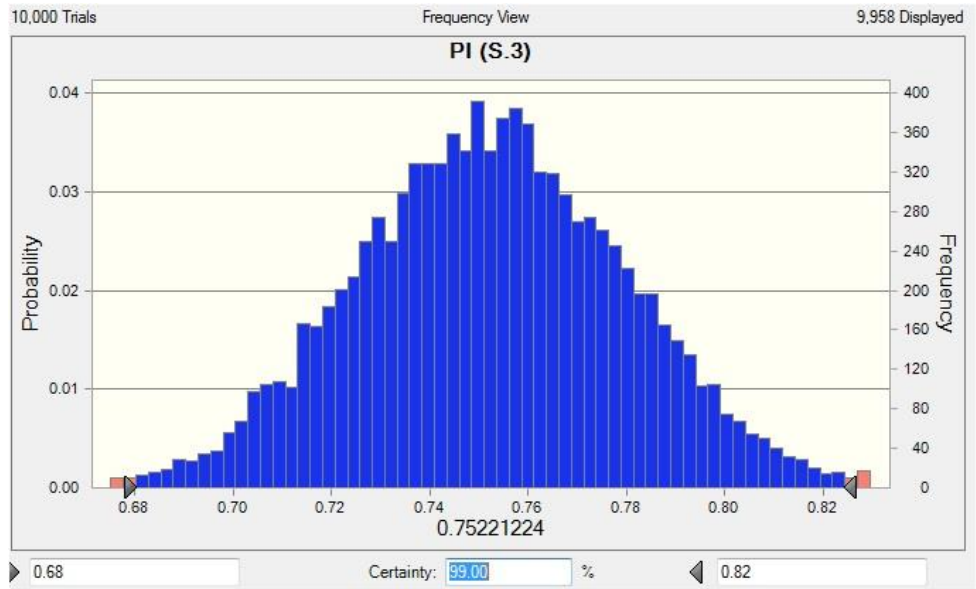




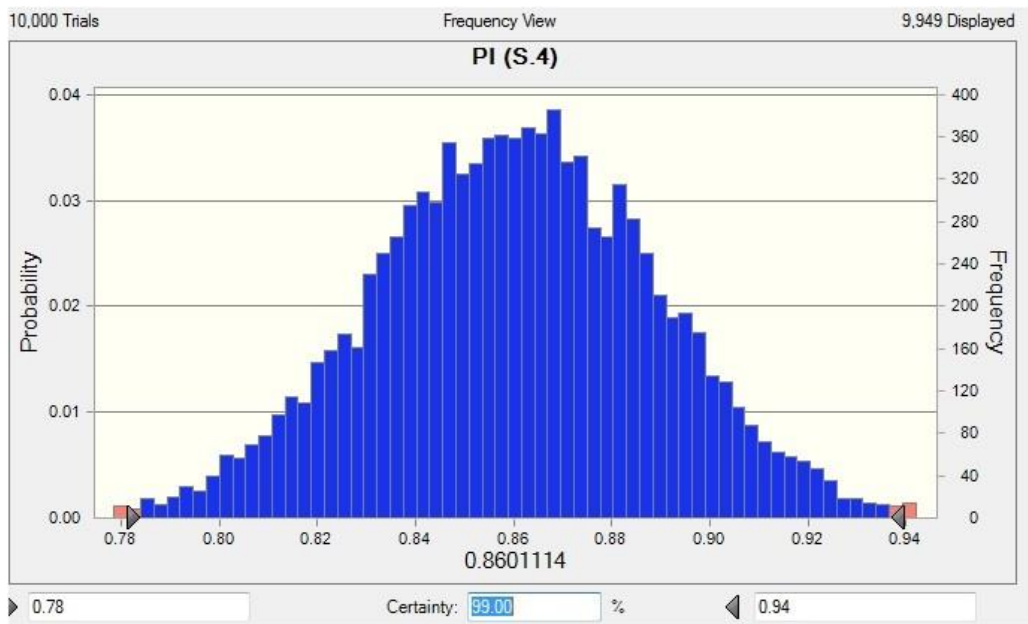
الف: پهڼه ۱



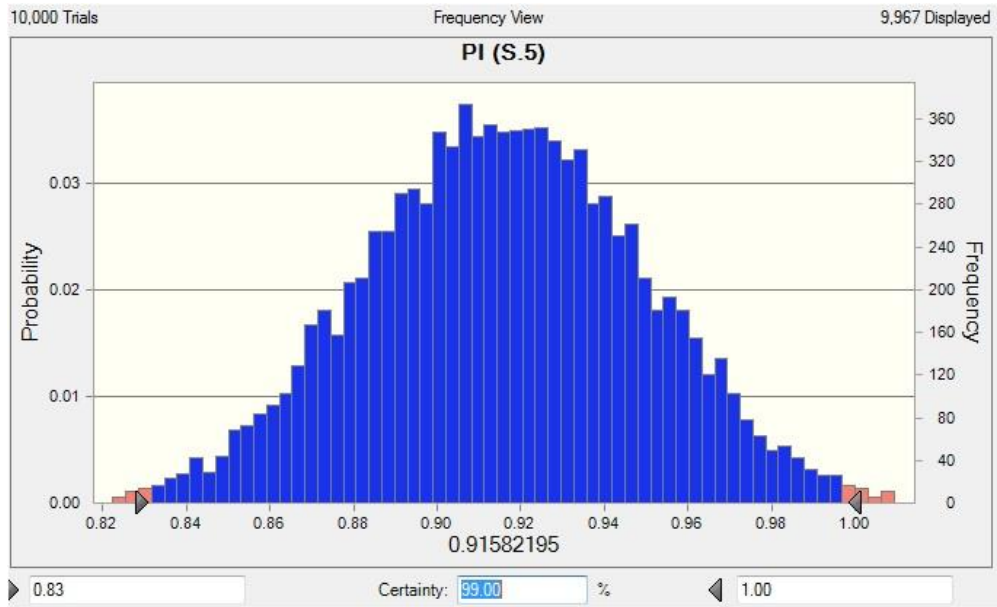
ب: پهڼه ۲



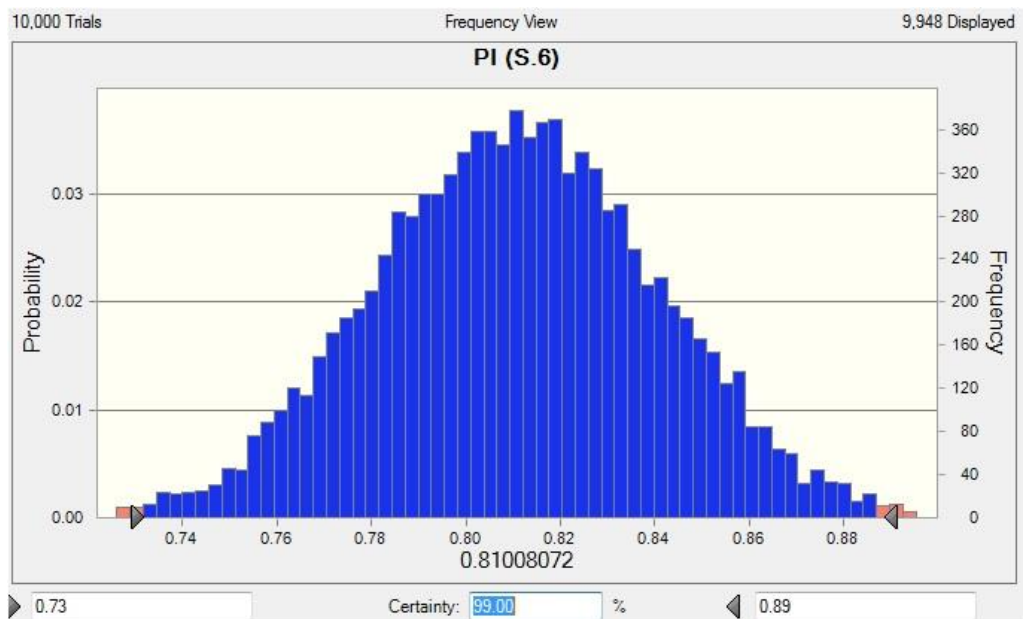
ج: پهغه ۳



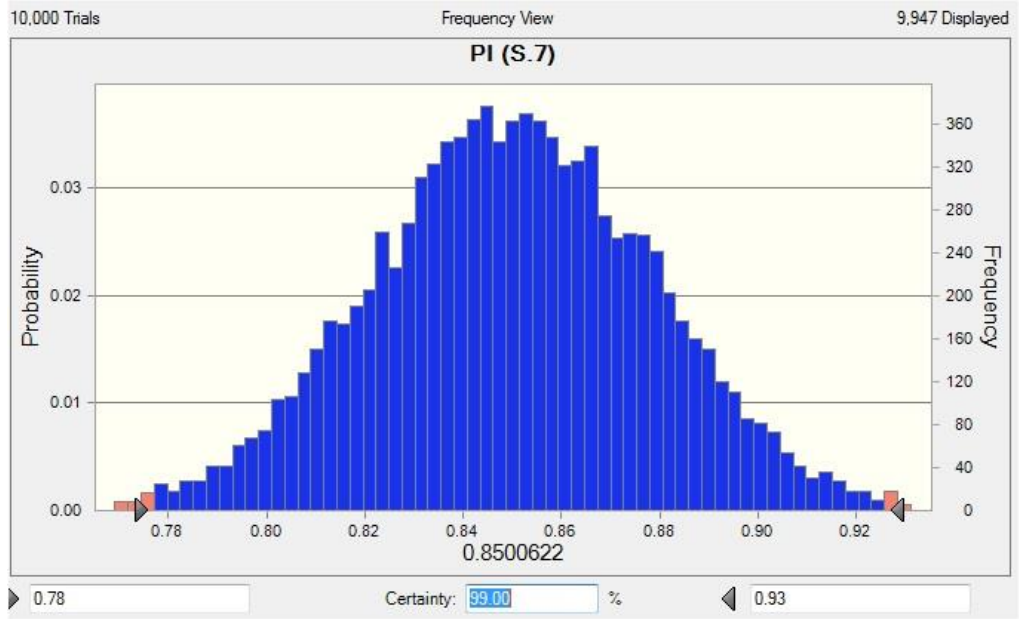
د: پهغه ۴



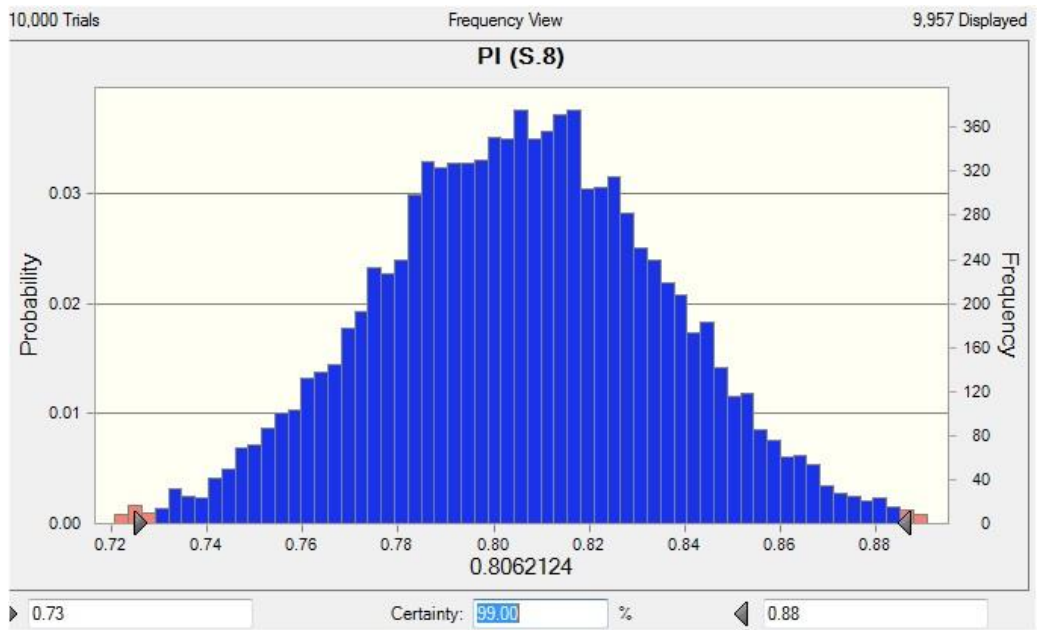
۵: پهله



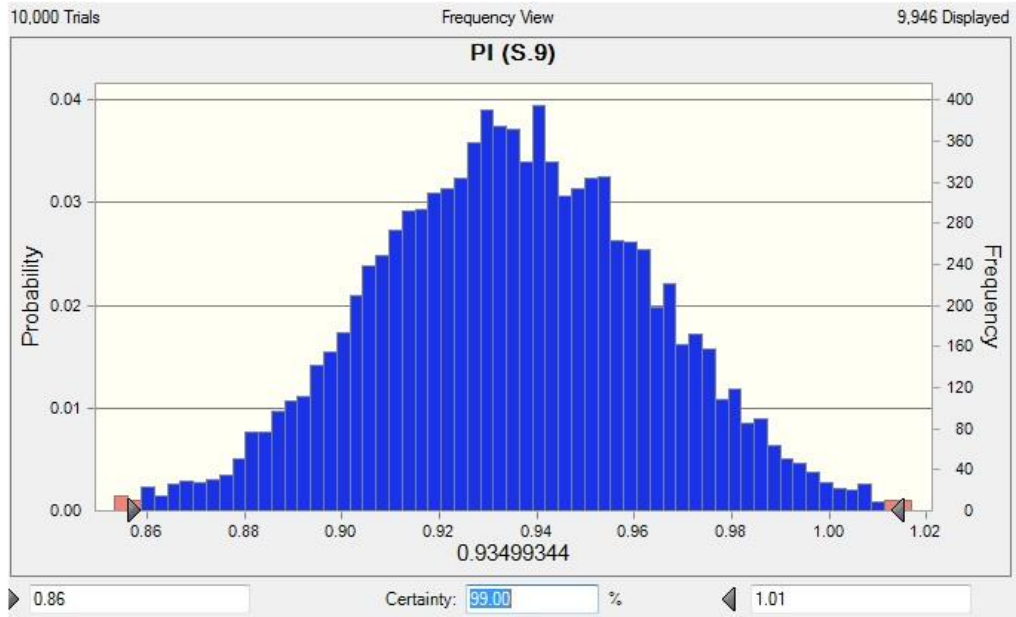
۶: پهله



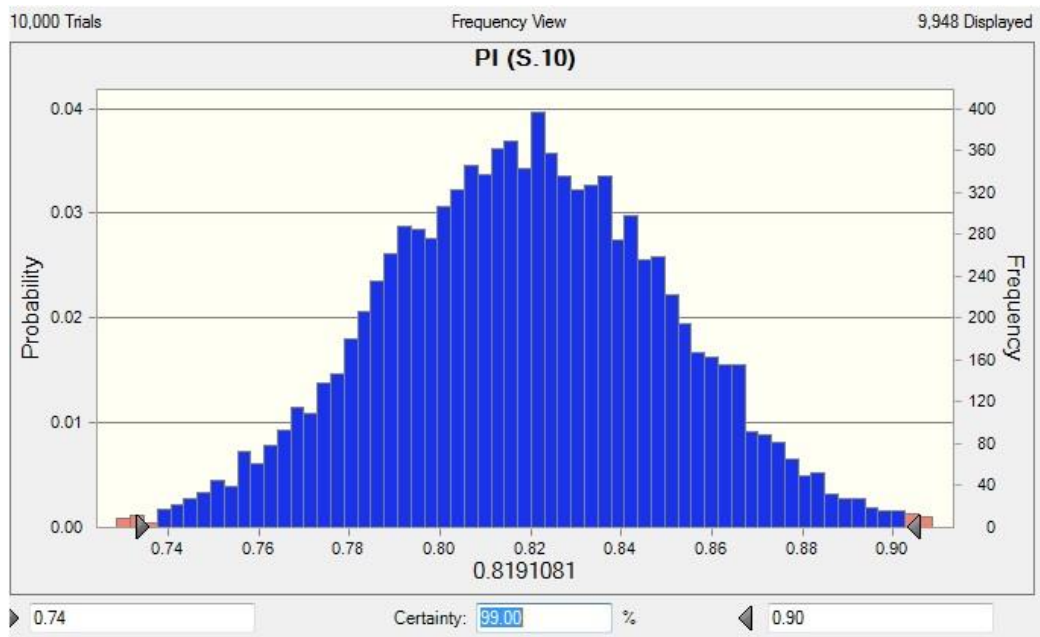
ز: پهغه ۷



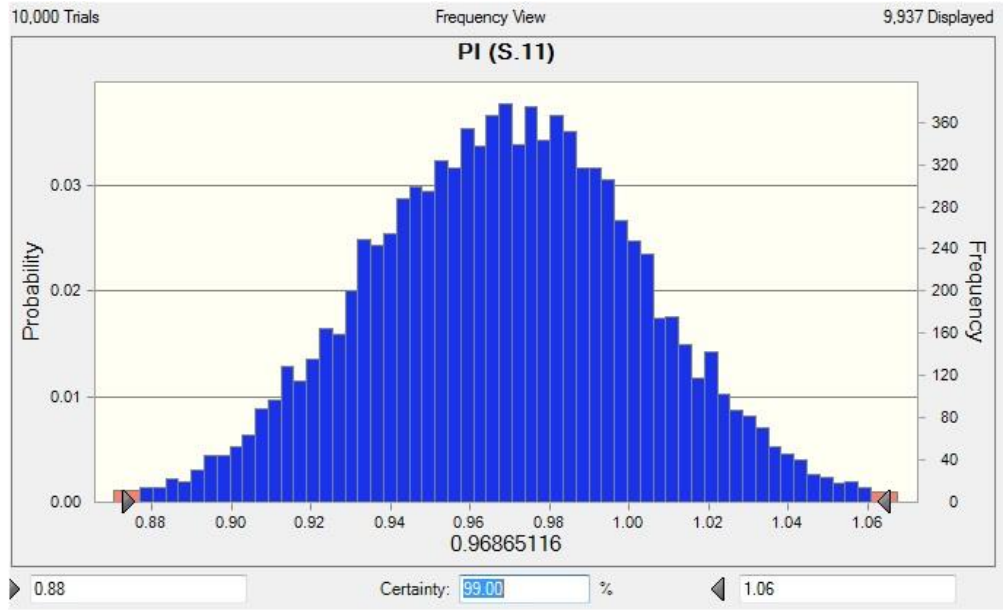
ح: پهغه ۸



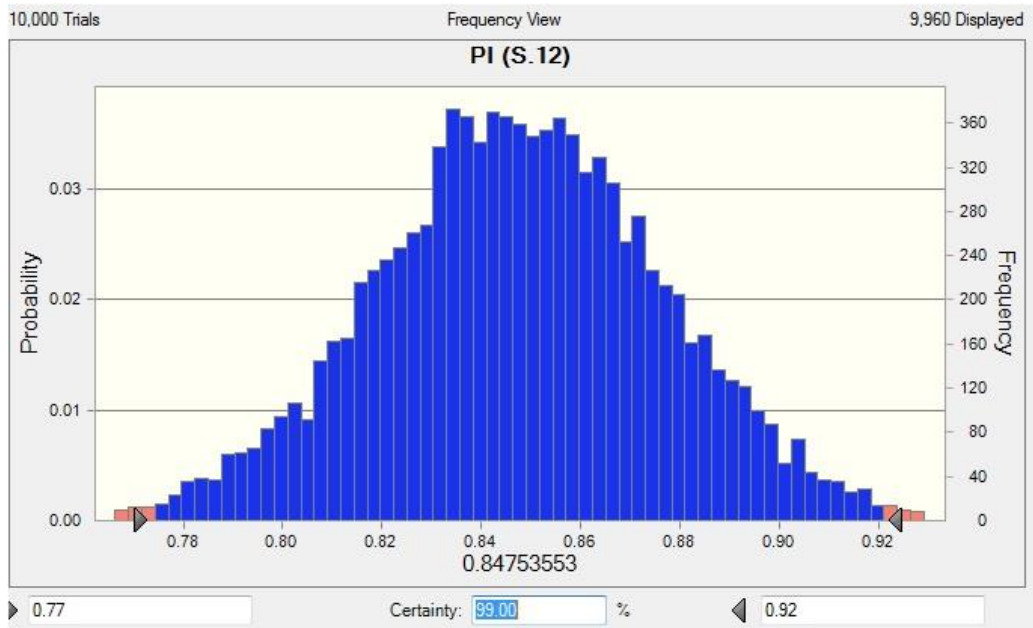
ط: پهنه ۹



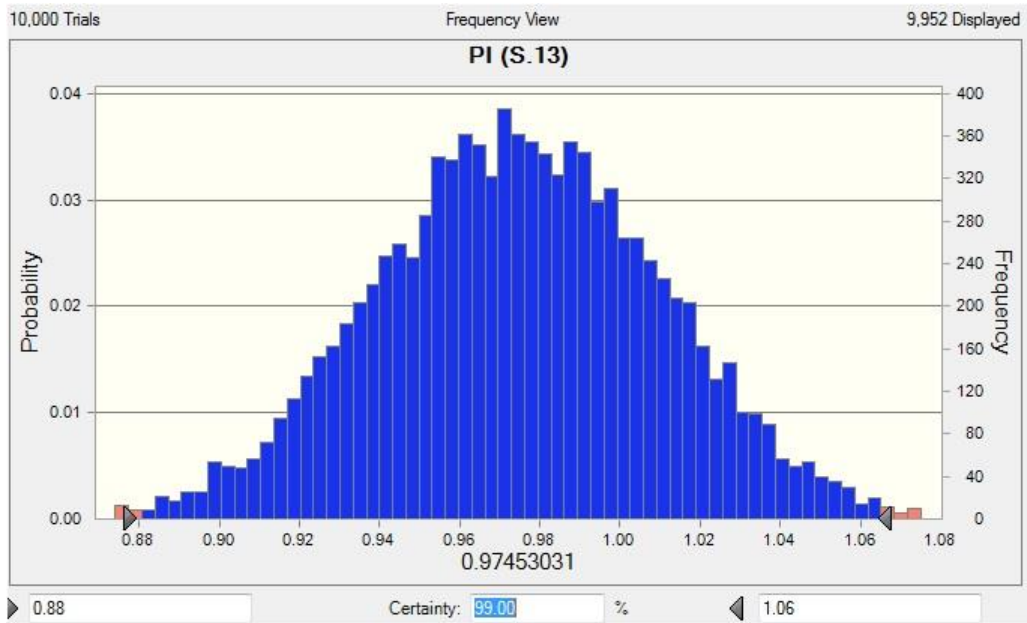
ی: پهنه ۱۰



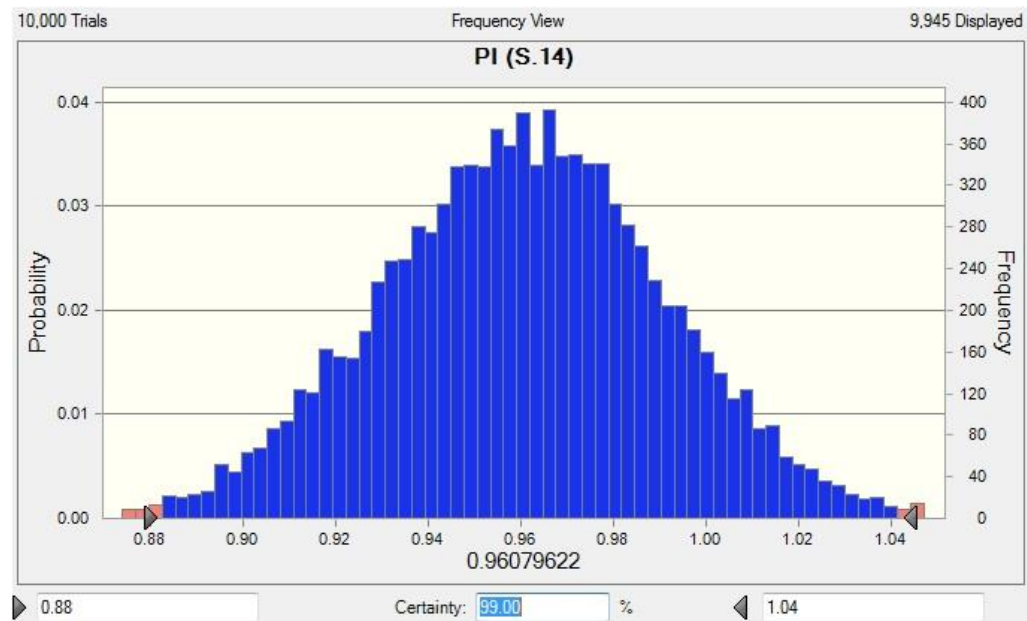
ک: پهڼه ۱۱



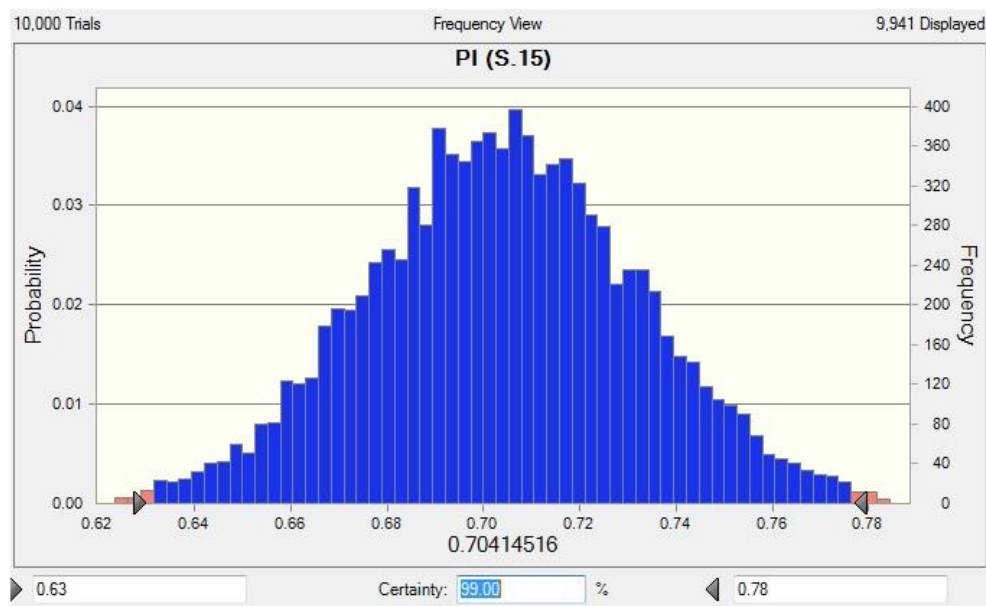
ل: پهڼه ۱۲



م: پهنه ۱۳



ن: پهنه ۱۴



س: پهنه ۱۵

شکل ۶-۳۱: توزیع احتمال شاخص نرخ نفوذ (PI) حاصل از روش مونت کارلو به همراه مقادیر متوسط برای ۱۵ پهنه‌ی

مسیر تونل (الف-س).

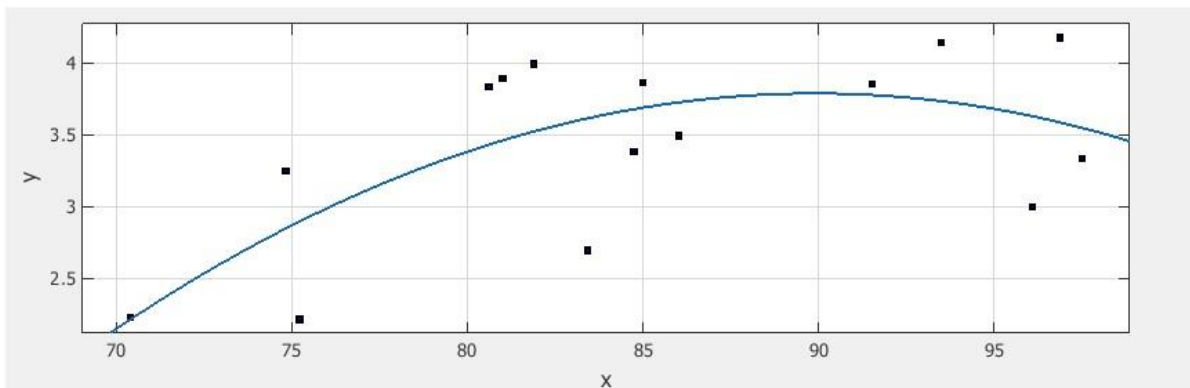
پارامترهای آماری حاصل از مدل‌سازی احتمالاتی برای محاسبه شاخص نرخ نفوذ در جدول ۶-۸ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این جدول شامل میانگین، میانه، انحراف معیار، واریانس، حداقل و حداکثر PI برای هر یک از پهنه‌های مسیر تونل است. در هر بار اجرای روش مونت کارلو (۱۰۰۰۰ بار نمونه‌گیری تصادفی) برای محاسبه PI، این پارامترهای آماری تقریباً ثابت می‌ماند. همان‌طور که اشاره شد، هر چه شرایط کارکرد TBM در یک پهنه مناسب‌تر باشد، شاخص نفوذ برای آن پهنه بیشتر است. علت این امر نحوه امتیازبندی عوامل است که در فصل ۴ ارائه گردید.



جدول ۶-۸: پارامترهای آماری حاصل از مدل‌سازی احتمالاتی برای محاسبه‌ی شاخص نفوذ برای پهنه‌های مسیر تونل

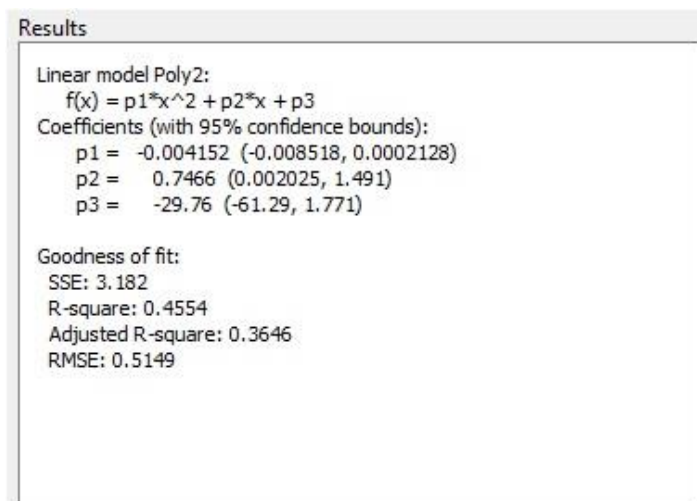
شاخص نرخ نفوذ PI						پهنه
حداکثر	حداقل	واریانس	انحراف معیار	میانگین	میانگین	
۰.۹۲	۰.۷۴	۰	۰.۰۳	۰.۸۳	۰.۸۳	(S.۱)۱
۰.۸۱	۰.۶۷	۰	۰.۰۳	۰.۷۴	۰.۷۴	(S.۲)۲
۰.۸۲	۰.۶۸	۰	۰.۰۳	۰.۷۵	۰.۷۵	(S.۳)۳
۰.۹۴	۰.۷۸	۰	۰.۰۳	۰.۸۶	۰.۸۶	(S.۴)۴
۱	۰.۸۳	۰	۰.۰۳	۰.۹	۰.۹	(S.۵)۵
۰.۸۹	۰.۷۳	۰	۰.۰۳	۰.۸۱	۰.۸۱	(S.۶)۶
۰.۹۳	۰.۷۸	۰	۰.۰۳	۰.۸۵	۰.۸۵	(S.۷)۷
۰.۸۸	۰.۷۳	۰	۰.۰۳	۰.۸۱	۰.۸۱	(S.۸)۸
۱.۰۱	۰.۸۶	۰	۰.۰۳	۰.۹۳	۰.۹۳	(S.۹)۹
۰.۹	۰.۷۴	۰	۰.۰۳	۰.۸۲	۰.۸۲	(S.۱۰)۱۰
۱.۰۶	۰.۸۸	۰	۰.۰۳	۰.۹۷	۰.۹۷	(S.۱۱)۱۱
۰.۹۲	۰.۷۷	۰	۰.۰۳	۰.۸۵	۰.۸۵	(S.۱۲)۱۲
۱.۰۶	۰.۸۸	۰	۰.۰۳	۰.۹۷	۰.۹۷	(S.۱۳)۱۳
۱.۰۴	۰.۸۸	۰	۰.۰۳	۰.۹۶	۰.۹۶	(S.۱۴)۱۴
۰.۷۸	۰.۶۳	۰	۰.۰۳	۰.۷	۰.۷	(S.۱۵)۱۵

به منظور به دست آوردن رابطه‌ای برای تخمین نرخ نفوذ بر اساس شاخص نرخ نفوذ در پروژه‌ی تونل انتقال آب کرج- تهران، از مقادیر میانگین شاخص نرخ نفوذ (جدول ۶-۸) و نرخ نفوذ واقعی ارائه شده در فصل ۴ استفاده می‌شود. نحوه ارتباط بین شاخص نرخ نفوذ (PI) و میزان نرخ نفوذ (PR) در پروژه مورد مطالعه در شکل ۶-۳۲ نشان داده شده است.



شکل ۳۲-۶: نمودار برازش شده بین شاخص نرخ نفوذ (PI) و نرخ نفوذ واقعی (PR)

نقاط ارائه شده در دستگاه مختصات شکل ۳۲-۶، مربوط به ۱۵ پهنه مسیر تونل است. بهترین رگرسیون برای بیان ارتباط بین PI و PR، معادله جبری از درجه ۲، با ضریب  $R^2 = 0.4554$  بوده که در شکل ۳۳-۶ نشان داده شده است.



شکل ۳۳-۶: رابطه منحنی برازش شده بین شاخص نرخ نفوذ (PI) و نرخ نفوذ واقعی (PR)

در این رابطه  $F(X) = PR$  و  $X = PI$  می‌باشد.

## ۴-۶- اعتبار سنجی

مقادیر نرخ نفوذ با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده، برای ۱۵ پهنه مسیر پیش‌بینی شده است (جدول ۶-۹). به منظور اعتبارسنجی پژوهش حاضر، مقادیر نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده‌ی واقعی با مقادیر پیش‌بینی شده در یک دستگاه مختصات ترسیم شده است.

جدول ۶-۹: مقادیر شاخص نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و واقعی برای ۱۵ پهنه مسیر تونل انتقال آب کرج-تهران

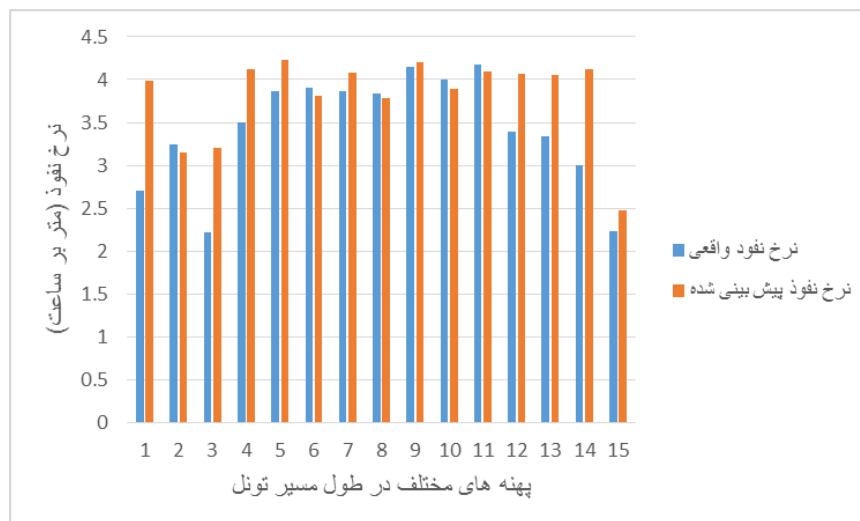
پهنه	شاخص نرخ نفوذ	نرخ نفوذ پیش‌بینی شده	نرخ نفوذ واقعی
۱ (S.۱)	۸۳/۴۲	۳/۹۹	۲/۷
۲ (S.۲)	۷۴/۸۳	۳/۱۵	۳/۲۵
۳ (S.۳)	۷۵/۲۳	۳/۲	۲/۲۲
۴ (S.۴)	۸۶/۰۱	۴/۱۲	۳/۵
۵ (S.۵)	۹۱/۵۲	۴/۲۳	۳/۸۶
۶ (S.۶)	۸۱	۳/۸۱	۳/۹
۷ (S.۷)	۸۵	۴/۰۸	۳/۸۷
۸ (S.۸)	۸۰/۶	۳/۷۸	۳/۸۴
۹ (S.۹)	۹۳/۵	۴/۲	۴/۱۵
۱۰ (S.۱۰)	۸۱/۹	۳/۸۹	۴
۱۱ (S.۱۱)	۹۶/۸۶	۴/۰۹	۴/۱۸
۱۲ (S.۱۲)	۸۴/۷۴	۴/۰۷	۳/۳۹
۱۳ (S.۱۳)	۹۷/۵	۴/۰۶	۳/۳۴
۱۴ (S.۱۴)	۹۶/۰۸	۴/۱۲	۳
۱۵ (S.۱۵)	۷۰/۴۱	۲/۴۸	۲/۲۳

همان‌طور که در شکل ۶-۳۳ ملاحظه می‌شود، ضریب تعیین آن‌ها در حالت یک به یک  $R^2 =$

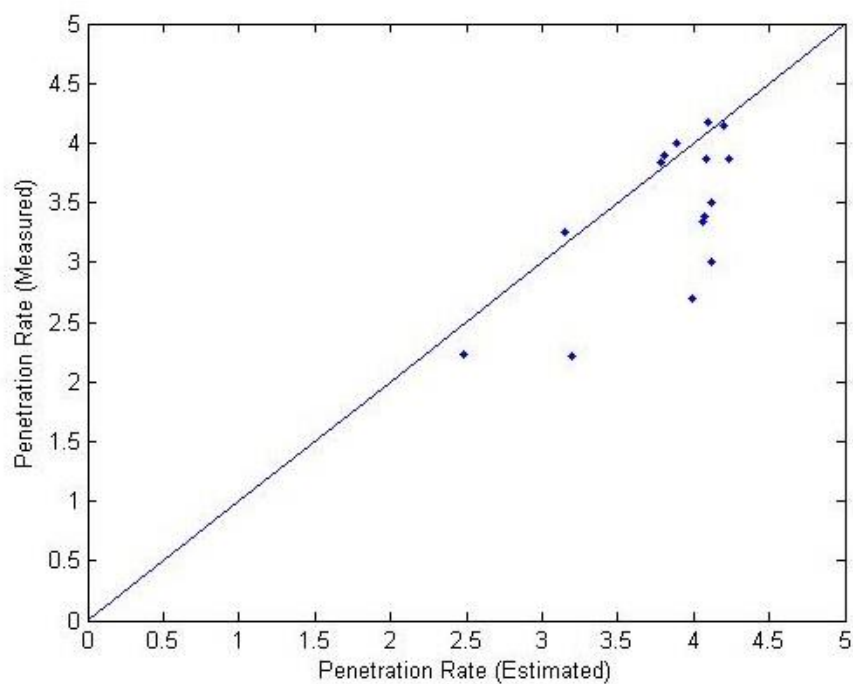
۰/۴۵۵۴ است که نشان‌دهنده‌ی میزان همبستگی میان مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی می‌-

باشد. شکل ۶-۳۴ نیز مقادیر نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و واقعی را در حالت مقایسه‌ای یک به یک

نشان می‌دهد.



شکل ۳۴-۶: مقایسه مقادیر نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ واقعی برای ۱۵ پهنه مسیر تونل



شکل ۳۵-۶: میزان همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ واقعی

## ۶-۵- جمع بندی

در این فصل به ارزیابی رابطه‌ای برای تخمین نرخ نفوذ TBM در زمین‌های سنگی پرداخته شد. به این منظور، وزن عوامل موثر بر این مساله با بهره‌گیری از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ تعیین گردید. سپس روش مدل‌سازی احتمالاتی مونت کارلو مورد استفاده قرار گرفت و شاخص نرخ نفوذ (PI) برای ۱۵ پهنه مسیر تونل انتقال آب کرج-تهران محاسبه شد. مقادیر متوسط شاخص بهره‌وری و ضریب محاسبه شده مربوط به ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل، در یک دستگاه مختصات ترسیم و ارتباط بین آن‌ها برآورد گردید. بهترین رگرسیون این نقاط، معادله چندجمله‌ای از درجه ۲ با ضریب  $R^2=0/4554$  را نشان می‌دهد که مقدار قابل قبولی است.

در فصل بعد به جمع‌بندی نهایی و نتیجه‌گیری پژوهش حاضر پرداخته می‌شود.



## ۷ فصل، هفتم

### جمع بندی نهایی و نتیجه گیری

## ۷-۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت روزافزون جمعیت نیاز به منابع انرژی امری ضروری محسوب می‌شود. از اینرو، تونل انتقال آب کرج- تهران نیز برای آبرسانی به تصفیه خانه شماره ۶ تهران احداث گردیده است. در پژوهش حاضر به بررسی عملکرد TBM سنگ سخت پرداخته شده است. بدین منظور طبقه‌بندی‌های مختلفی برای عوامل دخیل در حل مساله ارایه شد و سپس با روش‌های قطعی و سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)- احتمالاتی به صورت جداگانه به محاسبه شاخص نفوذ و سپس نرخ نفوذ برای هر پهنه پرداخته شده است. با توجه به نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ واقعی، بهترین منحنی بر روی داده‌های مربوط به آن برازش شده است.

## ۷-۲- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی عملکرد TBM سنگ سخت در پروژه تونل انتقال آب کرج- تهران پرداخته شده است. محاسبه شاخص نفوذ مبتنی بر دو روش قطعی و سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) انجام شده است.

در روش قطعی ابتدا سه نوع طبقه‌بندی ارایه شده است، با توجه به ضرایب همبستگی محاسبه شده بین شاخص نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ واقعی طبقه‌بندی نوع سوم دارای بهترین همبستگی ( $R^2=0/4885$ ) می‌باشد. بدین ترتیب از طبقه‌بندی نوع سوم برای محاسبه نرخ نفوذ در روش سیستم‌های مهندسی سنگ نیز استفاده شده است. در این روش ابتدا نظر ۱۰ متخصص برای محاسبه ماتریس اندرکنش پرسیده شده است. سپس با توجه به امتیازات تخصیص یافته به اندرکنش عوامل بر روی هم و تشکیل ماتریس اندرکنش متوسط، نیروی پیشران TBM دارای بیشترین شدت اندرکنش



(C+E=50/9) و وجود کانی‌های ساینده دارای کمترین شدت اندرکنش (C+E=20/2) می‌باشد. سپس توزیع آماری مربوط به هر عامل در ۱۵ پهنه طول مسیر تونل با توجه به طبقه‌بندی‌های مختلف ترسیم گردیده است. توزیع‌های احتمال علت (C)، اثر (E)، شدت اندرکنش (C+E) و وزن عوامل (a) به صورت جداگانه رسم شده است. با استفاده از رابطه مازوکولا و هادسون در سال ۱۹۹۶ (رابطه ۵-۲) به محاسبه شاخص نفوذ در هر پهنه پرداخته شده است. سپس با مقایسه داده‌های نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ واقعی ضریب همبستگی ( $R^2=0/4554$ ) به دست آمده است. با بررسی نرخ نفوذ به دست آمده برای پهنه‌های مختلف مشاهده می‌شود برای پهنه‌های حاوی گابرو مقادیر به دست آمده به واقعیت بسیار نزدیک بوده، در پهنه‌های دیوریتی و توف‌های خاکستری و سیاه رنگ تطابق خیلی خوبی دیده نمی‌شود و در توف‌های کریستالی و لاپیلی تناوبا تطابق خوبی دیده می‌شود. از علل خطای بوجود آمده در محاسبه نرخ نفوذ پهنه‌های مختلف می‌توان به خطای انسانی در ثبت دقیق داده‌ها، خطای نظر متخصصین در تعیین اندرکنش بین پارامترها اشاره نمود.

### ۳-۷- پیشنهادات

- ✓ با توجه به اینکه پژوهش حاضر با در نظر گرفتن پارامترهای ماشین در حل مساله است، همین موضوع را بدون در نظر گرفتن پارامترهای ماشین حل کرده و سپس نتایج آن را با نتایج پژوهش حاضر مقایسه کرده تا تاثیر این عوامل در نتایج نهایی مورد بررسی قرار گیرد.
- ✓ می‌توان در روش قطعی، تحلیل حساسیت را روی عوامل مختلف انجام داد و تاثیرگذارترین پارامترها را مشخص کرد.
- ✓ با مطالعه گسترده روی خصوصیات ماشین و زمین‌شناسی مسیر حفر تونل، طبقه بندی‌های مناسبی را برای پارامترهای ماشین حفار ارایه کرد.
- ✓ این پژوهش را با در نظر گرفتن پارامترهای فاکتور بهره‌وری به صورت جداگانه بررسی کرده و نتایج آن را با نتایج واقعی بررسی نمود.
- ✓ موضوع پژوهش حاضر را در مورد زمین‌های خاکی و نرم برای پیش‌بینی عملکرد TBM به کار برد.



## منابع و مراجع

خراسانی ع، (۱۳۹۲)، پایان نامه ارشد؛ "برآورد ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

شریعت علوی ح، کاکایی ر، زورآبادی م، علیزاده صوری ب و عبداللهی م (۱۳۸۹)؛ "محاسبه ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی دستگاه حفاری تمام مقطع TBM در سنگ‌های سخت مطالعه موردی: قطعه ۱ تونل انتقال آب قمرود"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دوره پنجم، صفحه ۷۹ تا ۹۱.

فروغ ا، (۱۳۹۱)، رساله دکتری؛ "مدلسازی تاثیر پارامترهای توده سنگ بر بهره‌وری ماشین حفار تمام مقطع در سنگ سخت"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۸)، گزارش زمین‌شناسی انتقال آب کرج- تصفیه خانه شماره ۶ تهران.

AFTES. (۲۰۰۰). "New recommendation on choosing mechanized tunneling techniques".

Ali, K. M., & Hasan, K. (۲۰۰۲). "Rock mass characterization to indicate slope instability at Bandarban, Bangladesh"; a rock engineering systems approach. *Environmental & Engineering Geoscience*, ۸(۲), ۱۰۵-۱۱۹.

Allenby, B. R. (۱۹۹۹). "Industrial ecology: policy framework and implementation". Prentice Hall.

Andrieux, P., & Hadjigeorgiou, J. (۲۰۰۸). "The distressability index methodology for the assessment of the likelihood of success of a large-scale confined distress blast in an underground mine pillar". *International journal of rock mechanics and mining sciences*, ۴۵(۳), ۴۰۷-۴۲۱.

Askilrud, O. G., (۱۹۹۶). "Hard rock tunnel boring machine, Course in Colorado School of Mine", Atlas Copco Rabbits.

Barton, N. (۱۹۹۹). "TBM Predictions-TBM performance In rock using QTBM-The author, Technical adviser, NGI, has developed a new method for predicting penetration rate and advance rate for TBM tunneling". *The method. Tunnels and Tunnelling*, ۳۱(۹), ۳۰-۳۵.

Barton, N. R. (۲۰۰۰). "TBM tunnelling in jointed and faulted rock". CRC Press.

Benardos, A. G., & Kaliampakos, D. C. (۲۰۰۴). “A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunneling- illustrated by the Athens Metro, Greece”. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, ۴۱(۶), ۹۸۷-۹۹۹.

Bieniawski, Z. T. (۱۹۸۹). “Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering”. John Wiley & Sons.

Bruland, A. (۱۹۹۸). “Hard rock tunnel boring”, NTNU.

Castaldini, D., Genevois, R., Panizza, M., Puccinelli, A., Berti, M., & Simoni, A. (۱۹۹۸). “An integrated approach for analysing earthquake-induced surface effects: a case study from the Northern Apennines, Italy”. *Journal of Geodynamics*, ۲۶(۲), ۴۳-۴۴۱.

Ceryan, N., & Ceryan, S. (۲۰۰۸). “An application of the interaction matrices method for slope failure susceptibility zoning: Dogankent settlement area (Giresun, NE Turkey)”. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, ۶۷(۳), ۳۷۵-۳۸۵.

Condor, J., & Asghari, K. (۲۰۰۹). “An alternative theoretical methodology for monitoring the risks of CO<sub>۲</sub> leakage from wellbores”. *Energy Procedia*, ۱(۱), ۲۵۹۹-۲۶۰۵.

Deere, D. U., & Miller, R. P. (۱۹۶۶). *Engineering classification and index properties for intact rock*. ILLINOIS UNIV AT URBANA DEPT OF CIVIL ENGINEERING.

De Pippo, T., Donadio, C., Pennetta, M., Petrosino, C., Terlizzi, F., & Valente, A. (۲۰۰۸). “Coastal hazard assessment and mapping in Northern Campania, Italy”. *Geomorphology*, ۹۷(۳), ۴۵۱-۴۶۶.

Delisio, A., Zhao, J., & Einstein, H. H. (۲۰۱۳). “Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Lötshberg Base Tunnel”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, ۳۳, ۱۳۱-۱۴۲.

Edelbro, C. (۲۰۰۳). “Rock mass strength”. Lulea University of technology.

Eide, L. N. R. (۲۰۱۴). “TBM Tunnelling at the Stillwater Mine”.

Faramarzi, F., Farsangi, M. E., & Mansouri, H. (۲۰۱۳). “An RES-based model for risk

assessment and prediction of backbreak in bench blasting”. *Rock mechanics and rock engineering*, 46(2), 177-187.

Ferentinou, M. D., Hasiotis, T., & Sakellariou, M. G. (2010). “Clustering of Geotechnical Properties of Marine Sediments Through Self-Organizing Maps: An Example from the Zakynthos Canyon-Valley System, Greece”. In *Submarine Mass Movements and Their Consequences* (pp. 43-54). Springer Netherlands.

Ferentinou, M., Hasiotis, T., & Sakellariou, M. (2012). “Application of computational intelligence tools for the analysis of marine geotechnical properties in the head of Zakynthos canyon, Greece”. *Computers & Geosciences*, 40, 166-174.

Frough, O & Torabi, S.R. (2013). "An application of rock engineering systems for estimating TBM downtimes".

Gong, Q., & Zhao, J. (2009). “Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction”. *International journal of Rock mechanics and mining sciences*, 46(1), 1-11.

Hamidi, J. K., Shahriar, K., Rezai, B., & Rostami, J. (2010). " Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2), 233-240.

Headquarters, U. S. Army Corps of Engineers (USACE). (1997). “Engineering and Design; Monitoring Completed Navigation Projects”. ER-1110-2-1101, Washington, DC.

Huang, Y. (1997). “Application of artificial neural networks to rock engineering problems”.

Hudson, J. (1992). “Rock engineering systems”. *Theory and practice*.

Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1992). “A new approach to studying complete rock engineering problems”. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 25(2), 93-100.

Hudson, J. A., Sheng, J., & Arnold, P. N. (1992). “Rock engineering risk assessment through critical mechanism and parameter evaluation”. In *Proceeding of 11th. Australia–New Zealand conference on Geomech* (pp. 442-447).

- Jiao, Y. (1995). "Formalising the systems approach to rock engineering, (Doctoral dissertation, Imperial College London (University of London))".
- Jiao, Y., & Hudson, J. A. (1990, July). "The fully-coupled model for rock engineering systems". In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 32, No. 0, pp. 491-512). Pergamon.
- Kalamaras, G. S. (1997). "A computer-based system for supporting decisions for tunneling in rock under conditions of uncertainty". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3), 147-61.
- Kahraman, S. (2002). Correlation of TBM and drilling machine performances with rock brittleness. *Engineering Geology*, 60(4), 269-283.
- Latham, J. P., & Lu, P. (1999). "Development of an assessment system for the blastability of rock masses". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(1), 41-50.
- Lu, P., & Latham, J. P. (1994, September). "A continuous quantitative coding approach to the interaction matrix in rock engineering systems based on grey systems approaches". In *Proceedings of 9th international congress of the IAEG, Lisbon, Portugal* (pp. 4761-4770).
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., & Herrenknecht, M. (2008). "Hardrock tunnel boring machines". John Wiley & Sons.
- Malkawi, A. I. H., Hassan, W. F., & Abdulla, F. A. (2000). "Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability". *Structural Safety*, 22(2), 161-187.
- Mazzoccola, D. F., & Hudson, J. A. (1996). "A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability". *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 29(1), 37-56.
- Naghadehi, M. Z., Jimenez, R., KhaloKakaie, R., & Jalali, S. M. E. (2011). A probabilistic systems methodology to analyze the importance of factors affecting the stability of rock slopes. *Engineering Geology*, 114(3), 82-92.
- Ozdemir, L. (2007). "Development of theoretical equations for predicting tunnel boreability".

Palmstrøm, A. (1996). "Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass index (RMI)". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2), 109-118.

Ramezanzadeh, A., Rostami, J., & Tadic, D. (2008). "Impact of rock mass characteristics on hard rock TBM performance". In *17th Australian tunneling conference, Melbourne, Australia* (pp. 213-222).

Rostami, J. (1997). "Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure (Doctoral dissertation, Colorado School of Mines)".

Rostami, J., & Ozdemir, L. (1993, June). "A new model for performance prediction of hard rock TBMs". In *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference* (pp. 493-493).

Rozos, D., Bathrellos, G. D., & Skillodimou, H. D. (2011). "Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: a case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, Greece". *Environmental Earth Sciences*, 63(1), 49-63.

Rozos, D., Pyrgiotis, L., Skias, S., & Tsagaratos, P. (2008). "An implementation of rock engineering system for ranking the instability potential of natural slopes in Greek territory". An application in Karditsa County. *Landslides*, 5(3), 261-270.

Shang, Y. J., Wang, S. J., Li, G. C., & Yang, Z. F. (2000). "Retrospective case example using a comprehensive suitability index (CSI) for siting the Shisan-Ling power station, China". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(5), 839-853.

Shang, Y., Park, H. D., & Yang, Z. (2005). "Engineering geological zonation using interaction matrix of geological factors: An example from one section of Sichuan-Tibet Highway". *Geosciences Journal*, 9(4), 370-387.

Shin, H. S., Kwon, Y. C., Jung, Y. S., Bae, G. J., & Kim, Y. G. (2009). "Methodology for quantitative hazard assessment for tunnel collapses based on case histories in



Korea". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(7), 1072-1087.

Strength of rocks at depth". In: Maury & Fourmaintraux eds. *Rock at great depth*. (1989).  
*Rotterdam: A. A. Balkema*. 37-44

Skagius, K., Wiborgh, M., Ström, A., & Morén, L. (1997). "Performance assessment of the geosphere barrier of a deep geological repository for spent fuel: the use of interaction matrices for identification, structuring and ranking of features, events and processes". *Nuclear engineering and design*, 176(1), 100-162.

Smith, G. J. (1994). "The engineering geological assessment of shallow mine workings with particular reference to chalk (Doctoral dissertation, Dissertation, University of London)".

van Dorp, F., Egan, M., Kessler, J. H., Nilsson, S., Pinedo, P., Smith, G., & Torres, C. (1998). Biosphere modelling for the assessment of radioactive waste repositories; the development of a common basis by the BIOMOVs II reference biospheres working group. *Journal of environmental radioactivity*, 32(2), 220-236.

Yagiz, S. (2002). "Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM Model basic penetration for hard rock tunneling machines (Doctoral dissertation, Colorado School of Mines)".



پوست

نتایج نظر سنجی از متخصصین به شکل ماتریس اندرکنش آورده شده است.

سعید میر محرابی، کارشناس ارشد موسسه مهندسیین مشاور ساحل

برعت چرخش	۲	۳	۳	۴	۳	۰	۰	۰	۱	۳	۰	۰	۰
۳	فاصله دیسک کاترها	۲	۲	۱	۲	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۰	۰
۳	۲	نیروی تراست هر تیغه برشی	۳	۴	۲	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۰	۰
۴	۳	۳	گشتاور دستگاه	۴	۳	۰	۱	۰	۱	۱	۲	۰	۰
۴	۳	۴	۴	توان الکتریکی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۴	۳	۳	۲	مقاومت تراکمی تک محوره	۱	۲	۱	۳	۲	۲	۰	۰
۳	۳	۲	۲	۲	۲	مقاومت کششی	۲	۱	۲	۲	۳	۰	۰
۲	۳	۳	۲	۲	۳	۲	درزه ها و شکستگی ها	۳	۳	۴	۴	۰	۰
۰	۰	۳	۱	۰	۴	۴	۳	هوازگی	۰	۱	۱	۱	۱
۱	۲	۴	۳	۲	۳	۳	۳	۱	امتداد ناپیوستگی ها	۳	۲	۰	۰
۳	۴	۴	۳	۳	۲	۳	۴	۲	۲	شاخص شکنندگی	۳	۰	۰
۲	۰	۲	۳	۲	۳	۲	۴	۳	۲	۳	آب زیرزمینی	۰	۰
۱	۱	۱	۱	۰	۳	۲	۰	۱	۰	۴	۲	وجود کانیهای ساینده	۰
۳	۰	۴	۴	۳	۰	۰	۴	۰	۴	۲	۴	۱	سینه کار مختلط

محمد فروغی، کارشناس ارشد موسسه مهندسی مشاور ساحل

سرعت چرخش	۳	۴	۳	۴	۳	۰	۰	۰	۳	۳	۰	۰	۰
فاصله دیسک کاترها	۴	۴	۴	۱	۳	۰	۰	۰	۱	۳	۰	۰	۰
نیروی تراست هر تیغه برشی	۳	۴	۴	۴	۴	۰	۱	۰	۴	۳	۰	۰	۰
گشتاور دستگاه	۴	۳	۴	۴	۳	۱	۱	۰	۴	۰	۰	۰	۰
توان الکتریکی	۴	۲	۴	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مقاومت تراکمی تک محوره	۴	۳	۴	۴	۲	۱	۲	۲	۰	۴	۰	۰	۰
مقاومت کششی	۴	۳	۳	۴	۳	۱	۳	۲	۲	۴	۲	۰	۰
درزه ها و شکستگی ها	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۳	۲	۳	۳	۴	۰	۰
هوازدهی	۰	۰	۲	۱	۰	۳	۳	۰	۲	۲	۲	۱	۰
امتداد ناپیوستگی ها	۲	۱	۴	۳	۱	۰	۰	۲	۱	۲	۰	۰	۰
شاخص شکنندگی	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰
آب زیرزمینی	۴	۱	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۰	۲	۰	۰	۰
وجود کانیهای ساینده	۴	۱	۴	۴	۱	۰	۰	۱	۰	۴	۰	۰	۰
سینه کار مختلط	۳	۰	۳	۳	۲	۲	۱	۰	۰	۳	۱	۱	۰

امیرمحمد رضی، کارشناس ارشد موسسه مهندسین مشاور ساحل

سرعت چرخش	۲	۳	۴	۴	۳	۳	۳	۰	۲	۲	۳	۰	۰
فاصله دیسک کاترها	۲	۰	۲	۲	۲	۲	۲	۰	۱	۲	۰	۰	۰
نیروی تراست هر تیغه برشی	۴	۳	۴	۴	۴	۳	۳	۰	۲	۲	۱	۰	۰
گشتاور دستگاه	۴	۲	۴	۴	۲	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲
توان الکتریکی	۴	۲	۴	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مقاومت تراکمی تک محوره	۰	۰	۰	۰	۳	۲	۲	۲	۰	۴	۰	۲	۲
مقاومت کششی	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۲	۲	۰	۴	۰	۲	۲
درزه ها و شکستگی ها	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۳	۰	۰	۰	۲	۲
هوازگی	۰	۰	۳	۳	۰	۴	۴	۲	۰	۲	۲	۱	۰
امتداد ناپیوستگی ها	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۳	۰	۰	۰	۲	۲
شاخص شکنندگی	۰	۰	۰	۰	۳	۴	۴	۲	۱	۰	۱	۰	۰
آب زیرزمینی	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۳	۴	۰	۳	۱	۳
وجود کانیهای ساینده	۴	۰	۴	۴	۱	۴	۴	۴	۳	۴	۳	۳	۱
سینه کار مختلط	۴	۰	۴	۴	۳	۱	۳	۴	۲	۴	۳	۴	۲

مجید تاجیک، کارشناس ارشد موسسه مهندسی مشاور ساحل

سرعت چرخش	۰	۰	۲	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۲	فاصله داری تیغه	۳	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۲	۲	نیروی تراست هر تیغه برشی	۲	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۳	۲	۲	گشتاور	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۴	۰	۴	۴	توان الکتریکی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۴	۴	۴	۴	۳	مقاومت تراکمی تک محوره	۳	۳	۲	۱	۴	۲	۰	۰	
۴	۴	۴	۳	۳	۲	مقاومت کششی	۴	۲	۲	۴	۲	۰	۰	
۱	۴	۲	۲	۴	۱	۱	درزه ها و شکستگی ها	۳	۴	۳	۴	۰	۰	
۰	۰	۳	۳	۰	۴	۴	۲	هوازدگی	۰	۳	۱	۰	۰	
۳	۲	۳	۳	۱	۰	۰	۳	۳	۳	امتداد ناپیوستگی ها	۱	۴	۰	۲
۲	۳	۳	۳	۲	۱	۲	۳	۱	۰	شاخص شکنندگی	۲	۰	۱	
۲	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۳	۴	۰	آب زیرزمینی	۳	۰	۰	
۱	۰	۱	۱	۱	۲	۱	۰	۳	۰	۴	۰	وجود کانیهای ساینده	۰	
۳	۰	۴	۴	۳	۲	۲	۱	۲	۰	۴	۱	۱	سینه کار مختلط	

محمد یعقوبی، کارشناس QC حفاری مکانیزه مترو شهر مشهد

سرعت چرخش	۲	۴	۴	۳	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰
فاصله داری تیغه	۳	۲	۲	۳	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰
نیروی تراست هر تیغه برشی	۴	۳	۴	۴	۱	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰
گشاور	۴	۲	۴	۴	۱	۱	۲	۰	۱	۲	۱	۰	۰
توان الکتریکی	۴	۰	۳	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مقاومت تراکمی تک محوره	۲	۱	۴	۳	۲	۲	۴	۲	۳	۴	۲	۰	۰
مقاومت کششی	۳	۱	۳	۲	۲	۲	۴	۲	۳	۴	۲	۰	۰
درزه ها و شکستگی ها	۳	۴	۲	۲	۳	۳	۲	۳	۲	۳	۳	۰	۰
هوازگی	۰	۰	۳	۱	۰	۴	۴	۳	۰	۱	۱	۱	۱
امتداد ناپیوستگی ها	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۱	۳	۲	۲	۰	۱
شاخص شکنندگی	۳	۱	۳	۳	۳	۲	۲	۱	۲	۱	۰	۰	۲
آب زیرزمینی	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۴	۲	۳	۰	۰
وجود کانیهای ساینده	۰	۰	۳	۰	۱	۴	۳	۰	۳	۰	۴	۰	۰
سینه کار مختلط	۳	۰	۳	۳	۳	۰	۰	۳	۰	۲	۳	۲	۰



عطار، کارشناس ارشد و سرپرست حفاری مکانیزه مترو شهر مشهد

سرعت چرخش	۱	۲	۴	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۰	۰
فاصله داری تیغه	۴	۳	۲	۲	۰	۱	۱	۰	۰	۲	۱	۰	۰
نیروی تراست هر تیغه برشی	۴	۴	۳	۳	۰	۱	۱	۰	۰	۳	۲	۰	۰
گشتاور	۳	۴	۴	۴	۰	۱	۱	۰	۰	۳	۲	۰	۰
توان الکتریکی	۳	۳	۳	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مقاومت تراکمی تک محوره	۳	۳	۲	۳	۲	۴	۲	۳	۴	۲	۰	۰	۰
مقاومت کششی	۳	۳	۲	۳	۲	۴	۲	۳	۴	۲	۰	۰	۰
درزه ها و شکستگی ها	۳	۳	۲	۴	۳	۳	۳	۳	۲	۳	۰	۰	۰
هوازدهی	۰	۲	۱	۰	۳	۳	۳	۰	۳	۱	۰	۰	۰
امتداد ناپیوستگی ها	۲	۲	۲	۰	۲	۲	۱	۳	۲	۳	۰	۱	۱
شاخص شکنندگی	۴	۴	۳	۲	۳	۳	۲	۱	۳	۳	۰	۲	۲
آب زیرزمینی	۲	۳	۲	۱	۳	۳	۱	۴	۲	۲	۰	۰	۰
وجود کانیهای ساینده	۱	۴	۰	۰	۴	۲	۰	۳	۰	۴	۰	۰	۰
سینه کار مختلط	۳	۴	۳	۳	۰	۰	۳	۲	۲	۴	۴	۲	۰

شیخی، مسئول حفاری مکانیزه تونل انتقال آب گلاب اصفهان

سرعت چرخش	۲	۳	۳	۳	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰
فاصله داری تیغه	۴	۲	۲	۳	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰
نیروی تراست هر تیغه برشی	۳	۴	۴	۴	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۲	۰	۰
گشتاور	۴	۳	۳	۴	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۲	۰	۰
توان الکتریکی	۴	۰	۴	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مقاومت تراکمی تک محوره	۳	۱	۴	۲	۲	۲	۴	۱	۳	۴	۲	۰	۰
مقاومت کششی	۴	۲	۳	۲	۲	۲	۴	۱	۲	۴	۲	۰	۰
درزه ها و شکستگی ها	۳	۳	۲	۱	۳	۲	۳	۲	۲	۲	۳	۰	۰
هوازدگی	۰	۰	۳	۳	۰	۴	۴	۲	۰	۱	۱	۱	۰
امتداد ناپیوستگی ها	۱	۲	۳	۲	۲	۲	۳	۲	۱	۲	۲	۰	۱
شاخص شکنندگی	۳	۱	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۲	۰	۲
آب زیرزمینی	۲	۲	۲	۲	۱	۲	۳	۱	۳	۲	۳	۰	۰
وجود کانیهای ساینده	۱	۱	۰	۰	۱	۲	۱	۰	۱	۰	۴	۰	۰
سینه کار مختلط	۳	۰	۳	۳	۳	۲	۲	۱	۰	۰	۳	۴	۲

دکتر سید رحمان ترابی، استاد راهنما

سرعت چرخش	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	فاصله داری تیغه	۱	۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۲	نیروی تراست هر تیغه برشی	۱	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱	۱	۰	گشتاور	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۰	۴	۴	توان الکتریکی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱	۲	۱	۱	۲	مقاومت تراکمی تک محوره	۱	۰	۲	۰	۱	۰	۰	۰
۱	۱	۲	۲	۲	مقاومت کششی	۱	۰	۲	۰	۱	۰	۰	۰
۱	۱	۱	۱	۲	۰	۰	دوزه ها و شکستگی ها	۴	۰	۰	۲	۰	۰
۲	۰	۲	۲	۰	۳	۳	۳	هوازدهی	۰	۲	۲	۱	۱
۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	امتداد نایبوستگی ها	۰	۰	۰	۲
۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	شاخص شکنندگی	۰	۰	۱
۰	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۰	۴	۰	۳	آب زیرزمینی	۰	۰
۱	۰	۱	۰	۲	۲	۱	۰	۲	۰	۴	۰	وجود کانیهای ساینده	۰
۳	۰	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۲	۰	۴	۱	۱	سینه کار مختلط

دکتر مسعود زارع، استاد مشاور

سرعت چرخش	۰	۰	۲	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	فاصله داری تیغه	۳	۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۲	نیروی تراست هر تیغه برشی	۲	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۲	۲	گشتاور	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۳	۴	توان الکتریکی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۴	۴	۴	۳	مقاومت تراکمی تک محوره	۳	۳	۲	۱	۴	۲	۰	۰
۴	۴	۴	۳	۴	۲	مقاومت کششی	۴	۲	۲	۴	۲	۰	۰
۱	۴	۲	۲	۳	۱	۱	درزه ها و شکستگی ها	۳	۴	۳	۴	۰	۰
۰	۰	۳	۳	۰	۴	۴	۲	هوازدهی	۰	۳	۱	۰	۰
۳	۲	۳	۳	۳	۰	۰	۳	۳	امتداد ناپیوستگی ها	۱	۴	۰	۲
۲	۳	۳	۳	۳	۱	۲	۳	۱	۰	شاخص شکنندگی	۲	۰	۱
۲	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۳	۴	۰	۳	آب زیرزمینی	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۱	۲	۱	۰	۳	۰	۴	۰	وجود کانیهای ساپنده	۰
۰	۰	۰	۰	۱	۲	۲	۱	۲	۰	۴	۱	۱	سینه کار مختلط

رامین کریمی، محقق پژوهش

سرعت چرخش	۱	۱	۴	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
۲	فاصله داری تیغه	۱	۲	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
۲	۲	نیروی تراست هر تیغه برشی	۲	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰
۲	۲	۴	گشتاور	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰
۲	۰	۳	۳	توان الکتریکی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۲	۳	۲	۳	مقاومت تراکمی تک محوره	۲	۳	۲	۰	۴	۲	۰	۰
۳	۳	۳	۲	۳	۲	مقاومت کششی	۴	۲	۰	۳	۱	۰	۰
۳	۱	۳	۱	۲	۳	۳	درزه ها و شکستگی ها	۴	۳	۱	۳	۰	۰
۲	۰	۲	۲	۰	۳	۳	۳	هوازگی	۰	۲	۲	۱	۱
۲	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۰	امتداد ناپیوستگی ها	۲	۳	۰	۲
۴	۳	۴	۳	۱	۳	۳	۲	۱	۱	شاخص شکنندگی	۱	۰	۰
۲	۱	۳	۱	۱	۳	۳	۳	۴	۱	۲	آب زیرزمینی	۰	۰
۱	۰	۳	۰	۰	۲	۱	۰	۲	۰	۴	۰	وجود کانیهای ساینده	۰
۳	۰	۴	۳	۲	۲	۲	۱	۲	۰	۴	۳	۱	سینه کار مختلط

## Abstract

### **Hard Rock TBM Performance Prediction Using the Rock Engineering Systems (RES) Approach**

Tunnel Boring Machine (TBM) performance prediction is one of the most important procedures to evaluate the time and cost of tunneling projects. In this research, TBM penetration rate was predicted by Deterministic and Probabilistic Rock Engineering System (RES) methods based on a database developed along the 1.5 KM long Karaj-Tehran water conveyance tunnel. In this respect, nine input parameters belonging to the geology condition and five parameters belonging to the TBM were selected and included in the models. Geological parameters consist of UCS, BTS, number of joint per volume, the angle between discontinuities and tunnel axis weathering, brittle index, ground water condition, mixed face and quartz content and TBM parameters consist of cutterhead speed (RPM), the spacing of cutters, thrust force, torque and power.

The results obtained from Deterministic and RES models to predict the penetration rate and its comparison with measured penetration rate in the field showed a good compatibility in some sections along the tunnel. The correlation coefficients were 0.88 and 0.90 for Deterministic and RES models, respectively. The overall outcome showed that the TBM performance is a nonlinear and complex problem.

Key words: TBM performance, Geological parameters, TBM parameters, Penetration rate, Probabilistic, RES Deterministic and Probabilistic RES models.



**University of Shahrood**

**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics**

**Hard Rock TBM Performance Prediction Using the Rock  
Engineering Systems (RES) Approach**

**Ramin Karimi Datgerdi**

**Supervisor(s):**

**Dr. S. R. Torabi**

**Dr. H. Mirzaei**

**September ۲۰۱۵**