

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مکانیک سنگ

برآورد ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم با استفاده از رویکرد سیستم‌های

مهندسی سنگ

پژوهشگر:

عماد خراسانی

اساتید راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر شکرالله زارع

اساتید مشاور:

دکتر مسعود زارع

دکتر صادق طریق ازلی

پایان‌نامه‌ی دوره‌ی کارشناسی ارشد به منظور اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۲



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:  
تاریخ:  
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای عماد خراسانی رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان برآورد ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ که در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: بسیار ممتاز - ۱۸)  دفاع مجدد  مردود

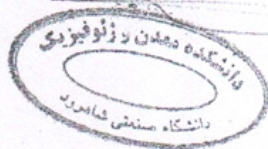
۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر شکرالله زارع	۲- استاد راهنما
	دانشیار	دکتر فرهنگ سرشکی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استاد	دکتر سید رحمان ترابی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر حسین میرزایی نصیرآباد	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده: دکتر رضا قوامی ربانی



تقدیم به...

پدر بزرگوارم،

و مادر پر مهر و فداکارم

که در هر لحظه پشتیبانم بودند.

سپاس می‌گوییم...

آنکه خدای خوبی‌هاست،

دانای زیبایی‌هاست،

و دانش‌آفرین هستی بی‌انتهاست.

و سپاس می‌گوییم

اساتید راهنمای ارجمندم، جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر شکرالله زارع که

راهنمایی‌های ارزنده‌ی ایشان در همه‌ی مراحل چراغ راه برایم بود و اساتید مشاور جناب آقای دکتر

مسعود زارع و دکتر صادق طریق ازلی که تفکر خلاقشان موجب حرکت قدم‌هایم در این مسیر شد.

و سپاس صمیمانه از دوست عزیزم جناب آقای مهندس رامین عبدالکریم که با راهنمایی‌های بی‌دریغش،

مرا یاری نمود.

## تعهد نامه

اینجانب عماد خراسانی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن- مکانیک سنگ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی برآورد ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر شکرالله زارع متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است.
- کلیه‌ی 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 پایان‌نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی 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

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

## چکیده

با توجه به رشد روز افزون جمعیت و در نتیجه ترافیک شهری، لزوم استفاده از وسایل حمل و نقل ریلی به سرعت در حال گسترش است. امروزه سازه‌های زیرزمینی به ویژه تونل‌ها نقش مهمی در توسعه حمل و نقل شهری ایفا می‌کنند. روش‌های مختلفی به منظور حفر و احداث تونل‌ها اعم از تونل‌های شبکه مترو، راه آهن، انتقال آب، صنعتی، معدنی و غیره وجود دارد. این روش‌ها به دو دسته کلی حفاری سنتی و مکانیزه طبقه‌بندی می‌شوند. روش عمده‌ی تونل‌سازی مکانیزه در محیط‌های شهری که عمدتاً متشکل از زمین‌های آبرفتی هستند، استفاده از TBM است. یکی از عوامل مهم در تصمیم‌گیری مدیران پروژه و مهندسان طراح در مرحله‌ی مطالعات امکان‌پذیری و طراحی، ضریب بهره‌وری TBM است. ضریب بهره‌وری درصدی از زمان است که دستگاه صرف حفاری می‌کند. از جمله موارد موثر بر فرآیند تونل‌سازی و ضریب بهره‌وری در زمین‌های نرم و به ویژه محیط‌های شهری، عوامل ژئوتکنیکی، معارضات شهری (محیطی)، عوامل مربوط به طراحی است. در پایان‌نامه‌ی حاضر به بررسی تاثیر عوامل ذکر شده بر ضریب بهره‌وری TBM در تونل‌سازی در زمین‌های نرم و به ویژه محیط‌های شهری پرداخته می‌شود. به این منظور قطعه شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران به طور خاص مورد بررسی قرار می‌گیرد. ماشین مورد استفاده در این پروژه، TBM نوع فشار تعادلی زمین (EPB) است. به منظور تحلیل این مساله از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) استفاده می‌شود. عوامل موثر در نظر گرفته شده در این پژوهش شامل ۱۴ مورد است که برای کدگذاری ماتریس اندرکنش ایجاد شده، روش کدگذاری نیمه عددی خبره‌ی احتمالاتی (PESQ) مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از رویکرد RES، شاخصی تحت عنوان شاخص بهره‌وری در طول مسیر تونل محاسبه شده و با ضریب بهره‌وری حاصل از زمان‌های پروژه مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از این مقایسه به صورت رابطه‌ای لگاریتمی با ضریب تعیین  $R^2 = 0.724$  بوده و

می‌توان با استفاده از این رابطه مقادیر ضریب بهره‌وری را برای ادامه‌ی مسیر تونل مورد مطالعه محاسبه

کرد. همچنین نتایج این پژوهش قابلیت کاربرد در پروژه‌های مشابه را دارد.

**کلمات کلیدی:** بهره‌وری TBM، زمین‌های نرم، رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)، روش

کدگذاری PESQ، قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران



# فهرست مطالب

## فصل اول: کلیات پژوهش

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۲-۱- هدف از تحقیق ..... ۳
- ۳-۱- روش انجام پژوهش ..... ۴
- ۴-۱- نوآوری‌های پژوهش ..... ۶
- ۵-۱- سازماندهی پایان‌نامه ..... ۷

## فصل دوم: رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۰
- ۲-۲- تفکر سیستمی ..... ۱۱
- ۳-۲- رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) ..... ۱۲
- ۱-۳-۲- کدگذاری ماتریس اندرکنش ..... ۱۴
- ۲-۳-۲- نمودار علت-اثر ..... ۱۶
- ۴-۲- سابقه‌ی استفاده از رویکرد RES در کاربردهای مختلف ..... ۱۸
- ۵-۲- روش‌های کدگذاری ماتریس اندرکنش ..... ۲۳
- ۱-۵-۲- استفاده از نظریه‌ی سیستم‌های خاکستری ..... ۲۳
- ۲-۴-۲- استفاده از نظریه‌ی گراف ..... ۲۶
- ۳-۴-۲- استفاده از طرح شناخت فازی ..... ۲۸
- ۴-۴-۲- استفاده از شبکه‌های عصبی ..... ۲۹

۳۱..... استفاده از نظریه‌ی احتمالات..... ۲-۴-۵.....

۳۵..... جمع‌بندی..... ۲-۶.....

### فصل سوم: معرفی پروژه‌ی قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۲ متروی تهران

۳۷..... مقدمه..... ۳-۱.....

۳۷..... موقعیت جغرافیایی پروژه..... ۳-۲.....

۳۸..... مشخصات مسیر تونل مورد مطالعه..... ۳-۳.....

۳۹..... زمین‌شناسی مسیر تونل..... ۳-۴.....

۴۱..... روش حفاری تونل..... ۳-۵.....

۴۳..... پهنه‌بندی مسیر تونل..... ۳-۶.....

۴۴..... جمع‌بندی..... ۳-۷.....

### فصل چهارم: عوامل موثر بر بهره‌وری ماشین خرتونل تمام مقطع در زمین‌های نرم

۴۶..... مقدمه..... ۴-۱.....

۴۷..... مفهوم بهره‌وری TBM..... ۴-۲.....

۵۰..... عوامل موثر بر بهره‌وری TBM..... ۴-۳.....

۵۱..... عوامل مربوط به زمین..... ۴-۳-۱.....

۵۱..... دانه‌بندی خاک..... ۴-۳-۱-۱.....

۵۳..... شاخص استحکام..... ۴-۳-۱-۲.....

۵۵..... سینه‌کار مختلط..... ۴-۳-۱-۳.....

۵۷..... انسداد..... ۴-۳-۱-۴.....

- ۵۹..... ۴-۳-۱-۵- آب ورودی به تونل
- ۶۱..... ۴-۳-۱-۶- ساینده‌گی خاک
- ۶۵..... ۴-۳-۱-۷- وجود قطعه سنگ
- ۶۷..... ۴-۳-۱-۸- فشار زمین
- ۷۰..... ۴-۳-۲- عوامل محیطی
- ۷۰..... ۴-۳-۱-۱- برخورد با معارضان زیرزمینی
- ۷۲..... ۴-۳-۲- عبور از زیر سازه‌های سطحی
- ۷۳..... ۴-۳-۳- عوامل مربوط به طراحی
- ۷۳..... ۴-۳-۱- نسبت عمق (ضخامت روباره) به قطر تونل
- ۷۴..... ۴-۳-۲- شیب تونل
- ۷۵..... ۴-۳-۳- قوس مسیر تونل
- ۷۶..... ۴-۳-۴- عامل انسانی
- ۷۸..... ۴-۴- جمع‌بندی

### فصل پنجم: برآورد ضریب بهره‌وری ماشین خرد تونل تمام مقطع در زمین‌های نرم

- ۸۰..... ۵-۱- مقدمه
- ۸۱..... ۵-۲- تحلیل اندرکنش عوامل با استفاده از رویکرد RES
- ۸۱..... ۵-۲-۱- کدگذاری ماتریس اندرکنش
- ۱۰۲..... ۵-۲-۲- تعیین وزن عوامل
- ۱۱۹..... ۵-۳- برآورد شاخص بهره‌وری
- ۱۳۱..... ۵-۴- اعتبارسنجی
- ۱۳۲..... ۵-۵- جمع‌بندی

## فصل ششم: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۱-۶- جمع‌بندی ..... ۱۳۵

۲-۶- نتایج ..... ۱۳۶

### منابع

منابع فارسی ..... ۱۴۰

منابع لاتین ..... ۱۴۱

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- مراحل انجام پژوهش ..... ۵
- شکل ۱-۲- مفهوم تفکر سیستمی ..... ۱۱
- شکل ۲-۲- مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها ..... ۱۲
- شکل ۳-۲- مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی شامل دو عامل A و B ..... ۱۳
- شکل ۴-۲- روش سوم کدگذاری ماتریس اندرکنش: استفاده از شیب خط نمودار  $P_i-P_j$  ..... ۱۵
- شکل ۵-۲- نحوه‌ی شکل‌گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش ..... ۱۷
- شکل ۶-۲- نمونه‌ای از یک ماتریس اندرکنش  $2 \times 2$  کدگذاری شده و نمودار علت-اثر آن ..... ۱۷
- شکل ۷-۲- مقایسه نتایج حاصل از روش کدگذاری (الف) ESQ و (ب) CQC ..... ۲۵
- شکل ۸-۲- خط سیرهای ساز و کار برای یک ماتریس با ۵ عامل ..... ۲۶
- شکل ۹-۲- شبکه‌ی ساز و کارهای میان چند عامل در مدل تمام مرتبط ..... ۲۷
- شکل ۱۰-۲- ارزیابی طرح شناخت فازی برای سه عامل ساختار سنگ، تنش‌های برجا و جریان آب ..... ۲۸
- شکل ۱۱-۲- مقایسه‌ی پیش‌بینی نرخ پیشروی روش‌های RMR و FCM با مقادیر واقعی ..... ۲۹
- شکل ۱۲-۲- بکارگیری شبکه‌های عصبی در کدگذاری ماتریس اندرکنش ..... ۳۰
- شکل ۱۳-۲- نمودار علت-اثر عامل ۵ (هوازدگی) ..... ۳۴
- شکل ۱۴-۲- میانگین و محدوده‌ی انحراف معیار اندرکنش ۱۰ عامل موثر بر پایداری شیب ..... ۳۴
- شکل ۱-۳- پلان قطعه‌ی شرقی-غربی تونل خط ۷ متروی تهران و موقعیت ایستگاه‌ها ..... ۳۸
- شکل ۲-۳- قطعه بندی مسیر تونل شرقی-غربی خط ۷ مترو تهران ..... ۴۱
- شکل ۱-۴- مفهوم تعاریف مختلف از ضریب بهره‌وری ..... ۴۷
- شکل ۲-۴- توزیع آماری دانه‌بندی خاک برای پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار (DAUB, 2010) ..... ۵۳
- شکل ۳-۴- توزیع آماری شاخص استحکام در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار (Bell, 2000) ..... ۵۵
- شکل ۴-۴- توزیع آماری سینه‌کار مختلط در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارزیابی شده در جدول ۴-۵ ..... ۵۶
- شکل ۵-۴- مخاطره‌ی انسداد برای تمامی داده‌های مسیر تونل بر اساس معیار (Thewes and Burger, 2004) ..... ۵۸

- شکل ۴-۶- توزیع آماری مخاطره‌ی انسداد در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۶..... ۵۹
- شکل ۴-۷- توزیع آماری آب ورودی به تونل در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۷... ۶۱
- شکل ۴-۸- رده‌بندی خاک با هدف برآورد پتانسیل ساینده‌گی خاک بر اساس D50..... ۶۳
- شکل ۴-۹- توزیع آماری ساینده‌گی خاک در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۸..... ۶۵
- شکل ۴-۱۰- توزیع آماری وجود قطعه سنگ در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۹.. ۶۷
- شکل ۴-۱۱- توزیع آماری فشار زمین در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۰..... ۷۰
- شکل ۴-۱۲- توزیع آماری برخورد با معارضان زیرزمینی مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۱.. ۷۱
- شکل ۴-۱۳- توزیع آماری عبور از زیر سازه‌های سطحی مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۲.. ۷۳
- شکل ۴-۱۴- توزیع آماری نسبت عمق به قطر تونل مسیر بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۳..... ۷۴
- شکل ۴-۱۵- توزیع آماری شیب تونل مسیر بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۴..... ۷۵
- شکل ۴-۱۶- توزیع آماری قوس مسیر تونل در پهنه‌های مسیر بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۵..... ۷۶
- شکل ۴-۱۷- توزیع آماری تجربه‌ی تیم اجرایی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۶.. ۷۷
- شکل ۵-۱- شدت اندرکنش پارامترهای موثر بر بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم..... ۸۶
- شکل ۵-۲- نمودار علت- اثر پارامترهای موثر بر بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم..... ۸۷
- شکل ۵-۳- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "دانه‌بندی خاک"..... ۸۸
- شکل ۵-۴- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "شاخص استحکام"..... ۸۹
- شکل ۵-۵- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "سینه‌کار مختلط"..... ۹۰
- شکل ۵-۶- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "انسداد"..... ۹۱
- شکل ۵-۷- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "آب ورودی به تونل"..... ۹۲
- شکل ۵-۸- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "ساینده‌گی خاک"..... ۹۳
- شکل ۵-۹- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "وجود قطعه سنگ"..... ۹۴
- شکل ۵-۱۰- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "فشار زمین"..... ۹۵
- شکل ۵-۱۱- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "برخورد با معارض زیرزمینی"..... ۹۶
- شکل ۵-۱۲- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "عبور از زیر سازه‌های سطحی"..... ۹۷

- شکل ۵-۱۳- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "نسبت عمق به قطر تونل" ..... ۹۸
- شکل ۵-۱۴- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "شیب تونل" ..... ۹۹
- شکل ۵-۱۵- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "قوس مسیر تونل" ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۶- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "تجربه و مهارت" ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱۷- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "دانه‌بندی خاک" ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۱۸- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "شاخص استحکام" ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱۹- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "سینه‌کار مختلط" ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۲۰- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "انسداد" ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۱- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "آب ورودی به تونل" ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۲۲- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "سایندگی خاک" ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۲۳- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "وجود قطعه سنگ" ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۲۴- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "فشار زمین" ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۲۵- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "برخورد با معارض زیرزمینی" ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۲۶- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "عبور از زیر سازه‌های سطحی" ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۲۷- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "نسبت عمق به قطر تونل" ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۲۸- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "شیب تونل" ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۲۹- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "قوس مسیر تونل" ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۳۰- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش و وزن برای پارامتر "تجربه و مهارت" ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۳۱- توزیع احتمال شاخص بهره‌وری (UI) با استفاده از روش مونت کارلو ..... ۱۲۸
- شکل ۵-۳۲- ارتباط بین شاخص بهره‌وری و ضریب بهره‌وری در بخش‌های مسیر تونل ..... ۱۳۰

## فهرست جداول

- جدول ۳-۱- مشخصات مسیر خط ۷ متروی تهران، قطعه‌ی شرقی- غربی..... ۳۹
- جدول ۳-۲- واحدهای زمین‌شناسی مهندسی (ET) تفکیک شده در مسیر تونل..... ۴۰
- جدول ۳-۳- پهنه‌بندی مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران..... ۴۴
- جدول ۴-۱- ضریب بهره‌وری پهنه‌های مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران..... ۴۸
- جدول ۴-۲- عوامل موثر بر ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم..... ۵۰
- جدول ۴-۳- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس دانه‌بندی (DAUB, 2010)..... ۵۲
- جدول ۴-۴- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس شاخص استحکام (Bell, 2000)..... ۵۴
- جدول ۴-۵- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس سینه‌کار مختلط..... ۵۶
- جدول ۴-۶- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس مخاطره‌ی انسداد (Thewes and Burger, 2004)..... ۵۹
- جدول ۴-۷- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس آب ورودی به تونل..... ۶۰
- جدول ۴-۸- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس ساینده‌گی..... ۶۴
- جدول ۴-۹- طبقه‌بندی خاک بر اساس وجود قطعه سنگ در مسیر تونل..... ۶۷
- جدول ۴-۱۰- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس فشار زمین..... ۶۹
- جدول ۴-۱۱- معیار طبقه‌بندی مسیر تونل بر اساس برخورد با معارضان زیرزمینی..... ۷۱
- جدول ۴-۱۲- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس عبور از زیر سازه‌های سطحی..... ۷۲
- جدول ۴-۱۳- معیار طبقه‌بندی مسیر تونل بر اساس نسبت عمق (روباره) به قطر تونل..... ۷۴
- جدول ۴-۱۴- معیار طبقه‌بندی مسیر تونل بر اساس شیب طولی آن..... ۷۵
- جدول ۴-۱۵- معیار طبقه‌بندی مسیر تونل بر اساس قوس آن..... ۷۶
- جدول ۴-۱۶- معیار طبقه‌بندی مسیر تونل بر اساس تجربه‌ی تیم اجرایی..... ۷۷
- جدول ۵-۱- ماتریس اندرکنش  $M_0$  برای احتمال کد صفر..... ۸۲
- جدول ۵-۲- ماتریس اندرکنش  $M_1$  برای احتمال کد ۱..... ۸۳
- جدول ۵-۳- ماتریس اندرکنش  $M_2$  برای احتمال کد ۲..... ۸۳



- جدول ۵-۴- ماتریس اندرکنش  $M_3$  برای احتمال کد ۳ ..... ۸۴
- جدول ۵-۵- ماتریس اندرکنش  $M_4$  برای احتمال کد ۴ ..... ۸۴
- جدول ۵-۶- ماتریس اندرکنش متوسط ..... ۸۶
- جدول ۵-۷- محاسبه‌ی وزن عامل شیب تونل ( $P_{12}$ ) در پژوهش حاضر ..... ۱۰۳
- جدول ۵-۸- پارامترهای آماری حاصل از مدل‌سازی احتمالاتی شاخص بهره‌وری برای پهنه‌های مسیر تونل ..... ۱۲۹
- جدول ۵-۹- مقادیر شاخص بهره‌وری و ضریب بهره‌وری پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (واقعی) ..... ۱۳۱

فصل اول

کلیات پژوهش

## ۱-۱- مقدمه

در شرایطی که جمعیت شهرها روز به روز در حال افزایش است، استفاده از فضاهای زیرزمینی بی‌تردید یکی از مفیدترین ابزارها برای حفظ و بهبود کیفیت زندگی است. زندگی شهری بدون چنین زیرساخت‌هایی پایدار نخواهد بود و در بسیاری موارد، حفر یک تونل برای غالب این زیرساخت‌ها بهترین گزینه به شمار می‌رود. بر این اساس، در حال حاضر تقاضا برای احداث تونل در محیط‌های شلوغ شهری زیاد است و این روند در آینده نیز ادامه خواهد یافت. این‌گونه محیط‌ها با محدودیت‌های کاملاً چالش‌برانگیز برای احداث فضاهای زیرزمینی همراه هستند. زیرا ماهیت بافت شهری، سازه‌ها و محیط پیرامون آن‌ها در راستای به حداقل رساندن اختلال در فعالیت‌های اماکن عمومی و تاسیسات، به الزامات عملیاتی ویژه‌ای نیاز دارند (حسینی، ۱۳۹۰).

روش‌های مختلفی به منظور حفر و احداث تونل‌ها اعم از تونل‌های شبکه مترو، راه آهن، انتقال آب، صنعتی، معدنی و غیره وجود دارد. این روش‌ها به دو دسته کلی حفاری سنتی و مکانیزه طبقه‌بندی می‌شوند. روش عمده‌ی تونل‌سازی مکانیزه در محیط‌های شهری که عمدتاً متشکل از زمین‌های آبرفتی هستند، استفاده از ماشین حفر تونل تمام مقطع (TBM<sup>۱</sup>) است. به منظور کنترل نشست سطح زمین و جلوگیری از آسیب به سازه‌های سطحی، عموماً از TBM در حالت بسته<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. دو نوع TBM که عمدتاً در این حالت به کار گرفته می‌شوند، نوع فشار تعادلی زمین (EPB<sup>۳</sup>) و دوغابی (Slurry<sup>۴</sup>) است.

یکی از عوامل مهم در تصمیم‌گیری مدیران پروژه و مهندسان طراح در مرحله‌ی مطالعات امکان‌پذیری و طراحی، ضریب بهره‌وری<sup>۵</sup> TBM با در نظر گرفتن تمامی شرایط تاثیرگذار است. از جمله موارد موثر بر فرآیند تونل‌سازی و ضریب بهره‌وری در زمین‌های نرم و به ویژه محیط‌های شهری، عوامل ژئوتکنیکی، معارضان شهری (محیطی) و عوامل مربوط به طراحی است. با توجه به این که تخمین زمان لازم برای انجام پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه وابستگی زیادی به بهره‌وری دستگاه مورد استفاده دارد و همچنین برآورد هزینه‌ها و اختصاص بودجه‌های مالی برای یک پروژه دارای ارتباط مستقیمی با مدت زمان اجرای آن پروژه است، لذا داشتن بهره‌وری دستگاه با توجه به شرایط مورد استفاده‌ی آن امری ضروری است.

## ۱-۲- هدف از پژوهش

تا کنون تحقیقات نسبتاً گسترده‌ای در زمینه‌ی پیش‌بینی عملکرد TBM در محیط‌های سنگی انجام شده و مدل‌هایی توسط برخی محققین ارائه گردیده است (Tarkoy, 1975; Ozdemir, 1977; )

<sup>۱</sup> Tunnel Boring Machine

<sup>۲</sup> Closed mode

<sup>۳</sup> Earth Pressure Balance

<sup>۴</sup> دوغابی

<sup>۵</sup> Utilization factor

Blindheim, 1979; Nelson and O'Rourke, 1983; Rostami and Ozdemir, 1993; Barton, 2000; Yagiz, 2002; Yagiz, 2006). با این حال نحوه‌ی عملکرد TBM و کارایی آن در محیط‌های شهری که عمدتاً شامل زمین‌های نرم و خاک است، کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که تا به امروز الگویی برای ارزیابی عملکرد TBM در چنین محیط‌هایی ارائه نشده است.

در این پژوهش با تمرکز بر زمین‌های نرم و عوامل مختلف تاثیرگذار بر فرآیند تونل‌سازی، به بررسی عملکرد TBM و ارزیابی ضریب بهره‌وری آن پرداخته می‌شود. تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران به عنوان مطالعه‌ی موردی پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است. ماشین مورد استفاده در این پروژه، TBM نوع EPB است. از جمله مشکلاتی که در این پروژه امکان وقوع دارد، وجود خاک‌های درشت‌دانه با پتانسیل سایندگی، خاک‌های ریزدانه با چسبندگی بالا، برخورد با قنات‌ها و چاه‌های فاضلاب در طول مسیر است که تاثیر بسزایی بر بهره‌وری دستگاه دارند.

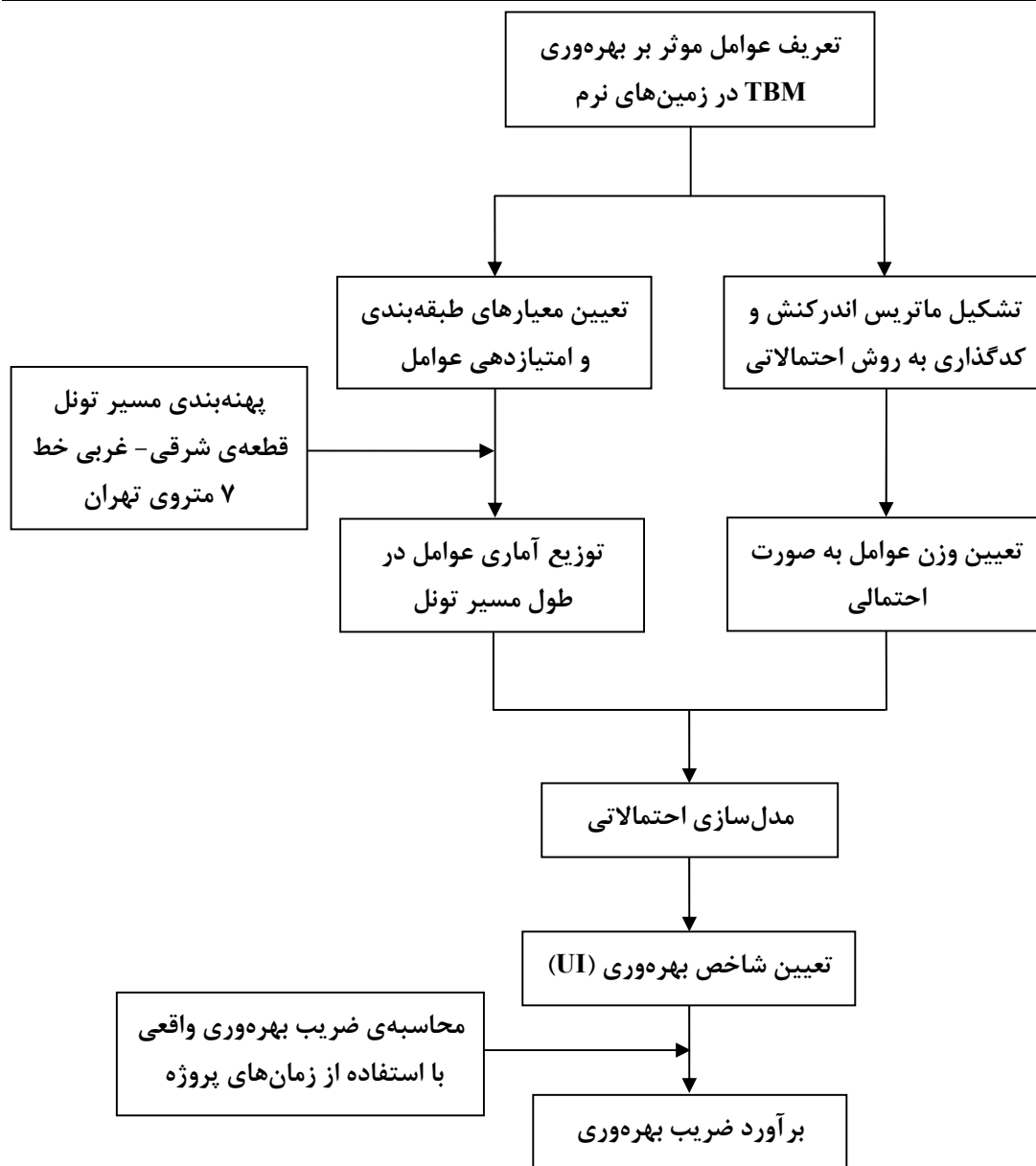
### ۱-۳- روش انجام پژوهش

در این پژوهش به منظور برآورد ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم، از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES<sup>۱</sup>) استفاده می‌شود. رویکرد RES در سال ۱۹۹۲ توسط هادسون<sup>۲</sup> ارائه شده که تا امروز کاربرد گسترده‌ای در حل مسایل ژئوتکنیکی پیدا کرده است (Hudson, 1992).

در شکل ۱-۱ مراحل انجام پژوهش حاضر نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، پس از تعیین عوامل موثر بر تونل‌سازی در زمین‌های نرم، معیارهایی برای طبقه‌بندی اطلاعات هر عامل در طول مسیر تونل مورد مطالعه تعیین می‌گردد.

<sup>۱</sup> Rock Engineering Systems

<sup>۲</sup> Hudson



شکل ۱-۱-۱- مراحل انجام پژوهش

از طرفی نیز وزن عوامل با استفاده از رویکرد RES و روش کدگذاری<sup>۱</sup> PESQ، به صورت احتمالی تعیین شده است. علت این امر کاهش خطای ناشی از قضاوت مهندسی در تعیین وزن عوامل است. با توجه به ثابت نبودن و همچنین عدم قطعیت مقادیر عوامل در طول مسیر، برای مقادیر عوامل نیز توزیع

<sup>۱</sup> Probabilistic Expert Semi-Quantitative

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 می‌شود، نتایج حاصله به صورت احتمالی خواهد بود. با مدل‌سازی احتمالاتی (و بهره‌گیری از روش مونت کارلو) به تعیین شاخص بهره‌وری پرداخته شده است. این امر موجب کاهش خطاهای ناشی از محاسبه‌ی مقادیر عوامل و خطاهای قضاوت مهندسی در تعیین وزن عوامل می‌شود.

شاخص بهره‌وری ( $UI^1$ ) با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ و مدل‌سازی احتمالاتی تعیین می‌شود و مقدار ضریب بهره‌وری ( $UF^2$ ) با توجه به زمان‌های صرف شده برای حفاری و کل زمان‌های پروژه محاسبه می‌گردد. سپس ارتباط بین این دو عامل بررسی می‌شود و با ارایه‌ی رابطه‌ای، با داشتن شاخص بهره‌وری TBM، ضریب بهره‌وری مربوطه قابل تعیین است.

## ۱-۴- نوآوری‌های پژوهش

نوآوری‌های اصلی پایان‌نامه‌ی حاضر شامل موارد ذیل است:

- تحقیق در مورد ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم،
- بهره‌گیری از روش کدگذاری احتمالی PESQ برای تشکیل ماتریس اندرکنش در رویکرد RES،
- تولید شاخص احتمالی (شاخص بهره‌وری) از مقادیر و وزن‌های احتمالی عوامل به کمک رویکرد RES و مدل‌سازی احتمالاتی.

<sup>1</sup> Utilization Index

<sup>2</sup> Utilization Factor

## ۱-۵- سازماندهی پایان نامه

به طور کلی مطالب این پایان نامه در شش فصل گردآوری شده است.

### فصل اول- کلیات پژوهش: در این فصل به ضرورت تحقیق در مورد بهره‌وری TBM در زمین‌های

نرم و به ویژه محیط‌های شهری 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 پروژه‌ی قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران: در این فصل به

معرفی مطالعه‌ی موردی پژوهش حاضر پرداخته می‌شود. همچنین مسیر تونل مورد بررسی پهنه‌بندی می‌گردد تا بتوان برای هر یک از پهنه‌های مسیر، شاخص بهره‌وری و ضریب بهره‌وری را تعیین نمود و ارتباط بین آن‌ها را به دست آورد.

### فصل چهارم- عوامل موثر بر بهره‌وری ماشین حفر تونل تمام مقطع در زمین‌های نرم: در

این فصل به بیان مفهوم ضریب بهره‌وری TBM و عوامل موثر بر آن پرداخته می‌شود. برای هر یک از عوامل نیز معیاری ارائه شده و دسته‌های هر معیار امتیازبندی می‌گردد؛ سپس اطلاعات پروژه‌ی مورد بررسی بر اساس آن‌ها طبقه‌بندی می‌شود.

### فصل پنجم- برآورد ضریب بهره‌وری ماشین حفر تونل تمام مقطع در زمین‌های نرم: در این

فصل با استفاده از رویکرد RES، وزن هر یک از عوامل به صورت احتمالی در مساله تعیین می‌شود. سپس شاخصی تحت عنوان شاخص بهره‌وری (UI) برای هر یک از پهنه‌های مسیر تونل تعیین می‌شود. با توجه به ارتباط بین این شاخص و ضریب بهره‌وری (UF) محاسبه شده برای هر یک از پهنه‌ها، رابطه‌ای ارائه



---

می‌گردد. با استفاده از این رابطه می‌توان ضریب بهره‌وری را برای ادامه‌ی مسیر تونل مورد مطالعه برآورد کرد.

**فصل ششم- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری:** به جمع‌بندی نهایی، نتیجه‌گیری و حوزه‌ی کاربرد نتایج حاصل از این پژوهش پرداخته می‌شود.

## فصل دوم

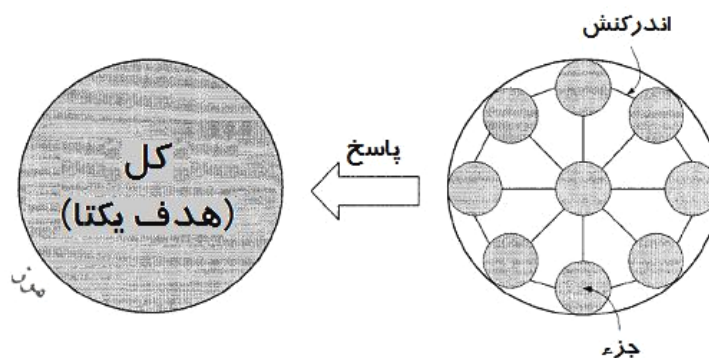
### رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ

## 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 مرسوم عددی و تحلیلی هرگز قادر به در نظر گرفتن تمامی عوامل تاثیرگذار بر یک مساله خاص نبوده و همواره از بسیاری 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 به معرفی و بررسی این رویکرد 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, 1999). 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 1995). بنا بر نظریه‌ی سیستم‌ها که هم‌زمان توسط برتالانفی<sup>۳</sup> و راپوپورت<sup>۴</sup> در سال ۱۹۶۸ ارائه شده است، یک سیستم به عنوان یک "کل"<sup>۵</sup>، هدفی یکتا در محدوده‌ی یک مرز مشخص دارا است. به این ترتیب می‌توان سیستم را متشکل از اجزای موثر بر هم با یک مرز مشخص فرض کرد (شکل ۱-۲). بنابراین، کل را می‌توان به صورت پاسخ سیستم ناشی از اندرکنش‌های تمام اجزا (و نه با جمع ساده‌ی آن اجزا) تعریف نمود (Bertalanffy, 1968; Rapoport, 1968).



شکل ۱-۲- مفهوم تفکر سیستمی (Rapoport, 1968)

<sup>1</sup> Allenby

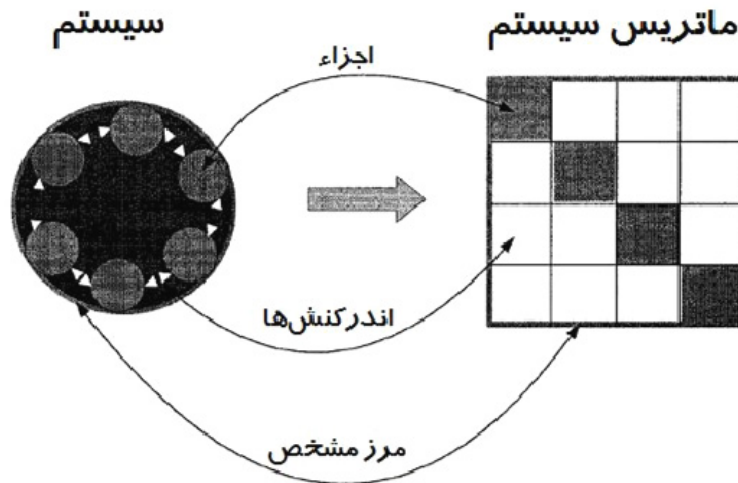
<sup>2</sup> Jiao

<sup>3</sup> Bertalanffy

<sup>4</sup> Rapoport

<sup>5</sup> Whole

سیستم‌ها در کاربردهای مختلف معمولاً به صورت ماتریس‌هایی با نام ماتریس آن سیستم نشان داده می‌شوند. این ماتریس‌ها تمام خصوصیات یک سیستم اعم از اجزاء، اندرکنش‌ها و مرز مشخص را دارا هستند (Hill and Warfield, 1972). این مفهوم در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها (Hill and Warfield, 1972)

روش تحلیلی و سیستمی نه تنها متناقض با یکدیگر نیستند، بلکه مکمل یکدیگرند. با به کار بردن روش تحلیلی سعی می‌شود تا ساده‌ترین عوامل سازنده‌ی هر سیستم را تعیین کرده، جزئیات آن را بررسی و انواع روابطی که بین این عوامل متقابلاً وجود دارند مشخص گردد؛ سپس با تغییر دادن یک متغیر، خصوصیات سیستم و قوانین تحول آن در شرایط گوناگون پیش‌بینی شود (دوروسنی<sup>۶</sup> و بیشون<sup>۷</sup>، ۱۳۷۰).

### ۲-۳- رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

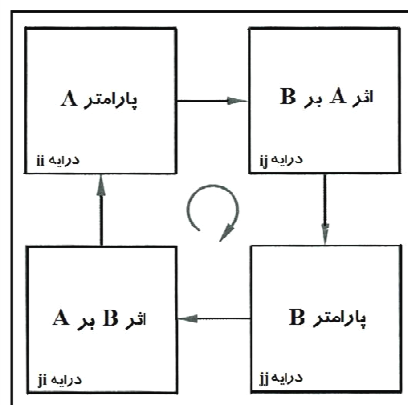
در طراحی پروژه‌های ژئوتکنیکی باید این اطمینان حاصل شود که تمامی عوامل تاثیرگذار و اندرکنش‌های مابین آن‌ها در نظر گرفته شده است. به عنوان یک روش سیستمی جهت مواجهه با تمام

<sup>6</sup> De Rosnay

<sup>7</sup> Bishon

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. عوامل اصلی مرتبط با مساله‌ی مورد نظر در امتداد قطر اصلی ماتریس جانمایی شده و اندرکنش‌های هر جفت از عوامل در سایر درایه‌ها شکل می‌گیرند. مراحل‌ی مانند کدگذاری<sup>۸</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>۹</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 قرار گرفته‌اند. درایه‌ی بالا سمت راست نشان‌دهنده‌ی تاثیر A روی B و درایه‌ی 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 غیر اصلی است (Hill and Warfield, 1972; Hudson, 1992).



شکل ۲-۳- مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی شامل دو عامل A و B (Hudson, 1992)

<sup>۸</sup> Coding

<sup>۹</sup> Interaction Matrix (IM)

## ۲-۳-۱- کدگذاری ماتریس اندرکنش

طبق نظر هادسون، ارایه‌دهنده‌ی رویکرد RES، پنج روش مختلف جهت کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد (Hudson, 1992):

الف- روش اول به روش دودویی<sup>۱۰</sup> 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، درایه‌ی 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>۱۱</sup> (ESQ) معروف است که در حقیقت نوع تعمیم‌یافته‌ای از روش دوتایی است که دارای پنج رده‌ی کدگذاری از صفر تا ۴ است. در این رده‌بندی، به ترتیب صفر برای عدم وجود اندرکنش، ۱ برای اندرکنش ضعیف، ۲ برای متوسط، ۳ برای قوی و ۴ برای اثر بحرانی و شدید در نظر گرفته می‌شود. این روش کدگذاری، از حساسیت بیشتری نسبت به روش قبلی (دودویی) 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 درایه‌ها است 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<sup>۱۲</sup> و یا گروهی از کارشناسان انجام می‌گیرد که این مساله باعث ذهن‌گرایی<sup>۱۳</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.

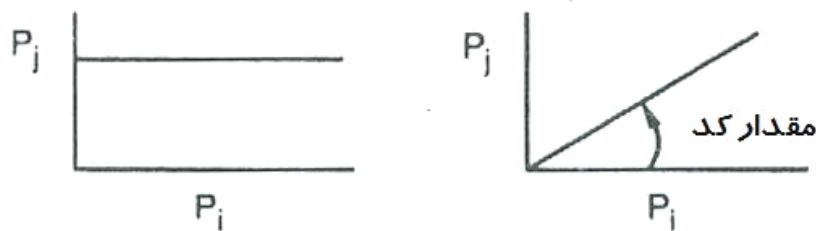
<sup>10</sup> Binary

<sup>11</sup> Expert Semi-Quantitative

<sup>12</sup> Expert

<sup>13</sup> Subjectivity

ج- روش سوم از شیب نمودار عوامل (در اینجا برای نمونه  $P_i-P_j$ ) برای کدگذاری استفاده می‌کند (شکل ۲-۴). اگر نمودار  $P_i-P_j$  به صورت یک خط افقی باشد، در این صورت  $P_j$  به  $P_i$  وابسته نیست. ولی اگر رابطه‌ای 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 غیر اصلی ماتریس مشخص شوند. بدون شک، عدم خطی بودن روابط میان عوامل مشکلی است که در بسیاری از موارد وجود خواهد داشت. با این حال، اگرچه این روش تعمیمی علمی‌تر از دو روش پیشین به نظر می‌رسد، احتمال مواجهه با اطلاعات ناکافی در مورد بسیاری از کاربردها وجود خواهد داشت.



شکل ۲-۴- روش سوم کدگذاری ماتریس اندرکنش: استفاده از شیب خط نمودار  $P_i-P_j$   
(Hudson, 1992)

د- روش چهارم، تطبیقی از یک رویکرد سیستمی مستقیم است. در این روش، فرض بر این است که تمام ساز و کارها در درایه‌های ماتریس اندرکنش می‌توانند به صورت یک معادله‌ی مشتقات جزئی ( $PDE^{14}$ ) 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

<sup>14</sup> Partial Differential Equation



به نظر می‌رسد، ولی همین کار می‌تواند در ماتریس‌های بزرگ، عملی بسیار سخت و پیچیده (و گاه غیرممکن) به شمار آید.

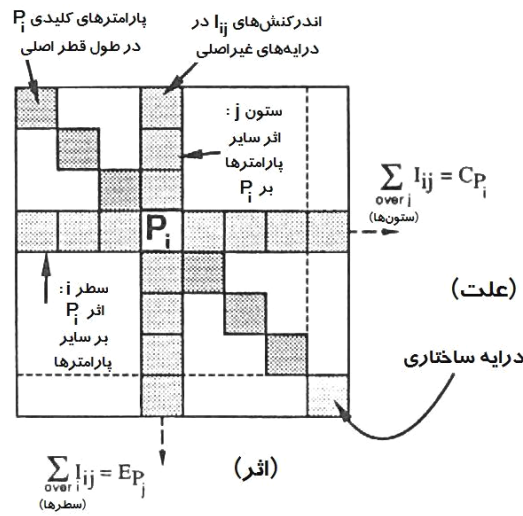
ه- روش پنجم، روش صریح<sup>۱۵</sup> نام دارد. در این حالت فرض می‌شود که چنان آگاهی کاملی از کل ساز و کارهای ماتریس وجود دارد که امکان تحلیل عددی (Numerical) آن‌ها فراهم است و می‌توان رفتار واقعی اندرکنش‌ها را مورد سنجش قرار داد. چنین آگاهی و اطلاعاتی مسلماً هرگز به طور کامل برای یک ماتریس وجود نخواهد داشت، ولی در صورت استفاده از تمام اطلاعات موجود، می‌تواند با روش‌های دوم و چهارم تلفیق شده و مورد استفاده قرار گیرد.

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

## ۲-۳-۲- نمودار علت- اثر

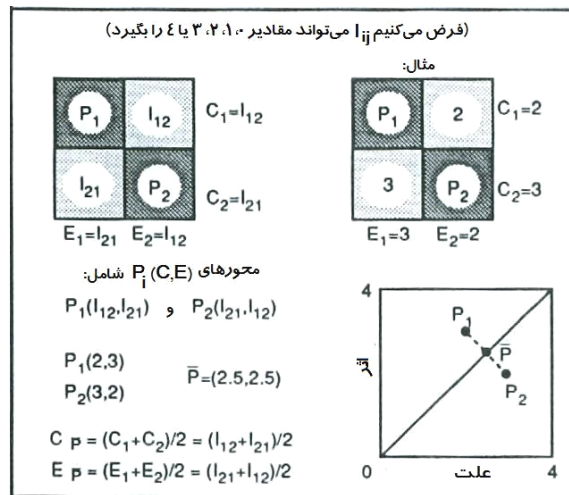
نحوه‌ی شکل‌گیری محورهای علت و اثر در نمودار شکل ۲-۵ قابل مشاهده است. عوامل اصلی ( $P_i$ ) در امتداد قطر اصلی ماتریس جانمایی شده‌اند. با توجه به نحوه‌ی ساخته شدن ماتریس، واضح است که هر سطر عبوری از  $P_i$  نشان‌دهنده‌ی تاثیر آن بر تمام عوامل دیگر موجود در سیستم است. بالعکس، هر ستون عبوری از  $P_i$  نشانگر تاثیر عوامل دیگر سیستم بر روی آن است. به محض این که ماتریس به صورت عددی کدگذاری شد، می‌توان جمع جبری مقادیر هر سطر و هر ستون آن را به دست آورد. مجموع مقادیر عددی هر سطر با نام "علت" (Cause) و همین‌طور مجموع مقادیر هر ستون با نام "اثر" (Effect) شناخته می‌شوند که در نهایت سبب به وجود آمدن محورهای C و E می‌گردند. بنابراین، C بیانگر نحوه‌ی تاثیرات  $P_i$  بر سیستم و E نشان‌دهنده تاثیر  $P_i$  بر سیستم است که سیستم بر  $P_i$  می‌گذارد.

<sup>15</sup> Explicit



شکل ۲-۵- نحوه‌ی شکل‌گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندركنش (Hudson, 1992)

مقادیر محورها برای هر عامل می‌تواند بر روی نموداری به نام نمودار علت-اثر انتقال یابد. برای معرفی اولیه‌ی این مفهوم، ابتدا بر روی نمودار (C, E) دو عامل بحث می‌شود که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. برای چنین ماتریسی، با استفاده از روش کدگذاری ESQ، مجموع مقادیر برای سطرها یا ستون‌ها عدد ۴ است. این ماتریس نحوه‌ی رسم نمودار یاد شده را به صورت بسیار ساده نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶- نمونه‌ای از یک ماتریس اندركنش ۲×۲ کدگذاری شده و نمودار علت-اثر آن (Hudson, 1992)

## ۲-۴- سابقه‌ی استفاده از رویکرد RES در کاربردهای مختلف

سیستم‌های مهندسی سنگ از زمان معرفی آن در سال ۱۹۹۲ تا کنون 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 استفاده‌ی بسیار خوبی نسبت به سایر روش‌های مرسوم از خود نشان می‌دهد. در این بخش به کلیه‌ی کاربردها از ابتدا تا کنون به اختصار اشاره می‌شود.

مبانی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) برای اولین بار توسط هادسون در سال ۱۹۹۲ معرفی شد (Hudson, 1992; Hudson and Harrison, 1992). 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 گردید. 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 تا کنون اشاره گردد.

در سال ۱۹۹۲، هادسون و همکاران با استفاده از روش ارائه شده، به ارزیابی عوامل موثر بر چند پروژه‌ی مهندسی سنگ، مخاطره‌ی این پروژه‌ها را مورد تحلیل قرار دادند (Hudson et al., 1992). اسمیت<sup>۱۶</sup> در سال ۱۹۹۴ به ارزیابی زمین‌شناسی مهندسی کارهای معدنی کم‌عمق با استفاده از RES پرداخت (Smith, 1994). در ۱۹۹۵، جیائو با به کارگیری روش RES در برخی کاربردهای مهندسی، سعی در رسمی‌سازی استفاده از این روش داشت (Jiao, 1995). مازوکولا<sup>۱۷</sup> و هادسون در ۱۹۹۶ برای اولین بار روش مذکور را در کارهای تحلیل پایداری شیب‌های طبیعی وارد نمودند (Mazzoccola and Hudson, 1996). در این مطالعه، ناپایداری شیب‌های طبیعی رشته‌کوه‌های آلپ مرکزی در ایتالیا مورد پیش‌بینی و

<sup>16</sup> Smith

<sup>17</sup> Mazzoccola

ارزیابی قرار گرفت. اسکاگیوس<sup>۱۸</sup> و همکارانش در سال ۱۹۹۷ از RES برای سنجش میزان خطرات زیست‌محیطی ناشی از دفع زباله‌های هسته‌ای در سوئد استفاده نمودند (Skagius et al., 1997). در این تحقیق، سیزده عامل به عنوان عوامل کلیدی موثر بر سیستم در نظر گرفته شده بود. ماتیسوس<sup>۱۹</sup> و لوید<sup>۲۰</sup> (۱۹۹۸) نیز به عنوان یک مطالعه‌ی زیست‌محیطی، آلودگی‌های حوزه‌ی آبریز چند رودخانه را در ناحیه‌ای از انگلستان با رویکرد RES مورد بررسی قرار دادند (Matthews and Lloyd, 1998). کاستالدینی<sup>۲۱</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۸، اثرات ناشی از زلزله را بر پایداری شیب‌های طبیعی رشته‌کوه‌های آپنینز<sup>۲۲</sup> ایتالیا با روش سیستمی و در دو حالت استاتیکی و دینامیکی تحلیل نمودند (Castaldini et al., 1998). ون‌دورپ<sup>۲۳</sup> 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., 1999). در همین سال، داویس<sup>۲۴</sup> و همکارانش طی مطالعه‌ای محدود، اقدام به بررسی مشکلات ناشی از ریزش مجاری فاضلاب در محیط‌های شهری با استفاده از ماتریس‌های اندرکنش نمودند (Davies et al., 1999). همچنین در این سال لاتام<sup>۲۵</sup> و لو<sup>۲۶</sup> از روش RES با کدگذاری اصلاح‌شده در ارزیابی یک سیستم ارزیابی قابلیت انفجار توده سنگ‌ها بهره بردند (Latham and Lu, 1999). آخرین مطالعه در این سال مربوط به استفاده از ماتریس‌های اندرکنش به منظور ارزیابی میزان مهاجرت برخی عناصر در اکوسیستم‌های جنگلی توسط آویلا<sup>۲۷</sup> و موبرگ<sup>۲۸</sup> است (Avila and Moberg, 1999).

---

<sup>18</sup> Skagius

<sup>19</sup> Matthews

<sup>20</sup> Lloyd

<sup>21</sup> Castaldini

<sup>22</sup> Apennins

<sup>23</sup> Van Dorp

<sup>24</sup> Davies

<sup>25</sup> Latham

<sup>26</sup> Lu

<sup>27</sup> Avila

در سال ۲۰۰۰، شانگ<sup>۲۹</sup> و همکارانش از روش RES جهت انتخاب بهترین محل برای ساخت نیروگاه زیرزمینی شیشان-لینگ<sup>۳۰</sup> در چین استفاده کردند (Shang et al., 2000). آن‌ها برای این منظور شاخصی به نام شاخص تناسب جامع را تعریف کردند که در نهایت بهترین مکان را با توجه به آن انتخاب نمودند. علی<sup>۳۱</sup> و حسن<sup>۳۲</sup> 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 منطقه‌ی بندربان<sup>۳۳</sup> در بنگلادش نمودند (Ali and Hasan, 2002). ژانگ<sup>۳۴</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۴ خطر سقوط سنگ از شیب‌های سنگی حاشیه بزرگراه چنگدو-لاسا<sup>۳۵</sup> به طول ۴۳۰ کیلومتر در چین را در ۱۹ ایستگاه به کمک روش سیستم‌های مهندسی سنگ تحلیل نمودند (Zhang et al., 2004). شاخص مورد استفاده آن‌ها شاخص خطر سقوط سنگ نام داشت. در همین سال، بناردوس<sup>۳۶</sup> و کالیامپاکوس<sup>۳۷</sup> در ارزیابی خطرات ژئوتکنیکی در حفر تمام مقطع تونل متروی آتن یونان از روش RES استفاده کرده و با تعریف شاخص آسیب‌پذیری یا حساسیت به ریزش در ایستگاه‌های مختلف حفاری تونل توانستند این خطرات را برآورد نمایند (Benardos and Kaliampakos, 2004). در سال ۲۰۰۵، شانگ و همکارانش با استفاده از ماتریس اندرکنش تشکیل شده از عوامل زمین‌شناسی به ناحیه‌بندی<sup>۳۸</sup> زمین‌شناسی مهندسی منطقه‌ای واقع در حاشیه‌ی بزرگراه سیچوان-تیبِت<sup>۳۹</sup> پرداختند (Shang et al., 2005). آن‌ها برای این منظور اقدام به تعریف و تشکیل شاخص ناحیه‌بندی زمین‌شناسی نمودند. بندز<sup>۴۰</sup> و همکاران نیز در سال ۲۰۰۵

---

<sup>28</sup> Moberg

<sup>29</sup> Shang

<sup>30</sup> Shisan-Ling

<sup>31</sup> Ali

<sup>32</sup> Hasan

<sup>33</sup> Bandarban

<sup>34</sup> Zhang

<sup>35</sup> Chengdu-Lhasa

<sup>36</sup> Benardos

<sup>37</sup> Kaliampakos

<sup>38</sup> Zonation

<sup>39</sup> Sichuan-Tibet

<sup>40</sup> Bendz

آلودگی‌های ایجاد شده‌ی ناشی از به کار بردن ضایعات صنعتی در مصالح راه‌سازی را به کمک ماتریس‌های اندرکنش مورد مطالعه قرار دادند (Bendz et al., 2005). در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷، ماورولیدو<sup>۴۱</sup> و همکارانش طی مطالعه‌ای جامع، اقدام به نگاشت آلودگی ناشی از ترافیک هوای شهر گیلفورد<sup>۴۲</sup> انگلستان نمودند (Mavroulidou et al., 2004; Mavroulidou., Hughes et al., 2005; Mavroulidou et al., 2007). آن‌ها برای این کار، علاوه بر استفاده از RES و تشکیل ماتریس اندرکنش با عوامل تاثیرگذار بر کیفیت هوای شهر، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نیز برای نگاشت نهایی استفاده کرده و در نهایت نتایج خود را با نتایج به دست آمده از روش‌های عددی مقایسه نمودند. فرننتینو<sup>۴۳</sup> و ساکلاریو<sup>۴۴</sup> نیز در سال ۲۰۰۷ همین روش را برای پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش و ارزیابی عملکرد شیب‌های طبیعی پیشنهاد کردند (Ferentinou and Sakellariou, 2007). اندریوکس<sup>۴۵</sup> و حاجیجورجیو<sup>۴۶</sup> در سال ۲۰۰۸ روشی را برای تعیین قابلیت تنش‌زدایی انفجار در پایه‌های معادن زیرزمینی ارائه دادند (Anderiux and Hadjigeorgiou, 2008). 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. دی پیپو<sup>۴۷</sup> و همکارانش در همین سال برای ارزیابی خطرات مختلف در نواحی ساحلی جنوب ایتالیا و شهر ناپلس<sup>۴۸</sup> از رویکرد سیستمی RES استفاده نمودند (DePippo et al., 2008). بودتا<sup>۴۹</sup> و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۸ با استفاده از یک الگوریتم بر مبنای GIS و RES، نگاشت خطرات وقوع زمین‌لغزش را برای ناحیه‌ی کیلنتو<sup>۵۰</sup> ایتالیا انجام دادند (Budetta et al., 2008). همچنين، جریان<sup>۵۱</sup> و

<sup>41</sup> Mavroulidou

<sup>42</sup> Guildford

<sup>43</sup> Ferentinou

<sup>44</sup> Sakellariou

<sup>45</sup> Anderiux

<sup>46</sup> Hadjigeorgiou

<sup>47</sup> De Pippo

<sup>48</sup> Naples

<sup>49</sup> Budetta

<sup>50</sup> Cilento

جریان با استفاده از ماتریس‌های اندرکنش به مطالعه و ناحیه‌بندی حساسیت ریزش شیب‌های طبیعی ناحیه دوگانکنت<sup>۵۲</sup> در کشور ترکیه پرداختند (Ceryan and Ceryan, 2008). به عنوان آخرین تحقیق در این زمینه مربوط به سال ۲۰۰۸، روزوس<sup>۵۳</sup> و همکارانش نیز کاری مشابه را برای شیب‌های طبیعی استان کاردیتسا<sup>۵۴</sup> در یونان انجام دادند (Rozos et al., 2008) که مشابه کار انجام شده توسط آن‌ها در استان آچایا<sup>۵۵</sup> در یونان در ۲۰۰۶ بوده است (Rozos et al., 2006). در سال ۲۰۰۹، شین<sup>۵۶</sup> 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., 2009). در همین سال، کندور<sup>۵۷</sup> و اصغری از تلفیق این رویکرد و روش‌های تصادفی برای تحلیل داده‌های رفتارنگاری خطر نشت دی‌اکسیدکربن از دیواره‌ی چاه‌ها و مخازن استفاده کردند (Condor and Asghari, 2009). در سال ۲۰۱۱ روزوس و همکاران با تلفیق رویکرد RES و GIS به مطالعه‌ی ارزیابی خطر زمین‌لغزش و تهیه‌ی نقشه‌های حساسیت برای شیب‌های طبیعی شرق شبه جزیره پلوپونسوس<sup>۵۸</sup> در جنوب یونان پرداختند (Rozos et al., 2011). فرنیتینو<sup>۵۹</sup> و همکاران در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ از رویکرد RES برای تحلیل خصوصیات ژئوتکنیکی رسوبات دریایی در منطقه زاکینتوس<sup>۶۰</sup> یونان بهره بردند (Ferentinou et al., 2010; Ferentinou et al., 2011; Ferentinou et al., 2012). در نهایت در سال ۲۰۱۲ فرامرزی و همکاران با استفاده از رویکرد RES مدلی برای تعیین مخاطره و پیش‌بینی احتمال عقب‌زدگی در انفجار پله‌ها ارائه کردند (Faramarzi et al., 2012). مطالعه‌ی موردی این پژوهش معدن مس سونگون بوده است. در این تحقیق، شاخص آسیب‌پذیری

---

<sup>51</sup> Ceryan

<sup>52</sup> Dogankent

<sup>53</sup> Rozos

<sup>54</sup> Karditsa

<sup>55</sup> Achaia

<sup>56</sup> Shin

<sup>57</sup> Condor

<sup>58</sup> Peloponnesus

<sup>59</sup> Ferentinou

<sup>60</sup> Zakynthos

(مشابه تحقیق بناردس و کالیامپاکوس) تشکیل شده و به مقایسه‌ی ارتباط بین این شاخص و میزان عقب‌زدگی پرداخته شده است.

## ۲-۵- روش‌های کدگذاری ماتریس اندرکنش

با وجود گذشت حدود ۲۰ سال از ارایه‌ی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ، تا به امروز تحقیقات اندکی در زمینه‌ی بهبود این رویکرد صورت گرفته است. همان‌طور که اشاره شد، ماتریس اندرکنش به عنوان یک جزء بنیادی در روش‌های سیستمی و به ویژه در RES به شمار می‌رود. از این رو، بهبودهای صورت گرفته نیز در همین جهت و بیشتر بر روی نحوه‌ی کدگذاری این ماتریس متمرکز شده است. در ادامه به تحقیقات انجام شده در جهت ارتقای کدگذاری این رویکرد به صورت جداگانه پرداخته می‌شود.

### ۲-۵-۱- استفاده از نظریه‌ی سیستم‌های خاکستری

در سال ۱۹۹۴، لو و لاتام با به کارگیری نظریه‌ی سیستم‌های خاکستری از نظریه‌های علم کنترل، شیوه‌ای جدید برای کدگذاری ماتریس اندرکنش در رویکرد RES ارایه نمودند (Lu and Latham, 1994). 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 این رو، سیستمی که شامل هر دو اجزای شناخته شده و ناشناخته باشد، یک سیستم "خاکستری" نام می‌گیرد. به طور کلی اجزای یک سیستم خاکستری شامل آنالیز سیستمی، توسعه‌ی مدل‌های سیستمی، پیش‌بینی خاکستری، تصمیم‌گیری خاکستری و کنترل خاکستری است. ابزار مورد استفاده در این آنالیز سیستمی نیز شامل آنالیز همبستگی خاکستری، تولید داده‌ها بر اساس تحلیل آماری خاکستری و دسته‌بندی



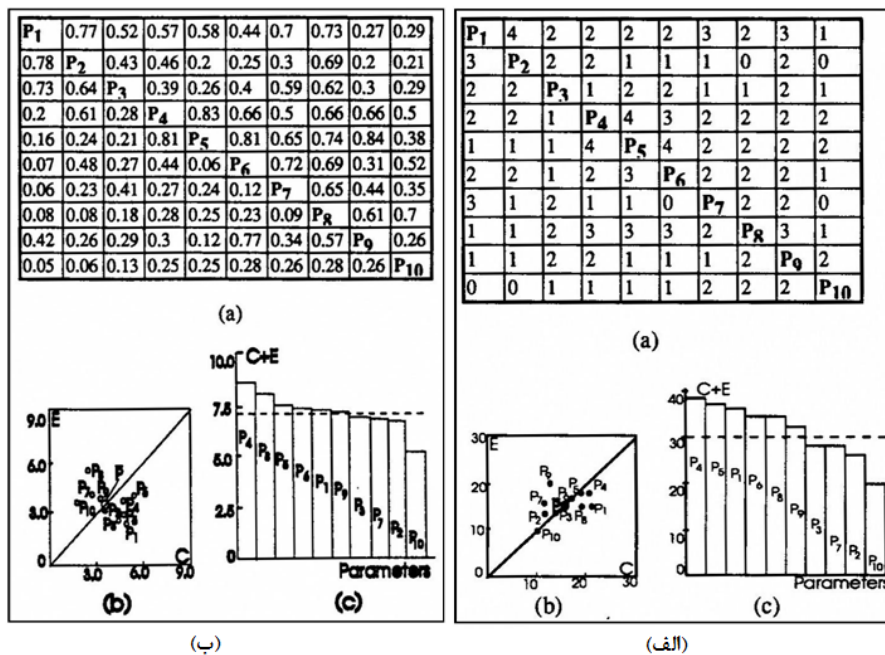
خاکستری است. طبق این نظریه، توسعه‌ی یک مدل سیستمی مستلزم یک مدل مشتقات جزئی با استفاده از داده‌های اصلی است (Den, 1982).

طبق نظر لو و لاتام، یک سیستم مهندسی سنگ با عوامل و 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 ارایه‌ی یک شیوه‌ی کدگذاری جدید با نام کدگذاری عددی پیوسته (CQC<sup>61</sup>) 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 کدگذاری مرسوم ESQ (Hudson, 1992) 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 ۲-۷ 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 (با در نظر داشتن مقیاس)، 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 استفاده‌ی عملی از روش کدگذاری جدید، توسط خود ارایه‌دهندگان آن در سال ۱۹۹۹ و برای توسعه‌ی یک سیستم ارزیابی قابلیت انفجار توده‌سنگ‌ها بوده است (Latham and Lu, 1999). در این مطالعه، ماتریس اندرکنش ساخته شده برای ۱۲ عامل مربوط به خصوصیات توده سنگ با استفاده از روش CQC کدگذاری شده است.

<sup>61</sup> Continuous Quantitative Coding

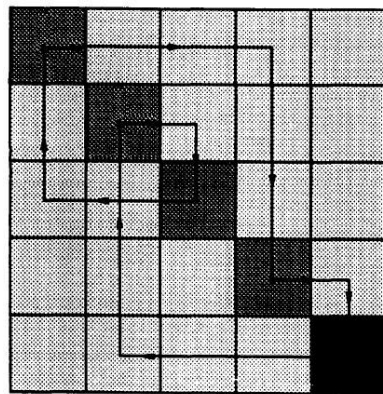
از مزایای روش کدگذاری CQC نسبت به ESQ می‌توان به محدوده‌ی وسیع‌تر عددی آن اشاره کرد که از ۰ تا ۱۰۰ را در نظر گرفته و طبق طبقه‌بندی نظریه‌ی سیستم‌های خاکستری به صورت اعداد اعشاری از ۰/۰۰ تا ۱/۰۰ نشان داده می‌شود. این قابلیت باعث می‌شود که حساسیت نسبت به در نظر گرفتن تاثیرات بالاتر رفته و در نتیجه کوچک‌ترین 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 جنبه‌ی ذهنی بودن کدگذاری‌ها و استفاده از قضاوت مهندسی در تعیین رده‌های خاکستری برای نشان دادن اندرکنش بین عوامل باقی است. این امر بیانگر ضعف مشترک روش‌های کدگذاری CQC و ESQ است.



شکل ۲-۷- مقایسه نتایج حاصل از روش کدگذاری (الف) ESQ و (ب) CQC (Lu and Latham, 1994)

## ۲-۴-۲- استفاده از نظریه‌ی گراف

جیائو و هادسون در سال ۱۹۹۵، با بهره‌گیری از نظریه‌ی گراف<sup>۶۲</sup> توانستند مدل تمام مرتبط (FCM<sup>۶۳</sup>) را برای کاربرد در مفاهیم سیستم‌های مهندسی سنگ و البته تنها برای ساز و کارهای خطی ارائه دهند (Jiao and Hudson, 1995). هدف اصلی از این کار، در نظر گرفتن رابطه‌ی هم‌زمان بیش از دو عامل در ماتریس اندرکنش بوده است. در ارزیابی این رویکرد فرض بر این بوده است که در دنیای واقعی، فرآیندهای مکانیک سنگی تنها شامل اثر متقابل دوتایی جفت عوامل بر یکدیگر نبوده و هر عامل به واسطه‌ی تاثیر هم‌زمان بر عوامل دیگر، از آن‌ها و بنابراین از خود نیز تاثیر می‌پذیرد (در حقیقت علت نام‌گذاری رویکرد به نام تمام مرتبط به همین دلیل بوده است). این فرضیه با مفهوم خط سیرهای ساز و کار<sup>۶۴</sup> ارائه شده است که در نهایت تشکیل یک حلقه را برای هر عامل می‌دهند. شکل ۲-۸ خط سیرهای ساز و کار تشکیل‌دهنده‌ی یک حلقه را برای یک ماتریس پنج عاملی نشان می‌دهد که در آن مبدأ و انتهای حلقه درایه‌ی آخر قطر اصلی (عامل پنجم) است.



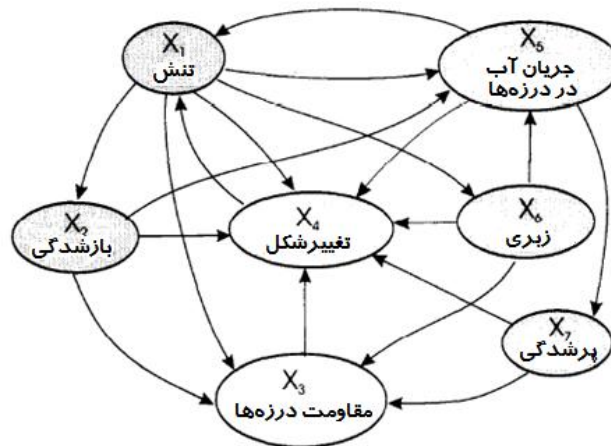
شکل ۲-۸- خط سیرهای ساز و کار برای یک ماتریس با ۵ عامل (Jiao and Hudson, 1995)

<sup>62</sup> Graph Theory

<sup>63</sup> Fully-Coupled Model

<sup>64</sup> Mechanism pathways

همان‌طور که گفته شد، در این مطالعه نحوه‌ی اثرگذاری عوامل یک سیستم بر همدیگر با استفاده از نظریه‌ی گراف تحلیل شده است. به عنوان مثال، سیستمی شامل برخی عوامل مکانیک سنگی مانند تنش، جریان آب در درزه‌ها، زبری سطح درزه‌ها، مقاومت درزه‌ها، تغییرشکل‌پذیری و یا بازشدگی به صورت شبکه‌ای از ساز و کارها در شکل ۲-۹ نشان داده شده است.



شکل ۲-۹- شبکه‌ی ساز و کارهای میان چند عامل در مدل تمام مرتبط (Jiao and Hudson, 1995)

آن‌ها معادلات مربوط به چنین اندرکنش‌های تمام مرتبط را نیز ارایه دادند تا روش پیشنهادی قابل استفاده در کاربردهای مختلف باشد. با این حال، این روش در عین دارا بودن مزیتی مانند نزدیکتر بودن به واقعیت، نیاز به آن دارد که ارتباط بین عوامل به صورت روابط 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 نظریه‌ی گراف به خصوص در ماتریس‌هایی با عوامل متعدد ربط داد. با این وجود، در این رویکرد تمام خط سیرها در ماتریس در نظر گرفته شده و در نهایت یک ماتریس اندرکنش یکپارچه ( $GIM^{65}$ ) حاصل می‌گردد که از مزایای این رویکرد به حساب می‌آید.

<sup>65</sup> Global Interaction Matrix

## ۲-۴-۳- استفاده از طرح شناخت فازی

کالاماراس<sup>۶۶</sup> در سال ۱۹۹۷ روش جدیدی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ ارایه نمود (Kalamaras, 1997). در این روش به منظور کدگذاری اندرکنش بین عوامل و توصیف پویایی و پیچیدگی آن‌ها، از اعدادی در بازه  $-1$  تا  $+1$  استفاده شده است. این روش تحت عنوان طرح شناخت فازی (FCM<sup>۶۷</sup>) معرفی گردیده است. عدد صفر بیانگر عدم اندرکنش بین دو عامل است. اگر افزایش مقادیر یک عامل، موجب افزایش عامل دیگر شود (به عبارت دیگر دو عامل ارتباط مستقیم داشته باشند)، اندرکنش آن‌ها مقداری مثبت خواهد داشت و در غیر این صورت مقداری منفی به خود اختصاص می‌دهد. در شکل ۲-۱۰ سه عامل ساختار سنگ، تنش‌های برجا، جریان آب و همچنین مقادیر اندرکنش آن‌ها با استفاده از روش FCM نشان داده شده است.

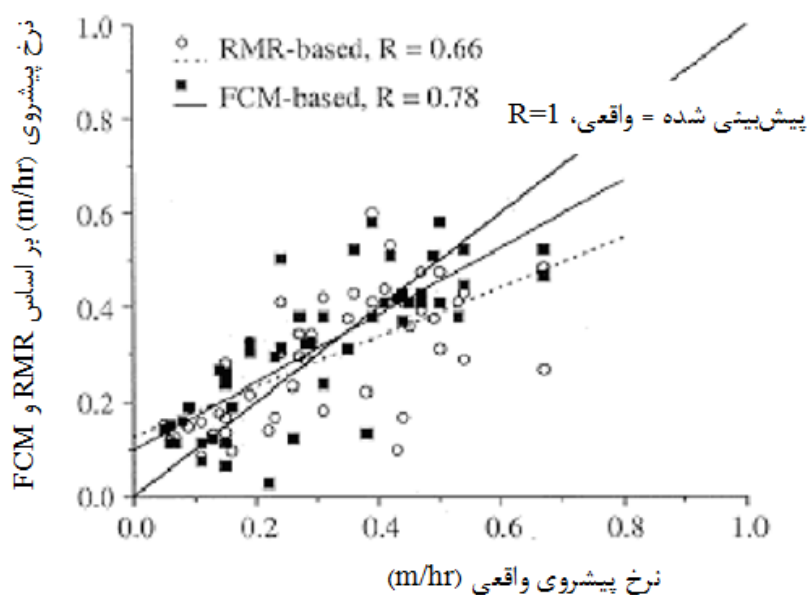


شکل ۲-۱۰- ارایه‌ی طرح شناخت فازی برای سه عامل ساختار سنگ، تنش‌های برجا و جریان آب (Kalamaras, 1997) در تحقیقی که کالاماراس انجام داد، از روش FCM برای پیش‌بینی نرخ پیشروی ساخت تونل استفاده شده است. به این منظور، ماتریس اندرکنشی شامل ۱۱ عامل تشکیل گردیده و با استفاده از روش FCM کدگذاری شده است. سپس با استفاده از این ماتریس و اطلاعات یک پروژه، نرخ پیشروی تونلی برآورد شد. از طرفی با استفاده از روش RMR برای همان اطلاعات، مقادیر نرخ پیشروی مشخص شده

<sup>66</sup> Kalamaras

<sup>67</sup> Fuzzy Cognitive Map

است. در شکل ۲-۱۱ مقادیر پیش‌بینی نرخ پیشروی روش RMR و FCM در مقابل مقادیر واقعی بیان گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمودارهای پیش‌بینی روش‌های RMR و FCM به ترتیب دارای ضریب همبستگی ۰/۶۶ و ۰/۷۸ است. بنابراین این پژوهش نشان می‌دهد که نتایج حاصل از روش FCM در پیش‌بینی نرخ پیشروی، دارای دقت به مراتب بالاتری نسبت به روش RMR است.



شکل ۲-۱۱- مقایسه‌ی پیش‌بینی نرخ پیشروی روش‌های RMR و FCM با مقادیر واقعی (Kalamaras, 1997)

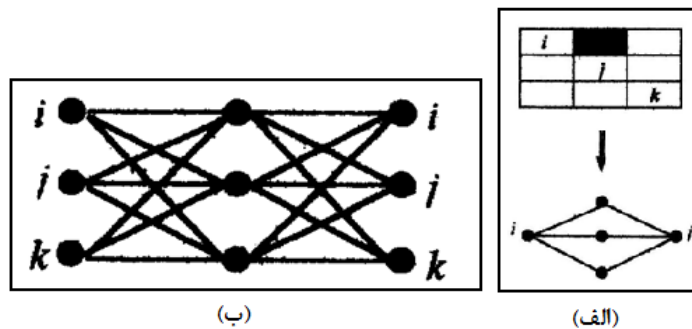
## ۲-۴-۴- استفاده از شبکه‌های عصبی

یانگ<sup>۶۸</sup> و ژانگ<sup>۶۹</sup> در سال ۱۹۹۸ روش جدیدی را بر مبنای هوش محاسباتی برای کاربرد در سیستم‌های مهندسی سنگ ارائه نمودند (Yang and Zhang, 1998). در این روش، برای تحلیل اندرکنش هر جفت عامل در ماتریس  $(i,j)$  آن دو عامل به عنوان ورودی و خروجی یک شبکه عصبی فرض شده و لایه‌های میانی با توجه به میزان اثر سنجیده شده از قبل و نوع عامل تعریف می‌شوند. با آگاهی از پروسه‌ی یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان با تغییرات کوچک در ورودی شبکه (i)، میزان تاثیر

<sup>68</sup> Yang

<sup>69</sup> Zhang

در مقدار و حالت خروجی ( $j$ ) را اندازه‌گیری نمود. اگر یک ماتریس اندرکنش با عوامل مشخص را در نظر بگیریم، نحوه‌ی قرارگیری عوامل  $i$  و  $j$  در شبکه‌ی عصبی به صورت شکل ۲-۱۲ (الف) در می‌آید. همچنین در صورت فرض وجود اندرکنش میان تمام عوامل ماتریس، ورودی‌ها و خروجی‌های شبکه به صورت شکل ۲-۱۲ (ب) نشان داده می‌شوند.



شکل ۲-۱۲- بکارگیری شبکه‌های عصبی در کدگذاری ماتریس اندرکنش، (الف): نحوه‌ی قرارگیری عوامل ماتریس اثر متقابل در یک شبکه‌ی عصبی، (ب): شبکه‌ی عصبی در نظر گرفته شده در صورت وجود اندرکنش میان تمام عوامل ماتریس (Yang and Zhang, 1998)

در این روش، ساخت لایه‌های میانی شبکه مستلزم اطلاع کامل از ساز و کار اثرات متقابل میان عوامل ورودی و خروجی است، به این معنی 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 روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی نیاز به داده‌های واقعی و دقیق داشته و پیچیدگی‌های محاسباتی خاص این شبکه‌ها را نیز به همراه دارد. از ضعف‌های اصلی کار یانگ و ژانگ (۱۹۹۸) می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

تکیه بر استفاده از فضای ورودی عوامل به صورت توان نسبی تاثیر ( $RSE^{V_0}$ ) عوامل سیستم و عدم توجه ویژه به این عامل به حالت یکپارچه در تعیین اندرکنش‌ها علی‌رغم ارایه‌ی آن در همان تحقیق، این

<sup>70</sup> Relative Strength of Effect

مفهوم سپس در تحقیقات بعدی نظیر تلفیق شبکه‌های عصبی با سیستم اطلاعات جغرافیایی جنبه‌ی کاربردی یافته است (Yang and Rosenbaum, 2001).

عدم توجه کامل به بهینه‌سازی شبکه که ممکن است به دلیل عدم توسعه‌یافتگی برنامه‌های کامپیوتری پرسرعت در زمان ارایه‌ی آن تحقیق در سال ۱۹۹۸ باشد که باعث شده است اجرای روش‌های سعی و خطای تکرارشونده برای تعیین شبکه‌ی بهینه تا حد زیادی دشوار بوده باشد. همین مساله تا حد بسیاری بر اندرکنش‌های به دست آمده از شبکه تاثیر می‌گذارد.

مزیت بزرگ روش ارایه شده در این است 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 عوامل را بدون نیاز به کارشناس و بدون استفاده از تخمین‌های ذهنی محاسبه نماید. این تفکر یکی از اصلی‌ترین ابزارها در بهبود رویکرد RES از زمان ارایه‌ی آن به شمار می‌رود.

## ۲-۴-۵- استفاده از نظریه‌ی احتمالات

زارع و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از احتمالات به توسعه‌ی نحوه‌ی کدگذاری ماتریس اندرکنش پرداختند (Zare Naghadehi et al., 2011). در این روش که در واقع نسخه‌ی توسعه‌یافته‌ای از روش ESQ است، عدم قطعیت در تعیین مقادیر کدها یا درایه‌های ماتریس اندرکنش به کمک احتمالات بهبود یافته است. این روش کدگذاری تحت عنوان روش نیمه عددی خبره‌ی احتمالاتی (PESQ<sup>۷۱</sup>) نامگذاری شده است.

<sup>71</sup> Probabilistic Expert Semi-Quantitative



همان‌طور که اشاره شد، در رویکرد RES کدگذاری اندرکنش‌های میان عوامل موثر بر سیستم در ماتریس مربوطه توسط یک کارشناس (یا خبره) و بر پایه‌ی تحقیقات میدانی، قضاوت‌های مهندسی، مستندات مربوطه و در صورت نیاز با تحلیل‌های نظری و عددی انجام می‌گیرد. علیرغم این تنوع روش‌ها برای ارزیابی اندرکنش‌ها توسط کارشناس، در روش معمول نیمه عددی خبره (ESQ)، تنها یک کد (مقدار عددی) یکتا برای عددی‌سازی تاثیر یک عامل بر عامل دیگر در ماتریس اختصاص می‌یابد. با این حال، در بسیاری از موارد، عدم قطعیت‌هایی<sup>۷۲</sup> در خصوصیات عوامل و روابط میان آن‌ها وجود دارد که در نتیجه، با انتخاب یک کد دقیق و یکتا نمی‌توان اندرکنش مربوطه را به طور صحیح و کامل بیان نمود. از طرفی در صورت استفاده از نظرات چندین کارشناس برای کدگذاری ماتریس اندرکنش، در نهایت چاره‌ای جز میانگین‌گیری و در نظر گرفتن مقدار متوسط کدهای متفاوت داده شده توسط افراد مختلف وجود ندارد. این در حالی است که در بسیاری از موارد، اندرکنش موجود کاملاً شناخته شده نبوده و کارشناسان مختلف نظرات متفاوتی در مورد اثر متقابل دو عامل بر یکدیگر دارند.

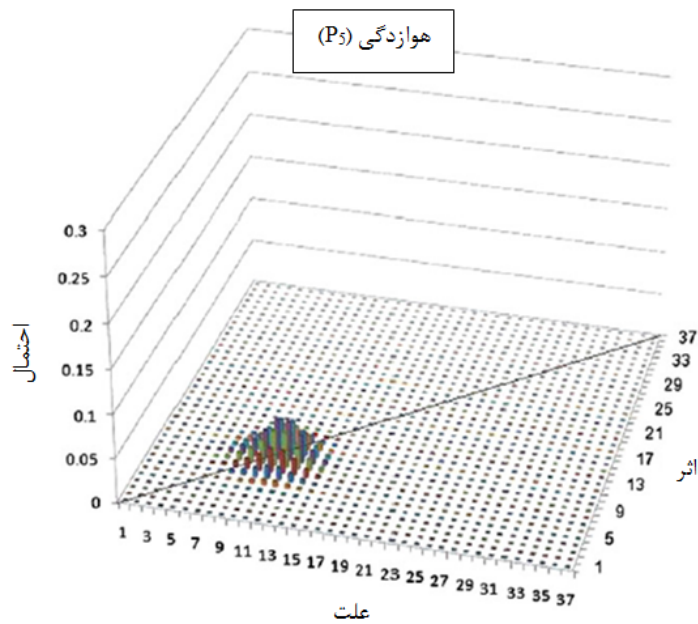
به منظور مواجهه با این مشکلات، روش کدگذاری نیمه عددی خبره‌ی احتمالاتی (PESQ) ارائه می‌گردد که در آن احتمال‌های متفاوت به مقادیر مختلف کدهای اندرکنش‌های ماتریس اختصاص می‌یابند. به عبارت دیگر، برای هر اندرکنش، احتمال‌های دارا بودن مقادیر کدگذاری (در این مورد از صفر تا ۴) تخصیص می‌یابد که می‌تواند توسط یک کارشناس و به طریقه‌ی ذهنی انجام گیرد و یا با تشکیل توزیع‌های احتمال کدهای داده شده به روش ESQ توسط کارشناسان مختلف و استخراج احتمال رخداد هر کد صورت پذیرد. این کدگذاری را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از ماتریس‌ها ارائه نمود (پنج ماتریس در صورتی که کدها از صفر تا ۴ انتخاب شوند) که هر یک از ماتریس‌ها در درایه‌ی  $i$ - $j$  خود

<sup>72</sup> Uncertainties

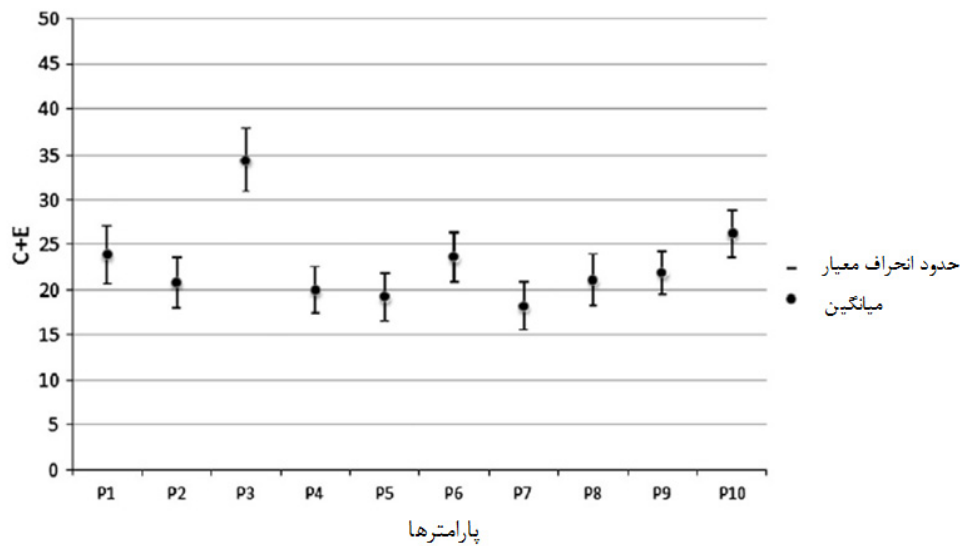
نشان‌دهنده‌ی احتمال کد مورد نظر برای تاثیر  $P_i$  بر  $P_j$  است. واضح است که مجموع احتمالات یک درایه‌ی واحد برای تمام ماتریس‌ها برابر با ۱ خواهد بود.

با اعمال روش PESQ در کدگذاری ماتریس اندرکنش، سایر مراحل رویکرد RES نیز جنبه‌ی احتمالاتی به خود خواهند گرفت. به عنوان مثال، می‌توان توزیع‌های احتمال C و E و نیز نمودارها و هیستوگرام‌های احتمالاتی (C, E) را به دست آورد.

زارع و همکاران از روش PESQ برای تحلیل پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی و بررسی عوامل تاثیرگذار بر آن استفاده کرده‌اند. مطالعه‌ی موردی این پژوهش در مورد شیب‌های منطقه‌ای در شمال شرق ایران در نزدیکی شهر شاهرود بوده است. به این منظور ۹ عامل اصلی در نظر گرفته شده که شامل زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی، گسل و چین‌خوردگی، ناپایداری‌های قبلی، مقاومت سنگ بکر، هوازدگی، ویژگی‌های مکانیکی ناپیوستگی‌ها، شرایط هیدرولیکی، ارتفاع شیب و زاویه‌ی سطح شیب است. علاوه بر این ۹ مورد، عامل دیگری تحت عنوان پتانسیل ناپایداری نیز در نظر گرفته شده است و دلیل آن بررسی ناپایداری شیب‌های مورد بررسی است. بنابراین تمامی درایه‌های سطر شامل عامل پتانسیل ناپایداری صفر است. بر اساس روش پیشنهادی PESQ، پنج ماتریس اندرکنش برای این ۱۰ عامل تشکیل شده است. با توجه به مبنای احتمالاتی این روش، مقادیر علت و اثر حاصل از ماتریس‌های اندرکنش برای عوامل نیز به صورت احتمالی به دست می‌آید. در شکل ۲-۱۳ نمودار علت-اثر عامل پنجم (هوازدگی) نشان داده شده است. به طور مشابه نمودارهای علت، اثر و علت-اثر برای سایر عوامل نیز قابل رسم است. همچنین در روش PESQ مقادیر اندرکنش (C+E) عوامل به صورت قطعی نخواهد بود. در شکل ۲-۱۴ نمودار میزان اندرکنش عوامل در سیستم با توجه به میانگین و انحراف معیار مربوط به هر عامل رسم شده است.



شکل ۲-۱۳- نمودار علت- اثر عامل ۵ (هوازدگی) (Zare Naghadehi et al., 2011)



شکل ۲-۱۴- میانگین و محدوده‌ی انحراف معیار اندرکنش ۱۰ عامل موثر بر پایداری شیب (Zare Naghadehi et al., 2011)

## ۲-۶- جمع‌بندی

در این فصل به معرفی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) پرداخته شد. سپس با مروری بر کاربردهای این رویکرد در علوم مختلف، بهبودهای صورت گرفته در کدگذاری ماتریس اندرکنش مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که روش پیشنهادی هادسون (ESQ) دارای محدودیت‌هایی از جمله گسسته بودن کدها و احتمال خطای قضاوت مهندسی در کدگذاری است، محققان دیگر سعی بر بهبود روش کدگذاری ماتریس اندرکنش نمودند. روش CQC که به صورت اعداد پیوسته است، بهبودی در گسسته بودن اعداد در روش ESQ داشته است. با استفاده از نظریه‌ی گراف، بررسی تاثیر هم‌زمان چند عامل بر عاملی دیگر ممکن می‌شود. همچنین استفاده از شبکه‌های عصبی و احتمالات نیز موجب کاهش خطای ناشی از قضاوت مهندسی می‌شود.

در پایان‌نامه‌ی حاضر، به منظور ارزیابی عوامل موثر بر ضریب بهره‌وری TBM از رویکرد RES و روش کدگذاری احتمالاتی (PESQ) که در سال ۲۰۱۱ ارائه گردیده استفاده شده است.

همان‌طور که در فصل اول اشاره شد، مطالعه‌ی موردی پژوهش حاضر پروژه‌ی قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران است. در فصل بعد به معرفی این پروژه پرداخته شده است و مسیر تونل مذکور پهنه‌بندی می‌گردد.

فصل سوم

معرفی پروژه‌ی قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی

تهران

### ۳-۱- مقدمه

مطالعه‌ی موردی که برای پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است، قطعه‌ی شرقی- غربی تونل خط ۷ متروی تهران است. روش اجرای تونل این قطعه، بر اساس مطالعات پایه و مسیر تعیین شده در طراحی فاز یک این پروژه ارائه شده است. روش اجرا بر اساس الزامات کارفرما، برنامه‌ی زمان‌بندی، اولویت‌های بهره‌برداری، موقعیت و شرایط ویژه‌ی شهری، ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی آبرفت‌های مسیر و سایر عوامل موثر طراحی شده است. در این فصل به معرفی پروژه‌ی قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران پرداخته می‌شود.

### ۳-۲- موقعیت جغرافیایی پروژه

قطعه‌ی شرقی- غربی تونل خط ۷ متروی تهران از شهرک امیرالمومنین (ایستگاه A7) در شرق تهران شروع شده و پس از عبور از بزرگراه بسیج، در طول بزرگراه شهید محلاتی به مسیر خود ادامه داده

و پس از اتصال به میدان قیام، در امتداد خیابان‌های مولوی و هلال احمر ادامه می‌یابد. پس از رسیدن به بزرگراه نواب صفوی مسیر آن در امتداد شمالی- جنوبی و در طول بزرگراه نواب تغییر کرده و تا تقاطع خیابان قزوین و بزرگراه نواب (ایستگاه N7) ادامه می‌یابد. این قطعه به جز ایستگاه N7، شامل ۱۳ ایستگاه است. طول تونل با احتساب طول ایستگاه‌ها، ۱۲/۳۶ کیلومتر است. علاوه بر تونل، اجرای این پروژه شامل احداث دسترسی میانی در مترآژ حدود ۵۵۰۰ (ایستگاه G7) واقع در تقاطع بزرگراه محلاتی و خیابان ۱۷ شهریور) و شفت دمونتاز دستگاہ قبل از ایستگاه A7 است (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸). پلان مسیر پروژه در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱- پلان قطعه‌ی شرقی- غربی تونل خط ۷ متروی تهران و موقعیت ایستگاه‌ها (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸)

### ۳-۳- مشخصات مسیر تونل مورد مطالعه

مسیر پروژه با طولی بیش از ۱۲ کیلومتر، شامل ۱۴ ایستگاه است. مقطع تونل به صورت دایره‌ای و با قطر حفاری ۹/۱۶ متر و قطر تمام شده‌ی (داخلی) ۸/۱۵ متر است (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸). مشخصات کلی تونل در جدول ۳-۱-۱ ارائه شده است.

جدول ۳-۱- مشخصات مسیر خط ۷ متروی تهران، قطعه‌ی شرقی- غربی (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۸۸)

نام تونل	متروی تهران، خط ۷، قطعه‌ی شرقی-غربی	مشخصات عمومی تونل
کاربری تونل	مترو	
طول مسیر	حدود ۱۲۳۰۰ متر	
تعداد ایستگاه‌ها	۱۳	
بیشترین روباره‌ی تونل	حدود ۲۵/۸ متر از تاج (در محدوده‌ی ایستگاه L7)	
کم‌ترین روباره‌ی تونل	حدود ۴/۵ متر از تاج (در محدوده‌ی ایستگاه A7)	
مقطع تونل	دایره‌ای	مشخصات هندسی تونل
قطر حفاری تونل	۹/۱۶۴ متر	
حداکثر شیب تونل	۳/۹ درصد (حد فاصل ایستگاه‌های A7 تا B7)	
حداقل شعاع قوس افقی مسیر تونل	۳۵۰ متر	
نوع پوشش	سگمنت بتنی تتراگونال	مشخصات پوشش نهایی تونل
ضخامت سگمنت‌ها	۳۵ سانتی‌متر	
عرض سگمنت	۱/۵ متر	
تعداد قطعات سگمنت در هر رینگ	۶ + ۱ قطعه کلید + ۱ قطعه سگمنت کف	

### ۳-۴- زمین‌شناسی مسیر تونل

این تونل در رسوبات آبرفتی دوره‌ی کواترنری حفر می‌شود. این رسوبات به طور عمده شامل خاک‌های شنی و ماسه‌ای رس و سیلت‌دار و در بخش‌هایی نیز خاک‌های رسی و سیلتی شن و ماسه‌دار است. طبق مطالعات زمین‌شناسی تکمیلی مسیر و بر اساس نتایج مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، لایه‌های خاکی در مسیر تونل به شش واحد زمین‌شناسی مهندسی (ET-1 تا ET-6) مطابق جدول ۳-۲ تفکیک شده‌اند (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).



جدول ۳-۲- واحدهای زمین‌شناسی مهندسی (ET) تفکیک شده در مسیر تونل (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۸۹)

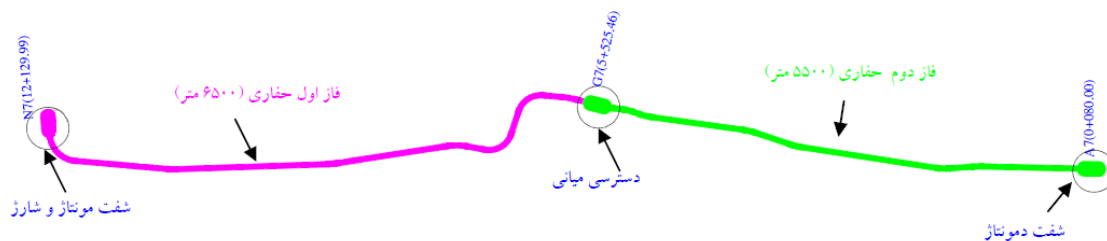
ردیف	واحد زمین‌شناسی مهندسی	توصیف خاک	درصد عبوری از الک ۲۰۰	نوع خاک (استاندارد یونیفاید)
۱	ET-1	sandy GRAVEL & gravelly SAND	۳-۱۲	GW, GW-GM, GPGC, SW & SP
۲	ET-2	very gravelly SAND with silt & clay	۱۲-۳۰	SC, SC-SM & GC
۳	ET-3	very silty clayey SAND with gravel, very sandy CLAY (or SILT) with gravel	۳۰-۶۰	SC, SM & CL
۴	ET-4	clayey silty SAND with gravel	۲۲-۳۴	SC, SM
۵	ET-5	clayey SILT & silty CLAY with sand, very sandy CLAY (or SILT)	> ۶۰	CL, ML & CL-ML (rarely CH)
۶	ET-6	very soft clayey sandy silt	> ۵۰	ML

واحد خاکی ET-1 از شن ماسه‌ای و در بعضی از محدوده‌ها از ماسه‌ی شنی تشکیل شده است و مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) برای واحد ET-1 بین ۳ تا ۱۲ درصد می‌باشد. واحد خاکی ET-2 در رده‌ی خاک‌های درشت‌دانه محسوب می‌گردد و جنس آن عمدتاً از ماسه‌ی شنی زیاد به همراه سیلت و رس تشکیل شده است و مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) بین ۱۲ تا ۳۰ درصد می‌باشد. ذرات تشکیل‌دهنده‌ی واحد خاکی ET-3 عمدتاً از ماسه‌ی رسی به همراه شن و به ندرت از رس ماسه‌ای تشکیل شده است و مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) آن بین ۳۰ تا ۶۰ درصد است که مقدار قابل توجهی می‌باشد. واحد خاکی ET-4 نیز در رده‌ی خاک‌های درشت‌دانه محسوب می‌گردد و جنس آن عمدتاً از ماسه‌ی رسی به همراه شن بوده و مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) بین ۲۲ تا ۳۴ درصد می‌باشد. ذرات تشکیل‌دهنده‌ی واحد خاکی ET-5 عمدتاً از سیلت رسی و

رس سیلتی به همراه مقدار اندکی ماسه تشکیل شده است. مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) این واحد بیشتر از ۶۰ درصد می‌باشد. ذرات تشکیل‌دهنده‌ی واحد ET-6 عمدتاً از سیلت ماسه‌ای تشکیل شده است و از لحاظ دانه‌بندی به واحد ET-5 و ET-3 شبیه می‌باشد، ولی با توجه به ضعیف بودن عوامل مکانیکی به عنوان یک واحد جداگانه معرفی گردیده است. البته این واحد در مسیر تونل گسترش کمی داشته و تنها در کیلومتر ۷+۱۰۰ تا ۷+۶۰۰ در محدوده‌ی بالای سقف تونل شناسایی شده است (Tarigh Azali et al., 2013).

### ۳-۵- روش حفاری تونل

قطعه‌ی شرقی- غربی تونل خط ۷، برای اجرا به دو بخش تقسیم شده است. بخش اول حد فاصل ایستگاه N7 تا G7، به طول تقریبی ۶۵۰۰ متر و بخش دوم حد فاصل ایستگاه G7 تا A7 به طول تقریبی ۵۵۰۰ متر است. حفاری از ایستگاه N7 (در متر اژ ۱۲۰۰۰) آغاز می‌شود. حد فاصل ایستگاه N7 تا ایستگاه G7 (متر اژ ۵۵۰۰) پشتیبانی حفاری از طریق چاه N7 انجام خواهد شد. پس از آن این قسمت از تونل برای عملیات کف‌سازی و تکمیل ایستگاه‌های مسیر، تحویل داده شده و ادامه‌ی پشتیبانی حفاری از طریق دسترسی ایجاد شده در محدوده‌ی ایستگاه G7، انجام می‌شود. پس از حفاری بخش دوم تونل، دمونتاز دستگاه در محدوده‌ی ایستگاه A7 انجام خواهد شد (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸) (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲- قطعه بندی مسیر تونل شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸)

در بخش اول (N7-G7)، ابتدا تونل حفاری می‌شود و حفاری ایستگاه‌ها با رعایت عدم تداخل با پشتیبانی حفاری، پس از عبور TBM انجام خواهد شد. در بخش دوم (G7-A7)، حفر ایستگاه‌ها قبل از رسیدن TBM انجام شده و ماشین از فضای باز ایستگاه عبور خواهد کرد (مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۸۸).

با توجه به شرایط خاک مسیر، وضعیت آب زیرزمینی و راندمان مورد نیاز، حفر تونل به روش مکانیزه‌ی تمام مقطع و با استفاده از یک دستگاه EPB-TBM انجام می‌شود. پیشروی تونل شامل نصب پوشش دایم تونل (قطعات بتنی پیش‌ساخته) و تزریق پشت سگمنت‌ها نیز خواهد بود. ماشین حفاری مورد نظر برای حفر این پروژه، ماشین با سپر EPB ساخت مشترک شرکت SELI و LOVAT است (مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۸۸).

سیکل حفاری شامل عملیات لازم و ترتیب فعالیت‌ها برای پیشروی ماشین است. این سیکل با توجه به شرایط زمین ممکن است تغییراتی داشته باشد. با این حال سه بخش اصلی عملیات عبارت است از حفاری، تزریق پرکننده و نصب سگمنت‌های پوشش تونل. در شرایط مختلف ممکن است عملیات دیگری به این فعالیت‌ها افزوده شود یا روش انجام این فعالیت‌ها تغییراتی داشته باشد. برای برنامه‌ریزی حفاری و تهیه‌ی لیست فعالیت‌ها و ترتیب انجام آن‌ها تعیین شرایط طبیعی حفاری و شرایط غیر طبیعی که در مسیر تونل بروز می‌کند ضروری است. در شرایط معمولی برای کار سپر EPB، عملیات اصلی حفاری و پیشروی ماشین عبارتند از:

- حفاری
- نصب سگمنت
- تزریق پشت سگمنت‌ها

سایر عملیات خدماتی لازم برای پیشروی عبارتند از:

- تعمیرات و نگهداری دستگاه
  - نصب ریل
  - افزایش طول نوار نقاله
  - نقشه‌برداری و کنترل مسیر تونل
  - نصب ابزار دقیق و رفتارنگاری زمین، سازه‌ی تونل و سازه‌های مسیر
- این عملیات در صورت امکان هم‌زمان با عملیات اصلی انجام می‌شود.

### ۳-۶- پهنه‌بندی مسیر تونل

به منظور برآورد ضریب بهره‌وری TBM مورد استفاده در قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران، مسیر این تونل پهنه‌بندی شده است. همان‌طور که اشاره شد، طول تونل مذکور حدود ۱۲ کیلومتر بوده که در زمان انجام این پژوهش تا متر ۴۰۰۰ حفاری شده است. برای پهنه‌بندی قسمت حفاری شده‌ی مسیر تونل، تغییرات چند عامل اصلی موثر بر بهره‌وری ماشین مد نظر قرار گرفته است. این عوامل شامل برخورد با معارضان زیرزمینی، عبور از زیر سازه‌های سطحی، آب ورودی به تونل، روباره و دانه‌بندی خاک است. با در نظر گرفتن تغییرات عوامل مذکور در طول مسیر تونل، ۱۵ پهنه حاصل گردیده است (جدول ۳-۳). همان‌طور که از جدول ۳-۳ ملاحظه می‌شود، طول پهنه‌های مسیر از ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر متغیر است.

با توجه به توضیحات ارائه شده در جدول ۳-۳، تقریباً هر یک از پهنه‌ها تحت تاثیر یکی از عوامل در نظر گرفته شده برای تقسیم‌بندی است. پهنه‌ی ۸ و ۱۳ نیز در اثر وجود پهنه‌های قبلی و بعدی هر کدام ایجاد شده است.

جدول ۳-۳- پهنه‌بندی مسیر تونل قطعه‌ی شرقی - غربی خط ۷ متروی تهران

توضیحات	طول (متر)	فاصله (از دهانه‌ی ورودی)		پهنه
		پایان	شروع	
معارض (پل قزوین)	۱۰۰	۰+۱۰۰	۰+۰۰۰	۱
معارض (ساختمان‌های محدوده نواب هلال احمر و شروع تونل رباط کریم)	۴۰۰	۰+۵۰۰	۰+۱۰۰	۲
از این پهنه میزان روباره افزایش یافته است.	۵۰۰	۱+۰۰۰	۰+۵۰۰	۳
تغییرات در نفوذپذیری (از ۱+۰۰۰ تا ۱+۳۰۰)	۲۰۰	۱+۲۰۰	۱+۰۰۰	۴
تقریباً از شروع این پهنه، سطح آب زیرزمینی بالای مقطع تونل قرار می‌گیرد.	۱۰۰	۱+۳۰۰	۱+۲۰۰	۵
کاهش میزان نفوذپذیری (تا ۲+۴۰۰)	۵۰۰	۱+۸۰۰	۱+۳۰۰	۶
معارض (ایستگاه و تونل خط ۳ - قنات غنی آباد) و افزایش میزان ریزدانه‌ی خاک	۱۰۰	۱+۹۰۰	۱+۸۰۰	۷
در اثر پهنه‌ی ۷ و ۹ ایجاد شده است.	۲۰۰	۲+۱۰۰	۱+۹۰۰	۸
تقریباً از شروع این پهنه میزان ریزدانه‌ی خاک کاهش یافته است.	۳۰۰	۲+۴۰۰	۲+۱۰۰	۹
معارض (قنات شوش - تونل انتقال آب خیام)	۴۰۰	۲+۸۰۰	۲+۴۰۰	۱۰
از این پهنه میزان روباره کاهش یافته است.	۲۰۰	۳+۰۰۰	۲+۸۰۰	۱۱
معارض (قنات امین الملک کرجی - قنات علی آباد مجد الدوله جدید و قدیم - ایستگاه F1 - قنات نجف آباد)	۵۰۰	۳+۵۰۰	۳+۰۰۰	۱۲
در اثر پهنه‌ی ۱۲ و ۱۴ ایجاد شده است.	۱۰۰	۳+۶۰۰	۳+۵۰۰	۱۳
تغییرات در نفوذپذیری (از ۳+۶۰۰ تا ۴+۳۰۰)	۲۰۰	۳+۸۰۰	۳+۶۰۰	۱۴
معارض (قنات شهاب الملک)	۲۰۰	۴+۰۰۰	۳+۸۰۰	۱۵

### ۳-۷- جمع‌بندی

در این فصل به طور خلاصه به معرفی پروژه‌ی قطعه‌ی شرقی - غربی خط ۷ متروی تهران پرداخته

شد. همچنین به منظور ارزیابی ضریب بهره‌وری TBM، مسیر تونل به ۱۵ پهنه (بخش) تقسیم گردید.

در فصل بعد به معرفی عوامل موثر بر ضریب بهره‌وری EPB-TBM پرداخته می‌شود. اطلاعات هر

یک از این عوامل نیز برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل مورد بررسی، طبقه‌بندی می‌گردد.

## فصل چهارم

عوامل موثر بر بهره‌وری ماشین حفرتونل تمام مقطع در

زمین‌های نرم

#### ۴-۱- مقدمه

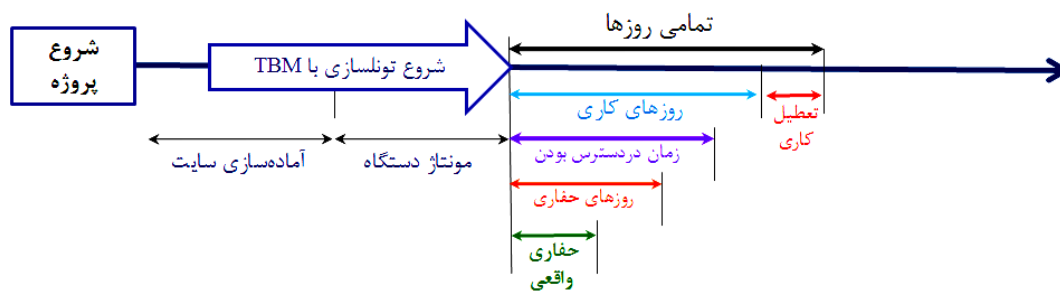
پیش‌بینی نحوه‌ی عملکرد TBM یکی از عوامل مهم در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌های مربوط به کارفرما، شرکت‌های مشاور و پیمانکار است. با توجه به این که تخمین زمان لازم برای انجام پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه وابستگی زیادی به بهره‌وری دستگاه مورد استفاده دارد و همچنین برآورد هزینه‌ها و اختصاص بودجه‌های مالی برای یک پروژه دارای ارتباط مستقیمی با مدت زمان اجرای آن پروژه است، لذا داشتن ضریب بهره‌وری دستگاه با توجه به شرایط مورد استفاده‌ی آن امری ضروری است.

در این فصل به معرفی عوامل موثر بر بهره‌وری EPB-TBM پرداخته می‌شود. این عوامل ۱۴ مورد بوده که در چهار دسته‌ی عوامل مربوط به زمین، عوامل محیطی، عوامل مربوط به طراحی و عامل انسانی قرار می‌گیرند. همچنین اطلاعات مربوط به تونل مورد بررسی، برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر طبقه‌بندی می‌شود.

## ۴-۲- مفهوم بهره‌وری TBM

یکی از مهم‌ترین عوامل در بررسی عملکرد<sup>۱</sup> ماشین حفرتونل تمام مقطع (TBM)، بهره‌وری<sup>۲</sup> ماشین است. بهره‌وری TBM با ضریب بهره‌وری و نرخ نفوذ<sup>۳</sup> مرتبط است. ضریب بهره‌وری درصدی از زمان است که دستگاه صرف حفاری می‌کند (Wittke, 2007). نرخ نفوذ، میزان نفوذ کله‌ی حفار<sup>۴</sup> در زمین در واحد زمان در حین حفاری است که معمولاً بر حسب میلی‌متر بر دقیقه (mm/min) بیان می‌شود. نرخ پیشروی<sup>۵</sup> تابع نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری است که بر حسب متر بر روز، هفته یا ماه بیان می‌شود. مطابق شکل ۴-۱، با توجه به بازه‌های زمانی قابل تعریف، ضریب بهره‌وری را نیز می‌توان به صورت‌های مختلف تعریف کرد (Rostami, 2010):

- ضریب بهره‌وری بر اساس روزهای حفاری<sup>۶</sup> ( $U_b$ )
- ضریب بهره‌وری بر اساس زمان‌های در دسترس بودن<sup>۷</sup> ( $U_a$ )
- ضریب بهره‌وری بر اساس روزهای کاری<sup>۸</sup> ( $U_w$ )
- ضریب بهره‌وری بر اساس روزهای کلی یا برنامه‌ریزی شده<sup>۹</sup> ( $U_c$ )



شکل ۴-۱- مفهوم تعاریف مختلف از ضریب بهره‌وری (Rostami, 2010)

<sup>1</sup> Performance  
<sup>2</sup> Utilization  
<sup>3</sup> Penetration rate  
<sup>4</sup> Cutter head  
<sup>5</sup> Advance rate  
<sup>6</sup> Boring days  
<sup>7</sup> Available time  
<sup>8</sup> Working days  
<sup>9</sup> Calendar days



با توجه به شکل ۴-۱، ضریب بهره‌وری TBM (UF) در پژوهش حاضر بر اساس روزهای کاری تعریف می‌شود ( $U_w$ ). این ضریب مطابق رابطه‌ی (۴-۱) به صورت نسبت زمان واقعی حفاری به روزهای کاری محاسبه می‌گردد.

$$(۴-۱) \quad \text{ضریب بهره‌وری (UF)} = \frac{\text{زمان واقعی حفاری}}{\text{روزهای کاری}}$$

با استفاده از رابطه‌ی فوق، ضریب بهره‌وری TBM برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل مورد مطالعه محاسبه گردیده و در جدول ۴-۱ ارائه شده است.

جدول ۴-۱- ضریب بهره‌وری پهنه‌های مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران

ضریب بهره‌وری (بر حسب درصد)	طول (متر)	فاصله (از دهانه‌ی ورودی)		پهنه
		شروع	پایان	
۹/۸	۱۰۰	۰+۱۰۰	۰+۰۰۰	۱
۱۱/۴	۴۰۰	۰+۵۰۰	۰+۱۰۰	۲
۲۵/۶	۵۰۰	۱+۰۰۰	۰+۵۰۰	۳
۲۲	۲۰۰	۱+۲۰۰	۱+۰۰۰	۴
۱۹/۸	۱۰۰	۱+۳۰۰	۱+۲۰۰	۵
۱۶/۷	۵۰۰	۱+۸۰۰	۱+۳۰۰	۶
۲۹/۴	۱۰۰	۱+۹۰۰	۱+۸۰۰	۷
۳۰/۷	۲۰۰	۲+۱۰۰	۱+۹۰۰	۸
۲۶/۷	۳۰۰	۲+۴۰۰	۲+۱۰۰	۹
۲۲/۶	۴۰۰	۲+۸۰۰	۲+۴۰۰	۱۰
۳۰/۸	۲۰۰	۳+۰۰۰	۲+۸۰۰	۱۱
۲۸/۲	۵۰۰	۳+۵۰۰	۳+۰۰۰	۱۲
۲۷/۴	۱۰۰	۳+۶۰۰	۳+۵۰۰	۱۳
۲۵/۴	۲۰۰	۳+۸۰۰	۳+۶۰۰	۱۴
۱۲/۹	۲۰۰	۴+۰۰۰	۳+۸۰۰	۱۵

ضریب بهره‌وری TBM بر اساس روند پیشروی ماشین، شرایط زمین‌شناسی، توقفات و تاخیرات محاسبه می‌شود. زمان نصب رینگ‌های سگمندی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده‌ی ضریب بهره‌وری در ماشین‌های تک سپره است. در تونل‌سازی با TBM در زمین‌های نرم و به ویژه محیط‌های شهری، شرایط نامناسب زمین‌شناسی و وجود معارضان و موانعی که عبور از آن‌ها نیازمند اقدامات ویژه است، مانند قنات‌ها، تقاطع با سایر تونل‌ها و خدمات شهری، عبور از زیر ساختمان‌های مهم و حساس، حفر تونل با روباره‌ی کم، حفاری در خاک‌های حاوی قطعات سنگی، جبهه‌کارهای مختلط، شرایط پیش‌بینی نشده‌ی زمین، برخورد با مخازن فاضلاب یا حفره‌های مصنوعی و طبیعی مدفون و مواردی از این قبیل نیز به شدت بر بهره‌وری دستگاه موثر بوده و باعث کاهش آن می‌شود. علاوه بر این مدیریت و پشتیبانی مناسب کارگاه و تجربه‌ی تیم حفاری نیز از جمله موارد تاثیرگذار بر بهره‌وری ماشین است.

نرخ نفوذ TBM، وابسته به شرایط زمین و مشخصات و قابلیت‌های دستگاه است. در زمین‌های نرم، طراحی کله‌ی حفار و ابزارهای حفاری، کارایی سیستم تزریق فوم و بهسازی شرایط خاک، سیستم تزریق دوغاب، میزان نیروی پیشران و گشتاور دستگاه و سرعت باز شدن جک‌های رانش، ظرفیت سیستم ترابری به ویژه نقاله‌ی مارپیچ، سرعت چرخش کله‌ی حفار و قابلیت سیستم روانکاری و سیستم خنک‌کننده و کارایی سیستم آب‌بندی از جمله عوامل دستگاه است که محدودکننده‌ی نرخ نفوذ بوده و باید به گونه‌ای طراحی شوند که ماشین قابلیت حفاری با بیشترین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده را داشته باشد. جنس زمین (به ویژه دانه‌بندی و ساینده‌ی خاک)، تراز آب، وجود جبهه‌کار مختلط و به ویژه وجود قطعه‌سنگ‌ها، تغییرات جنس خاک، حساسیت‌های مربوط به نشست زمین در سطح نیز از جمله مواردی است که بر نرخ نفوذ تاثیرگذار است.

## ۳-۴- عوامل موثر بر بهره‌وری TBM

به منظور ارزیابی ضریب بهره‌وری ماشین TBM از نوع EPB، عوامل موثر مورد بررسی قرار گرفته و

در این بخش ارزیابی شده است (جدول ۲-۴).

جدول ۲-۴- عوامل موثر بر ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم

ردیف	دسته	عامل
۱	عوامل مربوط به زمین	دانه‌بندی خاک (P <sub>1</sub> )
۲		شاخص استحکام (P <sub>2</sub> )
۳		سینه‌کار مختلط (P <sub>3</sub> )
۴		انسداد (P <sub>4</sub> )
۵		آب ورودی به تونل (P <sub>5</sub> )
۶		سایندگی خاک (P <sub>6</sub> )
۷		وجود قطعه سنگ (P <sub>7</sub> )
۸		فشار زمین (P <sub>8</sub> )
۹	عوامل محیطی	برخورد با معارضان زیرزمینی (P <sub>9</sub> )
۱۰		عبور از زیر سازه‌های سطحی (P <sub>10</sub> )
۱۱	عوامل مربوط به طراحی	نسبت عمق (روباره) به قطر تونل (P <sub>11</sub> )
۱۲		شیب تونل (P <sub>12</sub> )
۱۳		قوس مسیر تونل (P <sub>13</sub> )
۱۴	عامل انسانی	تجربه و مهارت (P <sub>14</sub> )

مطابق جدول ۴-۲، عوامل موثر بر بهره‌وری EPB-TBM، ۱۴ مورد بوده و در چهار دسته‌ی کلی عوامل مربوط به زمین، عوامل محیطی، عوامل مربوط به طراحی و عامل انسانی قرار می‌گیرند. در ادامه به معرفی اجمالی ۱۴ عامل مذکور پرداخته می‌شود. پس از معرفی هر عامل، معیاری برای طبقه‌بندی آن ارائه گردیده است. هر معیار طبقه‌بندی شامل چند دسته بوده و با توجه به شرایط کاربرد EPB-TBM، به هر یک از دسته‌ها امتیازی اختصاص داده می‌شود. هرچه دستگاه شرایط کارکرد بهتر و بهره‌وری بالاتری در دسته داشته باشد، امتیاز بیشتری به آن دسته تعلق می‌گیرد. امتیازبندی به نحوی بوده که برای بدترین شرایط، امتیاز صفر و برای شرایط بهتر، اعداد صحیح بزرگ‌تر مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال، برای معیاری که دارای ۳ دسته بوده، از اعداد صفر، ۱ و ۲ به منظور امتیازدهی دسته‌ها استفاده می‌شود. امتیازهای معیارهای طبقه‌بندی، بر اساس نظر کارشناسان تونل‌سازی تعیین شده است. در نهایت نیز اطلاعات تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران بر اساس معیارهای ارائه شده، طبقه‌بندی می‌گردد.

#### ۴-۳-۱- عوامل مربوط به زمین

عوامل این دسته مربوط به زمین و ویژگی‌های آن در منطقه‌ی حفر تونل هستند. این عوامل عبارتند

از:

#### ۴-۳-۱-۱- دانه‌بندی خاک

به طور کلی ماشین حفرتونل فشار تعادلی زمین (EPB) برای زمین‌هایی که دارای ذرات ریزدانه‌ی قابل توجهی باشند، مناسب‌تر است و مقدار ذرات ریزدانه یکی از عوامل موثر بر عملکرد ماشین محسوب می‌گردد (DAUB, 1997; ITA, 2001)؛ زیرا کاهش ذرات ریزدانه به طور کلی سبب افزایش اصطکاک و نفوذپذیری می‌شود و افزایش این عوامل سبب افزایش قابل توجه در ساینده‌ی خاک و یا خروج آب از نوار

نقاله مارپیچ خواهد شد و عدم توجه به این عامل می‌تواند سبب بروز خسارات قابل توجهی در روند حفاری شود. در عین حال حفاری در زمین‌هایی که درصد ریزدانه در آن‌ها کم باشد امکان‌پذیر است، ولی نیاز به تمهیدات خاصی مانند بهسازی شرایط خاک<sup>۱۰</sup> و صرف هزینه‌ی بیشتر وجود دارد.

به منظور طبقه‌بندی عامل دانه‌بندی در طول مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران، از معیار ارایه شده توسط کمیته‌ی سازه‌های زیرزمینی آلمان (DAUB<sup>۱۱</sup>) در سال ۲۰۱۰ استفاده شده است (جدول ۳-۴) (DAUB, 2010). همان‌طور که ملاحظه می‌شود این معیار شامل ۴ دسته بر حسب دانه‌بندی کوچک‌تر از ۰/۰۶ میلی‌متر است. اطلاعات دانه‌بندی مربوط به پروژه‌ی مورد مطالعه بر اساس معیار مذکور، برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل طبقه‌بندی گردیده و در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.<sup>۱۲</sup>

جدول ۳-۴- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس دانه‌بندی (DAUB, 2010)

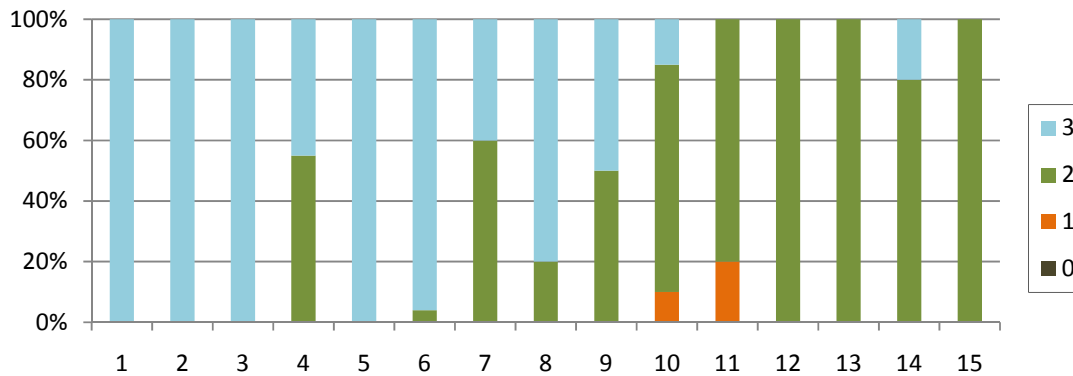
ردیف	میزان ریزدانه (دانه‌بندی کوچک‌تر از ۰/۰۶ میلی‌متر) بر حسب درصد	توضیحات	امتیاز
۱	صفر تا ۵	کاربری بحرانی برای ماشین EPB (نامناسب)	۰
۲	۵ تا ۱۵	استفاده از ماشین EPB امکان‌پذیر است	۱
۳	۱۵ تا ۴۰	نسبتاً مناسب برای ماشین EPB	۲
۴	۴۰ تا ۱۰۰	مناسب برای ماشین EPB	۳

<sup>10</sup> Soil Conditioning

<sup>11</sup> German Committee for Underground Construction (DAUB)

<sup>12</sup> اطلاعاتی که از دانه‌بندی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران موجود بوده است، میزان ریزدانه عبوری از الک ۲۰۰ (ابعاد کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر) است. در سیستم طبقه‌بندی آلمانی (DAUB 2010)، مرز ریزدانه ۰/۰۶ میلی‌متر است. با توجه به این که نمودار دانه‌بندی به صورت نیمه لگاریتمی است، با تقریب مناسبی اطلاعات دانه‌بندی خط ۷ متروی تهران بر حسب معیار DAUB 2010 طبقه‌بندی شده است.

## دانه‌بندی خاک



شکل ۲-۴- توزیع آماری دانه‌بندی خاک برای پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار (DAUB, 2010)

## ۲-۱-۳-۴- شاخص استحکام

شاخص استحکام<sup>۱۳</sup> یکی از عوامل بسیار مهم در تحلیل ژئوتکنیکی است. این شاخص اولین بار در

سال ۱۹۵۸ ارایه شده است و با استفاده از رابطه‌ی (۲-۴) محاسبه می‌شود (ASCE, 1958).

$$I_c = \frac{LL - w}{LL - PL} = \frac{LL - w}{PI} \quad (2-4)$$

در این رابطه LL حد روانی، PI شاخص خمیری و w درصد رطوبت طبیعی خاک است. در رابطه‌ی

فوق، عوامل LL و PI جزو خصوصیات ذاتی یک خاک محسوب می‌شوند و تغییرپذیر نیستند، ولی درصد

رطوبت یک خاک می‌تواند به راحتی تغییر نماید که این تغییر، تاثیر مستقیم بر روی قوام و استحکام

خاک خواهد داشت. بنابراین تغییر شرایط شاخص استحکام یکی از عوامل بسیار مهم در تحلیل وضعیت

ژئوتکنیکی زمین برای تونل‌سازی سپری است؛ به طوری که در شرایط استحکام بالا ( $I_c > 1$ ) و نفوذپذیری

پایین نیازی به اعمال فشار به جبهه کار نبوده و می‌توان از دستگاه در حالت باز<sup>۱۴</sup> استفاده نمود. در صورتی

<sup>13</sup> Consistency Index

<sup>14</sup> Open mode

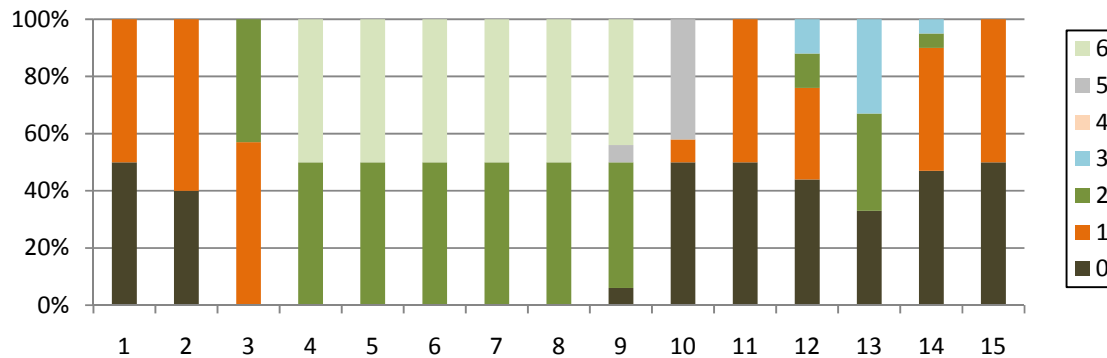
که استحکام جبهه کار تونل پایین باشد ( $I_c=0/4-0/75$ )، برای پیشروی باید جبهه کار نگهداری شود و سپر به صورت بسته کار کند (Maidl et al., 1996).

به منظور طبقه‌بندی عامل شاخص استحکام در پروژه‌ی مورد مطالعه، از معیار ارزیابی شده در سال ۲۰۰۰ استفاده شده است (جدول ۴-۴) (Bell, 2000). همان‌طور که ملاحظه می‌شود این معیار شامل ۶ دسته بر حسب مقدار شاخص استحکام ( $I_c$ ) است. در شرایطی که خاک حالت خمیری نداشته باشد (میزان رس کم) نمی‌توان مقدار  $I_c$  را اندازه‌گیری کرد (No Plasticity). با توجه به این که چنین شرایطی عموماً برای خاک‌های درشت‌دانه وجود دارد و TBM نوع EPM مناسب برای خاک‌های ریزدانه است، در این شرایط امتیاز صفر برای شاخص استحکام در نظر گرفته شده است. بنابراین مطابق جدول ۴-۴، امتیازدهی دسته‌های این معیار از ۱ شروع می‌شود. مناسب‌ترین محدوده‌ی شاخص استحکام برای کارکرد EPB-TBM، بازه‌ی ۰/۵ تا ۰/۷۵ بوده که مطابق جدول ۴-۴ بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده است. در شرایطی که شاخص استحکام مقادیر کمتری داشته باشد می‌توان با بهسازی زمین، شرایط مناسب‌تری برای کار دستگاه فراهم کرد؛ در صورتی که برای شرایطی که مقادیر شاخص استحکام بیشتر است، چنین کاری مقدور نیست. اطلاعات شاخص استحکام مربوط به پروژه‌ی مورد مطالعه بر اساس معیار مذکور، برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل طبقه‌بندی گردیده و در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس شاخص استحکام (Bell, 2000)

امتیاز	توضیحات	مقدار شاخص استحکام ( $I_c$ )	ردیف
۳	Liquid	کمتر از صفر	۱
۴	Very Soft	صفر تا ۰/۲۵	۲
۵	Soft	۰/۲۵ تا ۰/۵	۳
۶	Firm	۰/۵ تا ۰/۷۵	۴
۲	Stiff	۰/۷۵ تا ۱	۵
۱	Very Stiff to Hard	بیشتر از ۱	۶

## شاخص استحکام



شکل ۴-۳- توزیع آماری شاخص استحکام در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار (Bell, 2000)

## ۴-۳-۱-۳- سینه‌کار مختلط

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

با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، لایه‌های خاکی در برگیرنده‌ی مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران به شش واحد (گونه) زمین‌شناسی مهندسی<sup>۱۵</sup> 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، چگونگی دانه‌بندی خاک در هر واحد است. در تفکیک این واحدها سعی بر این بوده که هر یک از آنها از نظر ویژگی‌های ژئوتکنیکی و همچنین از لحاظ الگوی رفتاریشان با ماشین EPB، دارای ویژگی‌های تقریباً یکسانی باشند (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).

<sup>15</sup> Engineering Geological Type

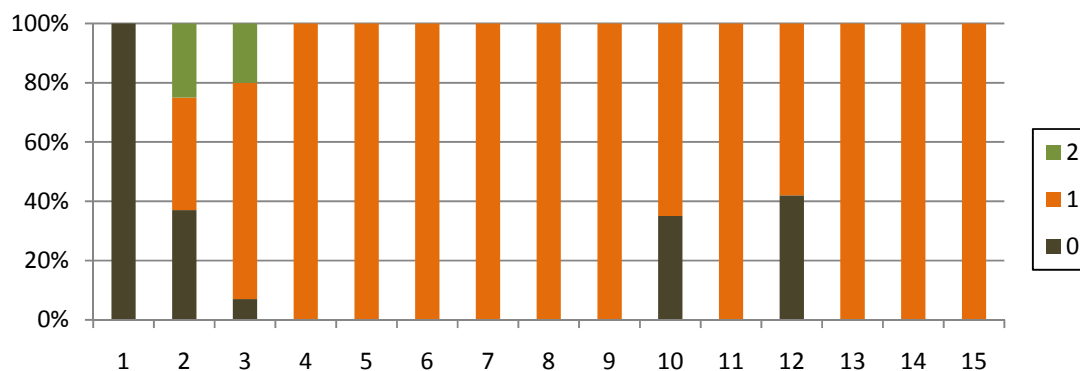


به منظور لحاظ کردن تغییرات شرایط زمین‌شناسی در طول مسیر تونل مورد بررسی، طبقه‌بندی ارایه شده در جدول ۴-۵ در نظر گرفته شده است. این طبقه‌بندی بر اساس تعداد واحد زمین‌شناسی که در هر پهنه از مسیر تونل قرار می‌گیرد صورت گرفته است. با توجه به معیار طبقه‌بندی شرایط زمین‌شناسی که در جدول ۴-۵ ارایه شد، مسیر تونل مورد مطالعه طبقه‌بندی گردیده و در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۵- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس سینه‌کار مختلط

ردیف	تغییرپذیری شرایط زمین	توضیحات (وضعیت سینه‌کار)	امتیاز
۱	زیاد	بیش از دو واحد زمین‌شناسی در سینه‌کار تونل قرار گیرد.	۰
۲	متوسط	دو واحد زمین‌شناسی در سینه‌کار تونل قرار گیرد.	۱
۳	کم	یک واحد زمین‌شناسی در سینه‌کار تونل قرار گیرد.	۲

سینه‌کار مختلط



شکل ۴-۴- توزیع آماری سینه‌کار مختلط در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۵

## ۴-۳-۱-۴- انسداد

در تونل‌هایی که ماشین حفر تونل برای حفاری خاک‌های چسبنده به کار گرفته می‌شود، همواره مخاطره‌ی انسداد<sup>۱۶</sup>، ماشین را تهدید می‌کند. در چنین زمین‌هایی چسبندگی رس به سطوح فلزی ماشین سبب کاهش بهره‌وری ماشین می‌گردد. به طور کلی چسبندگی ذرات خاک به ابزار برشی، کله‌ی حفار، اتاقک فشار و حتی نوار مارپیچ<sup>۱۷</sup> می‌تواند سبب پدیده‌ی انسداد در ماشین شود. در چنین مواقعی ماشین باید کاملاً متوقف شده و کله‌ی حفار و اتاقک فشار کاملاً تمیز گردد. اگرچه دانه‌بندی مناسب برای ماشین EPB، در محدوده‌ی خاک‌های ریزدانه است ولی در مقابل، مخاطره‌ی انسداد ماشین نیز در چنین زمین‌هایی وجود دارد.

به منظور ارزیابی رفتار چسبناکی و مخاطره‌ی انسداد، در طی یک دهه‌ی گذشته محققین بسیاری در حال تحقیق و بررسی بوده‌اند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به معیارهای ارایه شده‌ی ژئودیتا<sup>۱۸</sup> و توز<sup>۱۹</sup> اشاره نمود (GEODATA, 1995; Thewes and Burger, 2004). در روش ژئودیتا بر اساس شاخص خمیری ( $I_p$ ) و نسبت بین درصد رطوبت و حد خمیری ( $W_n/W_p$ ) رفتار چسبناکی خاک‌ها به سه گروه کم، متوسط و بالا دسته‌بندی می‌شود. در روش توز (۲۰۰۴) بر مبنای شاخص استحکام ( $I_c$ ) و شاخص خمیری (PI)، پتانسیل مخاطره‌ی انسداد به سه گروه مخاطره‌ی کم، متوسط و بالا دسته‌بندی می‌گردد. قابل ذکر است که از این معیار برای ارزیابی مخاطره‌ی انسداد در بسیاری از پروژه‌های دنیا استفاده شده و نسبت به روش ژئودیتا پرکاربردتر بوده است (Martinotto and Langmaack, 2007; Marinos et al., 2008; Marinos et al., 2009; Sass and Burbaum, 2009).

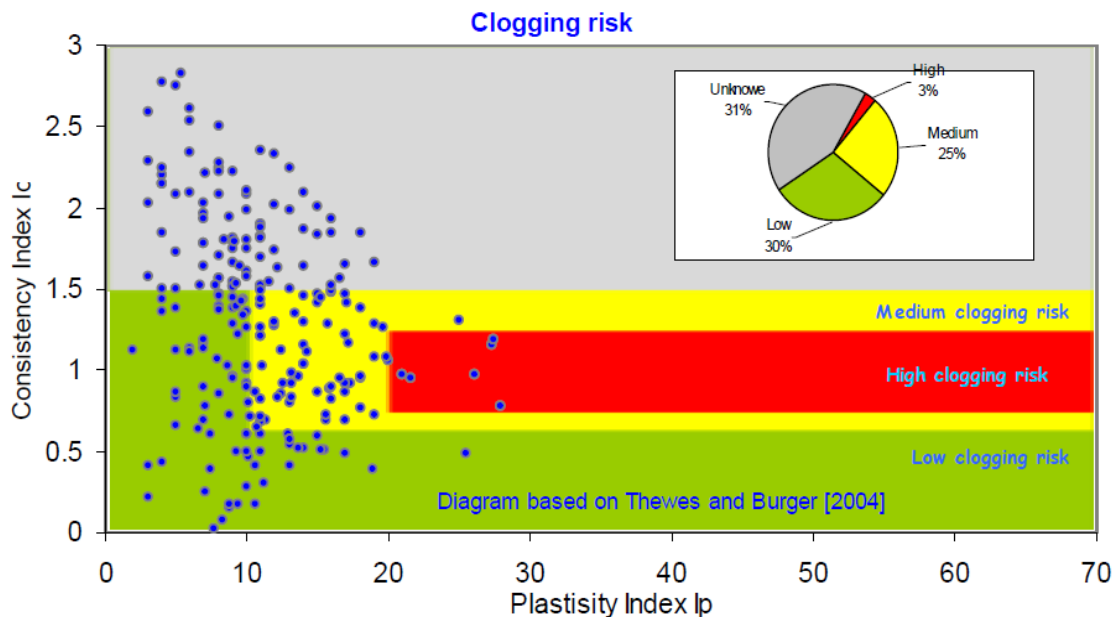
<sup>16</sup> Clogging risk

<sup>17</sup> Screw

<sup>18</sup> GEODATA

<sup>19</sup> Thewes

برای طبقه‌بندی عامل انسداد در پروژه‌ی مورد مطالعه از معیار ارایه شده توسط توز و برگر در سال ۲۰۰۴ استفاده شده است (Thewes and Burger, 2004). پراکندگی داده‌های انسداد مربوط به مسیر تونل خط ۷ متروی تهران بر اساس این معیار در شکل ۴-۵ ارایه گردیده است.



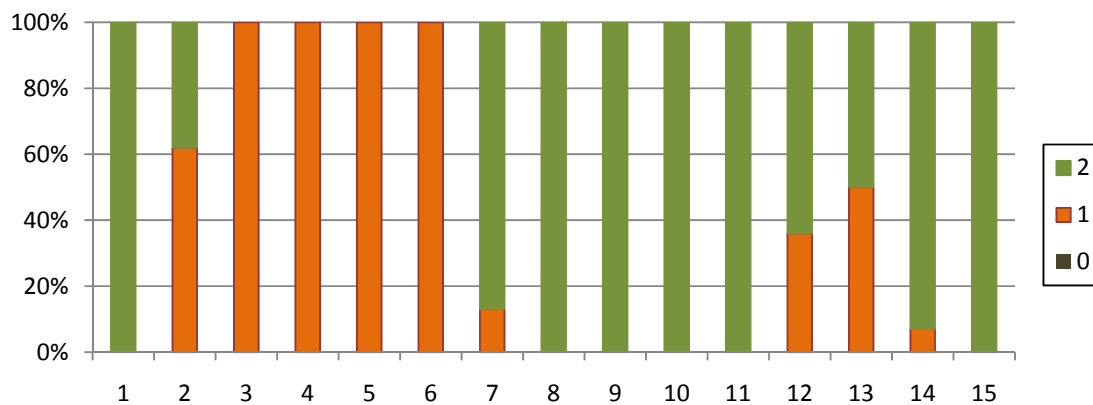
شکل ۴-۵- مخاطره‌ی انسداد برای تمامی داده‌های مسیر تونل (بر اساس معیار (Thewes and Burger, 2004))

همان‌طور که در شکل ۴-۵ ملاحظه می‌شود، این معیار، داده‌های مسیر را بر اساس شاخص خمیری و شاخص استحکام در ۳ دسته طبقه‌بندی می‌کند. بدیهی است که هرچه مخاطره‌ی انسداد کمتر باشد، شرایط کاری ماشین بهتر خواهد بود. لذا امتیازبندی ارایه شده در جدول ۴-۶ برای معیار مذکور در نظر گرفته شده است. پهنه‌های مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران بر اساس معیار توز و برگر طبقه‌بندی گردیده و در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۶- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس مخاطره‌ی انسداد (Thewes and Burger, 2004)

امتیاز	مخاطره‌ی انسداد	ردیف
۰	زیاد	۱
۱	متوسط	۲
۲	کم	۳

مخاطره‌ی انسداد



شکل ۴-۶- توزیع آماری مخاطره‌ی انسداد در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۶

#### ۴-۳-۱-۵- آب ورودی به تونل

یکی از چالش‌های عمده در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه، آب ورودی به تونل از طریق سپر<sup>۲۰</sup> عقبی و یا نوار مارپیچ است. دو عامل اصلی که آب ورودی به تونل را کنترل می‌کنند، نفوذپذیری خاک و سطح آب زیرزمینی نسبت به تراز تونل است.

نفوذپذیری زمین یکی از عوامل بسیار مهم در انتخاب ماشین مناسب و کنترل عملکرد ماشین در طی حفاری می‌باشد. گرچه این عامل به نحوی در دانه‌بندی خاک نهفته است لیکن به طور دقیق‌تر با

<sup>20</sup> Shield

استفاده از نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس تحقیقاتی محدودی نفوذپذیری  $10^{-7}$  متر بر ثانیه برای ماشین‌های Slurry و EPB پیشنهاد شده بود (Wassmer et al., 2001). اما تحقیقات انجام شده در پروژه‌های اخیر نشان داده است که محدوده‌ی مجاز برای ماشین‌های EPB گسترده‌تر از این مقدار بوده و  $10^{-5}$  متر بر ثانیه را مرز قرار داده‌اند (Anonymous, 2005; BTS, 2005).

وجود آب در تونل می‌تواند بر روند فعالیت‌های تونل‌سازی بسیار تاثیرگذار باشد. در تونل‌سازی مکانیزه، حضور آب بر نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری دستگاه تاثیرگذار است. حضور آب در زمین‌های نرم تاثیر بسزایی در تغییرات عوامل مقاومتی خاک دارد.

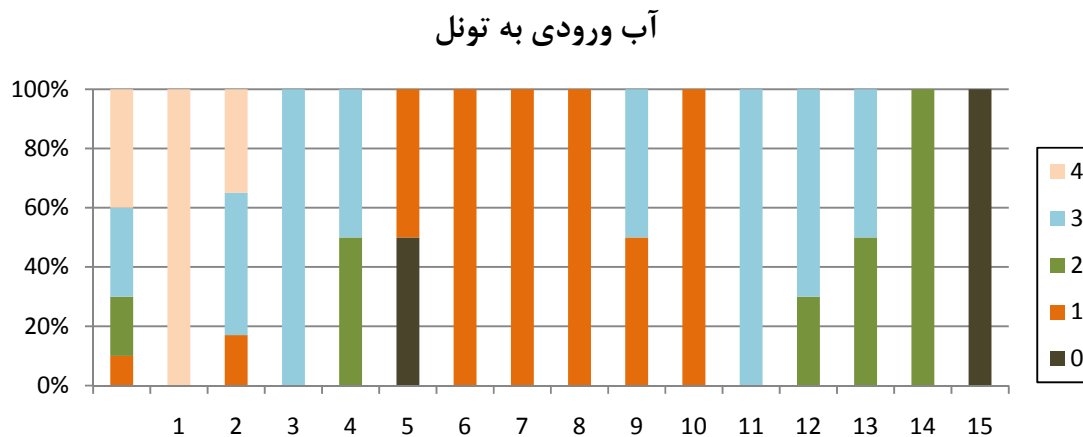
در این پژوهش به منظور اعمال عامل آب ورودی به تونل، از تلفیق دو عامل نفوذپذیری و سطح آب زیرزمینی استفاده شده است. برای طبقه‌بندی عامل آب ورودی به تونل در طول مسیر تونل، از معیار ارایه شده در جدول ۴-۷ استفاده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این معیار شامل ۵ دسته بر حسب شرایط سطح آب زیرزمینی و میزان نفوذپذیری است؛ برای نفوذپذیری، مقدار  $10^{-5}$  متر بر ثانیه به عنوان مرز در نظر گرفته شده است. همچنین برای سطح آب زیرزمینی، وضعیت قرارگیری آن نسبت به مقطع تونل مورد نظر است.

جدول ۴-۷- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس آب ورودی به تونل

ردیف	شرایط سطح آب زیرزمینی و نفوذپذیری	امتیاز
۱	سطح آب در بالای مقطع تونل و مقدار نفوذپذیری خاک بیشتر از $10^{-5}$ متر بر ثانیه باشد.	۰
۲	سطح آب در بالای مقطع تونل و مقدار نفوذپذیری خاک کمتر از $10^{-5}$ متر بر ثانیه باشد.	۱
۳	سطح آب در مقطع تونل و مقدار نفوذپذیری خاک بیشتر از $10^{-5}$ متر بر ثانیه باشد.	۲
۴	سطح آب در مقطع تونل و مقدار نفوذپذیری خاک کمتر از $10^{-5}$ متر بر ثانیه باشد.	۳
۵	سطح آب در زیر مقطع تونل باشد.	۴

اطلاعات آب ورودی به تونل برای پروژه‌ی مورد مطالعه بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۷، در

۱۵ پهنه‌ی مسیر طبقه‌بندی گردیده و در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۷- توزیع آماری آب ورودی به تونل در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۷

#### ۴-۳-۱-۶- ساینده‌ی خاک

ساینده‌ی خاک<sup>۲۱</sup> معمولاً به عنوان ویژگی و یا پتانسیل یک زمین که علت سایش و خوردگی ابزار و قطعات ماشین است تعریف می‌شود. این پدیده سبب کاهش قابل توجه در راندمان فرآیند حفاری می‌گردد. همچنین تاخیرات زمانی ناشی از توقف که برای تعویض ابزارها و قطعات ساینده شده صرف می‌شود، غیر قابل اجتناب است ( Anonymous, 2005; BTS, 2005; Nilsen et al., 2006; Nilsen al., 2007; Thuro and Käsling, 2009). به طور کلی منابع گسترده‌ای درباره‌ی حساسیت و پیش‌بینی سایش و خوردگی در مورد سنگ‌ها از قبل وجود دارد، در صورتی که برای خاک در مقایسه با سنگ، مطالعات بسیار کمی موجود است. در طی دهه‌ی اخیر چندین تحقیق گسترده در این باره انجام شده است ( Thuro and Plinninger, 2003; Nilsen et al., 2006; Thuro et al., 2006; Nilsen et al., 2006).

<sup>21</sup> Abrasiveness of Soil

(2007; Plinninger and Restner, 2008; Thuro and Käsling, 2009). به طور کلی عوامل زمین‌شناسی

که بر روی سایش موثر هستند به سه دسته‌ی ذیل قابل تقسیم است.

**نوع کانی‌های تشکیل دهنده دانه‌های خاک:** از لحاظ زمین‌شناسی همه‌ی سنگ‌ها و خاک‌ها از

یک سری کانی‌هایی تشکیل شده‌اند که دارای سختی متفاوتی هستند. مقدار کانی‌های سخت موجود در

خاک‌ها و سنگ‌ها عامل اصلی تعیین میزان ساینده‌ی خاک‌ها و سنگ‌ها بوده و اثر مستقیمی بر طول عمر

ابزار و قطعات ماشین دارد.

**توزیع دانه‌بندی:** به طور کلی قابلیت ساینده‌ی زمین با افزایش ابعاد ذرات خاک بیشتر می‌شود.

**گردشده‌ی ذرات خاک:** عموماً ساینده‌ی با کاهش درجه‌ی گردشده‌ی، افزایش می‌یابد. زیرا ذراتی

با لبه‌های تیز سبب ساینده‌ی و خوردگی بیشتری می‌شود.

به منظور بررسی ساینده‌ی خاک از شاخص‌های ژئوتکنیکی مانند نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی

خاک، تعیین درصد کوارتز و سایر کانی‌های ساینده، دانه‌بندی و اندازه‌ی ذرات استفاده می‌شود. این

روش‌ها به جای استفاده از دستگاه‌های ویژه‌ی آزمایشگاهی، برای بررسی میزان ساینده‌ی از عوامل ذاتی

استاندارد خاک و یا سنگ استفاده می‌کنند.

علاوه بر روش‌های فوق، آزمایش‌هایی وجود دارد که در مقیاس آزمایشگاهی برای بررسی ساینده‌ی

خاک انجام می‌شود. در طی سالیان گذشته تحقیقات زیادی بر روی روابط همبستگی بین عوامل

ژئوتکنیکی و شاخص‌های ساینده‌ی انجام شده است. یکی از آزمایش‌های پرکاربرد برای بررسی ساینده‌ی

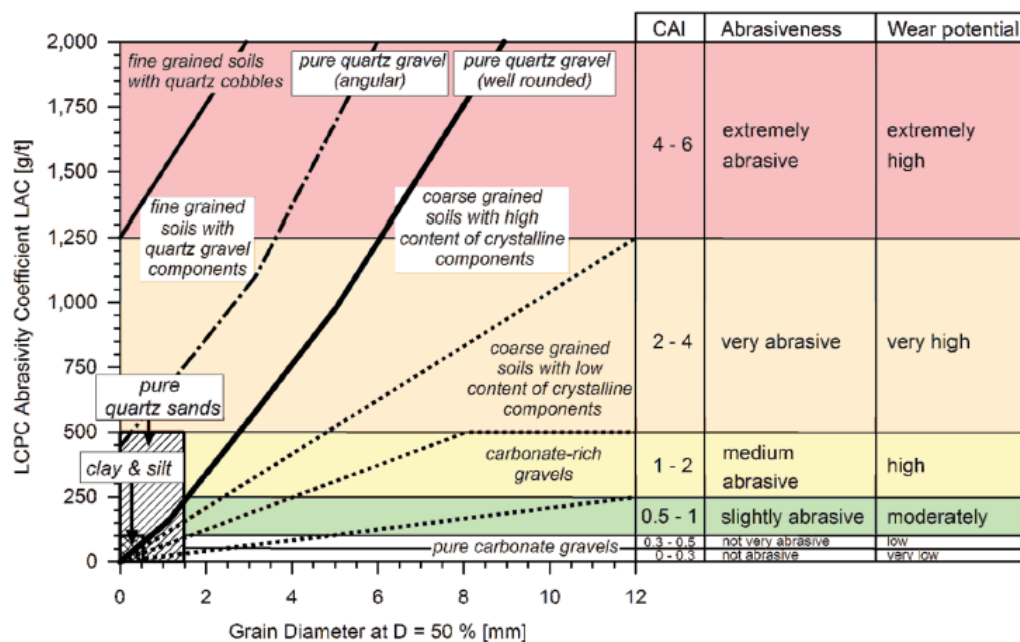
خاک، آزمایش<sup>۲۲</sup> LCPC است که با استفاده از آن شاخص ساینده‌ی (LAC یا LCPC ABR) برآورد

می‌گردد (Normalisation Française, 1990). تورو<sup>۲۳</sup> و همکارانش در طی سالیان گذشته در میان

<sup>22</sup> Labroatoire Central de Ponts et Chaussées

<sup>23</sup> Thuro

آزمایش‌های مخصوص ساینده‌ی خاک، با استفاده از آزمایش LCPC در آزمایشگاه عوامل فوق را مورد بررسی قرار دادند و سپس نتایج به دست آمده را نیز در یک نمودار به صورت روابط همبستگی درج نمودند (Thuro et al., 2007; Thuro and Käsling, 2009). در این دیاگرام، متوسط اندازه‌ی ذرات (۵۰ درصد از ذرات، D50%) در مقابل ضریب ساینده‌ی LCPC (LAC) ترسیم شده است و نتایج به دست آمده از آن در شکل ۴-۸ به صورت یک نمودار طبقه‌بندی نشان داده شده است؛ در این نمودار با مشخص بودن مقدار D50 و همچنین نوع و جنس خاک (برای خاک‌های مختلف محدوده‌های مشخصی لحاظ شده است) می‌توان پتانسیل سایش و خوردگی خاک را رده‌بندی کرد و مقدار ضریب ساینده‌ی LCPC (LAC) را نیز برآورد نمود.



شکل ۴-۸- رده‌بندی خاک با هدف برآورد پتانسیل ساینده‌ی خاک بر اساس D50 (Thuro and Käsling, 2009)

زمانی که ماشین حفرتونل با زمین‌هایی مواجه می‌شود که پتانسیل ساینده‌ی دارند، باید تعمیر و نگهداری ابزارهای حفاری به طور منظم در دستور کار تیم حفاری قرار گیرد. بازدید روزانه از کله‌ی حفار



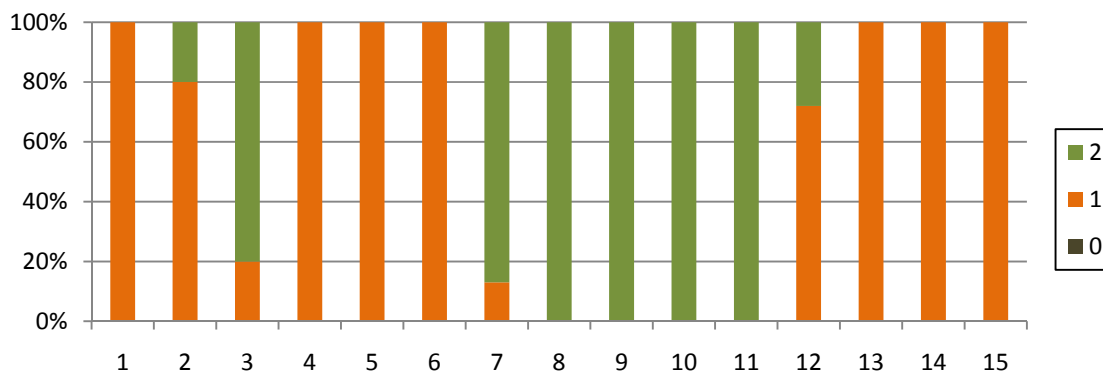
در TBM های سنگ سخت معمول بوده و به سبب دسترسی آسان به کله‌ی حفار به سهولت قابل انجام است. ولی در ماشین‌هایی که در سنگ نرم و خاک استفاده می‌شوند به سبب عدم دسترسی به کله‌ی حفار، مقدار سایش ابزار حفاری توسط کنترل عملکرد دستگاه بررسی می‌گردد. ساینده‌ی ابزار حفاری تنها در خاک‌های دانه‌ای رخ نمی‌دهد، بلکه در زمین‌هایی که از خاک‌های ریزدانه تشکیل شده‌اند نیز می‌تواند اتفاق بیفتد؛ به عنوان مثال رس‌های چسبنده می‌توانند چرخش دیسک کاترها را محدود نمایند به طوری که آن‌ها در یک وضعیت خاص از حرکت ایستاده و در این شرایط دیسک‌ها در یک طرف به شدت ساییده و مسطح خواهند شد. در این میان ساینده‌ی ابزارهای محیطی بسیار مهم است، زیرا گسیختگی یا سایش آن‌ها موجب ساینده‌ی و از بین رفتن رویه‌ی ضد سایش و در نهایت قاب کله‌ی حفار خواهد شد که در این صورت کلیه‌ی عملیات حفاری برای انجام تعمیرات ممکن است تا چندین ماه به تاخیر افتد.

به طور کلی در بخش شرقی - غربی خط ۷ متروی تهران به سبب اینکه در بیشتر مسیر، خاک تشکیل‌دهنده‌ی سینه‌کار از آبرفت درشت‌دانه تشکیل شده لذا مخاطره‌ی ساینده‌ی و فرسوده شدن ابزار حفاری یکی از مهم‌ترین مخاطرات حفاری خواهد بود. به منظور طبقه‌بندی عامل ساینده‌ی در طول مسیر تونل مورد مطالعه، از معیار آرایه شده در جدول ۴-۸ استفاده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این معیار شامل ۳ دسته بر اساس مقادیر ضریب ساینده‌ی LCPC (LAC) است. اطلاعات ساینده‌ی مربوط به پروژه‌ی مورد مطالعه بر اساس معیار مذکور، برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل طبقه‌بندی گردیده و در شکل ۴-۹ نشان داده شده است.

جدول ۴-۸- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس ساینده‌ی

امتیاز	ضریب ساینده‌ی (LCPC-index ABR [g/t])	ساینده‌ی خاک	ردیف
۰	بیشتر از ۱۵۰۰	زیاد	۱
۱	۱۵۰۰ تا ۵۰۰	متوسط	۲
۲	صفر تا ۵۰۰	کم	۳

## سایندگی خاک



شکل ۴-۹- توزیع آماری سایندگی خاک در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۸

## ۴-۳-۱-۷- وجود قطعه سنگ

یکی از مشکلات تونل‌سازی در زمین‌های نرم، برخورد با قطعات درشت‌دانه‌ای (بولدر<sup>۲۴</sup>) است که خرد کردن و انتقال آن با مشکلاتی همراه بوده و تاثیر بسزایی در پیشروی ماشین دارد. خط قرمز در خصوص ابعاد قطعه سنگ (بولدر) به گام نوار مارپیچ بستگی دارد. به طور کلی در تونل‌های مکانیزه که با ماشین تمام مقطع حفاری می‌شوند، در زمان برخورد به بولدر، ماشین با مصالح سختی مواجه می‌شود که در بسیاری مواقع خرد کردن آن بسیار مشکل است. برخورد با چنین شرایطی می‌تواند سبب مشکلات بزرگی برای پروژه شود که از جمله عواقب این مشکلات می‌توان به کاهش نرخ پیشروی تونل و همچنین آسیب‌دیدگی و ساییدگی دیسک‌کاترها و ابزار حفاری اشاره نمود.

به طور کلی زمانی که ماشین EPB با قطعات سنگی مواجه می‌گردد، رفتار متقابل ماشین و آن‌ها

می‌تواند به یکی از صورت‌های ذیل باشد:

<sup>24</sup> Boulder

اگر ابعاد قطعه سنگ خیلی بزرگ نباشد، می‌تواند توسط سیستم ماکینگ<sup>۲۵</sup> ماشین حفاری شده و یا به عبارتی بلعیده شود.

اگر با توجه به مشخصات ماشین، ابعاد قطعه سنگ برای حفاری بزرگ بوده و همچنین زمین دربرگیرنده‌ی قطعه سنگ نیز سفت<sup>۲۶</sup> باشد، ممکن است قطعه سنگ‌ها توسط کله‌ی حفار (که به خوبی با ابزار تجهیز شده باشد) خرد گردند.

اگر خاک دربرگیرنده‌ی قطعه سنگ ضعیف باشد، قطعه سنگ‌ها از جای خود کنده شده و به وسیله‌ی نیروی چرخشی کله‌ی حفار به بیرون از محدوده‌ی تونل هل داده می‌شود و یا ممکن است که در محدوده‌ی سینه‌کار باقی بماند و در بعضی مواقع همراه با کله‌ی حفار دوران نماید. در چنین مواقعی گشتاور<sup>۲۷</sup> ماشین به طور غیر عادی بالا خواهد رفت و سرانجام پیشروی ماشین متوقف و سیستم ماکینگ مسدود می‌گردد تا اینکه قطعه سنگ‌ها به صورت دستی خرد شده و از مسیر ماشین برداشته شود.

ماشین مورد استفاده در تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران توانایی عبور قطعات سنگی با ابعاد حدود ۳۵ سانتی‌متر را دارد، اگرچه در طی مطالعات صحرایی (حفر چاهک و گمانه) قطعاتی با ابعاد بزرگ‌تر از ۳۵ سانتی‌متر مشاهده نگردیده است، ولی لازم به ذکر است که با توجه به فاصله‌ی چاهک‌ها و قطر کم گمانه‌ها، این احتمال وجود دارد که ماشین با قطعات بزرگ‌تر از ۳۵ سانتی‌متر در طی حفاری تونل مواجه گردد. در هر صورت احتمال چنین پدیده‌ای در طول تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران اندک ارزیابی می‌شود. برای طبقه‌بندی این عامل در طول مسیر تونل تحت بررسی، از معیار ارایه شده در جدول ۴-۹ استفاده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این معیار شامل ۲

<sup>25</sup> Mucking

<sup>26</sup> Firm

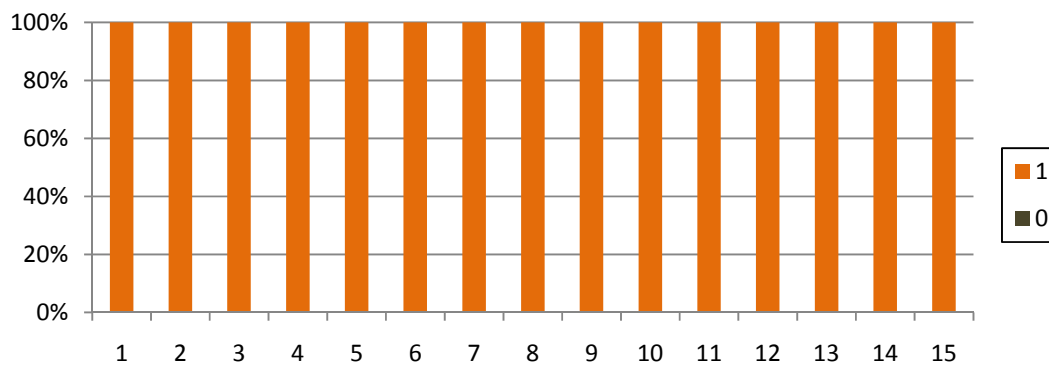
<sup>27</sup> Torque

دسته بر اساس وجود و یا عدم وجود قطعه سنگ (با توجه به ابعاد قطعات سنگی) است. همان‌طور که در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود، تا متر اژ ۴۰۰۰ پروژ، دستگاه با قطعه سنگی مواجه نشده است.

جدول ۴-۹- طبقه‌بندی خاک بر اساس وجود قطعه سنگ در مسیر تونل

ردیف	وضعیت وجود قطعه سنگ	امتیاز
۱	وجود قطعه سنگ (ابعاد قطعه‌ی سنگی بزرگ‌تر از ۳۵ سانتی‌متر باشد).	۰
۲	عدم وجود قطعه سنگ (ابعاد قطعه‌ی سنگی کوچک‌تر از ۳۵ سانتی‌متر باشد).	۱

### وجود قطعه سنگ



شکل ۴-۱۰- توزیع آماری وجود قطعه سنگ در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۹

### ۴-۳-۱-۸- فشار زمین

پایداری جبهه‌کار یکی از عوامل اساسی در انتخاب روش حفاری در تونل‌های شهری است. عامل فشار زمین<sup>۲۸</sup> متاثر از جنس زمین، روبراه و وضعیت آب زیرزمینی است که در ماشین‌های حفرتونل EPB، با فشار سینه‌کار مناسب باید بر آن غلبه نمود. برآورد مناسب فشار سینه‌کار برای دستیابی به شرایط جبهه‌کار پایدار و رعایت الزامات تونل‌زنی در محیط شهری شامل کنترل نشست سطحی و حفظ بیلان آبی منطقه ضروری است. هرگونه اشتباه در این امر چه در مرحله‌ی طراحی و یا در مرحله‌ی اجرا

<sup>28</sup> Earth Pressure

می‌تواند منجر به خسارات جبران‌ناپذیری گردد. تحلیل‌های مربوط به پایداری سینه‌کار، با استفاده از روش‌های تحلیلی بر پایه‌ی روش تعادل حدی و نظریه‌ی فشار زمین و روش‌های عددی به صورت دو بعدی و سه بعدی انجام می‌شود. مقدار بهینه‌ی فشار جبهه‌کار برای حفظ پایداری جبهه‌کار و حداقل نمودن جابجایی زمین، اغلب برابر با فشار زمین در حالت سکون<sup>۲۹</sup> در نظر گرفته می‌شود. از نظر تئوری در صورتی که فشار جبهه‌کار کمتر از فشار جانبی زمین در حال سکون باشد، مخاطره‌ی نشست زمین افزایش یافته و در صورتی قابل قبول است که تغییر شکل پلاستیک زمین مجاز باشد. در صورتی که مقدار فشار جبهه‌کار بین فشار جانبی زمین در حالت سکون و فشار محرک زمین<sup>۳۰</sup> باشد، امکان کنترل جبهه‌کار به صورت قابل قبول وجود دارد. فشار محرک زمین در حالتی است که جبهه‌کار دارای تغییر شکل پلاستیک به سمت کله‌ی حفار باشد. در صورتی که جبهه‌کار توسط کله‌ی حفار و مصالح موجود در اتاقک فشار فشرده شود، حالت فشار مقاوم زمین<sup>۳۱</sup> ایجاد می‌شود.

برآورد فشار ماشین EPB، امر ساده‌ای نبوده و باید شرایط تعادلی برای پیشروی سپر، ملاحظات مربوط به فشار پایداری و ملاحظات اجرایی در نظر گرفته شود. با تمام این اوصاف، فشار طراحی شده باید با توجه به شرایط زمین در زمان اجرا تدقیق شود. در ماشین‌های EPB، فشار جبهه‌کار با ایجاد توازن بین حجم حفاری و حجم تخلیه مصالح از چمبر کنترل می‌شود. به منظور تخمین فشار جبهه‌کار مناسب در پروژه‌ی قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران از روش تحلیلی پیشنهادی انجمن زیرزمینی هلند (COB<sup>۳۲</sup>) استفاده شده است (DAUB, 1997). در این روش حداقل فشار نگهدارنده‌ی سینه‌کار بر اساس رابطه‌ی (۳-۴) محاسبه می‌شود.

$$S_{\min} = K_a \sigma'_v + H_w \gamma_w + 20 \quad (Kpa) \quad (3-4)$$

<sup>29</sup> Earth pressure at rest

<sup>30</sup> Active earth pressure

<sup>31</sup> Passive earth pressure

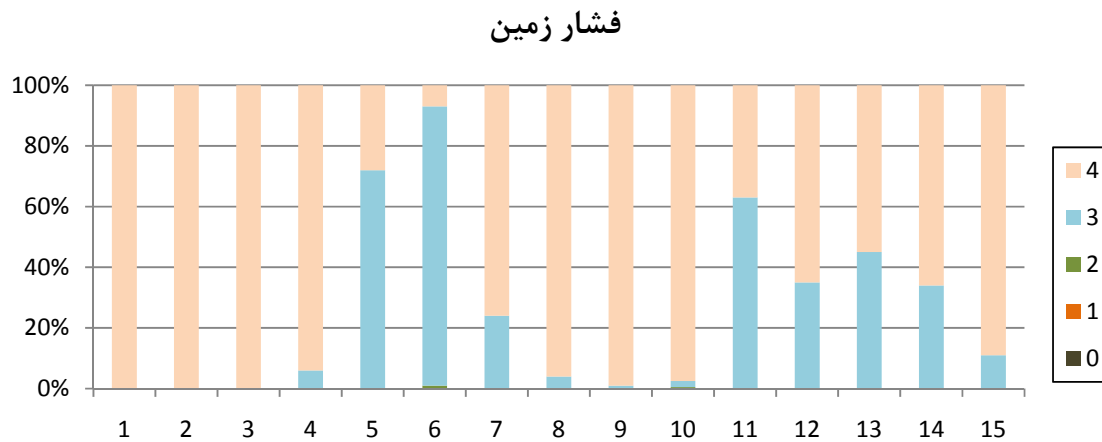
<sup>32</sup> The Dutch Center Onderground Bowen (COB)

در این رابطه  $S_{min}$  حداقل فشار نگهدارنده‌ی سینه‌کار،  $K_a$  ضریب فشار فعال خاک،  $\sigma'_v$  فشار موثر زمین بر حسب کیلو پاسکال،  $H_w$  ارتفاع آب بر حسب متر و  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب بر حسب کیلونیوتن بر متر مکعب می‌باشد. جهت تعیین فشار سینه‌کار تئوری در طول مسیر این پروژه، به مترآزهای ثابت ۱۰۰ متر، مقاطعی عمود بر راستای تونل تهیه شده و فشار سینه‌کار با استفاده از روش COB در هر یک محاسبه شده است. سپس با اتصال مقادیر فشار در هر مقطع، پروفیل فشار در راستای تونل ترسیم شده است. در هر مقطع عوامل مقاومتی و فیزیکی خاک به صورت میانگینی از لایه‌های مختلف موجود در مقطع مورد بررسی قرار گرفته‌اند (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۸).

به منظور طبقه‌بندی عامل فشار زمین در طول مسیر تونل مورد مطالعه، با مشورت کارشناسان امر و بهره‌گیری از تجربیات کارگاهی، معیار ارزیابی شده در جدول ۴-۱۰ مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این معیار شامل ۵ دسته بر اساس مقادیر فشار زمین است. اطلاعات مربوط به فشار زمین که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، نتایج روش COB بوده که در حین اجرا تدقیق شده است. به عبارتی مقادیر واقعی فشار که به سینه‌کار تونل اعمال شده در این پژوهش مد نظر قرار می‌گیرد. با توجه به این که مقدار فشار سینه‌کار اعمالی، با کنترل نشست زمین و تدقیق همراه بوده، مقادیر فشار سینه‌کار، معادل فشار زمین در نظر گرفته شده است. این مقادیر بر اساس معیار مذکور، برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل طبقه‌بندی گردیده و در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۰- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس فشار زمین

ردیف	مقدار فشار زمین (بار)	امتیاز
۱	بیشتر از ۲	۰
۲	۱/۵ تا ۲	۱
۳	۱ تا ۱/۵	۲
۴	۰/۵ تا ۱	۳
۵	صفر تا ۰/۵	۴



شکل ۴-۱۱- توزیع آماری فشار زمین در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۰

### ۴-۳-۲- عوامل محیطی

این دسته از عوامل شامل برخورد با فضاهاى زیرزمینی طبیعی یا ساخته‌ی دست بشر و همچنین

عبور از زیر سازه‌های سطحی هستند. این عوامل عبارتند از:

#### ۴-۳-۲-۱- برخورد با معارضان زیرزمینی

به طور معمول تونل‌هایی که در محیط‌های شهری حفر می‌گردند با معارضان زیرزمینی مواجه

می‌شوند. معارضان زیرزمینی شامل سازه‌های ساخت بشر و حفرات طبیعی زیرسطحی است. سازه‌های

ساخت بشر شامل فضاهایی مانند تونل‌های آب و فاضلاب، مترو، قنات، تأسیسات و میله چاه است. عموماً

برخورد تونل با معارض زیرزمینی باعث اختلال در روند پیشروی پروژه و توقفات طولانی مدت می‌شود.

تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ در طول مسیر خود با معارضانی نظیر لوله‌های آب و گاز،

تونل‌های فاضلاب، کابل‌های برق و مخابرات که عمدتاً مدفون هستند برخورد می‌کند. بعضی از آن‌ها

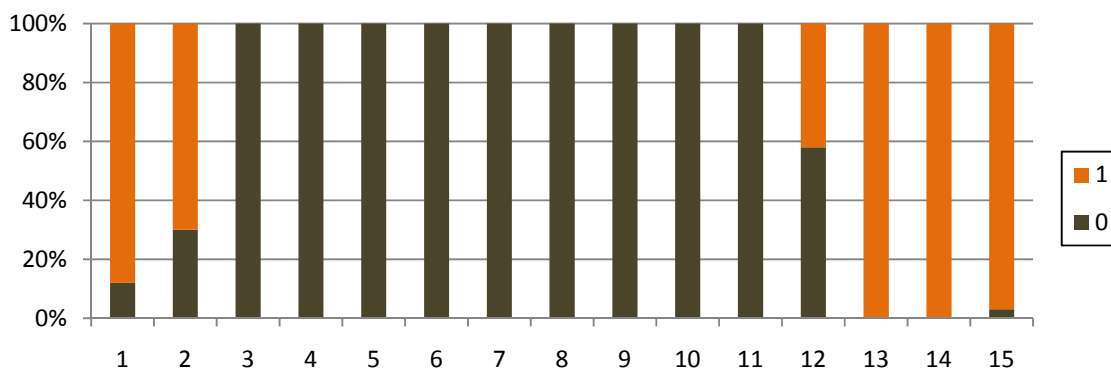
نزدیک سطح زمین بوده و تداخلی با مسیر تونل ندارند، ولی بعضی از آن‌ها در نزدیکی تراز تونل واقع شده‌اند که قبل از شروع عملیات اجرایی پروژه می‌بایست چاره‌اندیشی شود.

برای طبقه‌بندی این عامل در طول مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران، از معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۱ استفاده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این معیار شامل ۲ دسته بر اساس وجود و یا عدم وجود معارض زیرزمینی است. ۱۵ پهنه‌ی مسیر این تونل بر اساس معیار مذکور طبقه‌بندی شده و در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۱- معیار طبقه‌بندی مسیر تونل بر اساس برخورد با معارض زیرزمینی

ردیف	وضعیت قرارگیری معارض نسبت به مقطع تونل	امتیاز
۱	وجود معارض زیرزمینی	۰
۲	عدم وجود معارض زیرزمینی	۱

برخورد با معارض زیرزمینی



شکل ۴-۱۲- توزیع آماری برخورد با معارض زیرزمینی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۱



## ۴-۳-۲- عبور از زیر سازه‌های سطحی

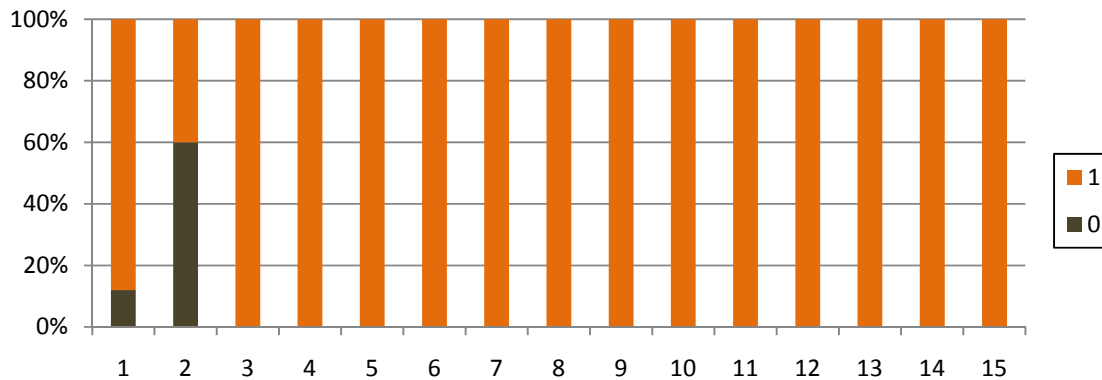
حفاری تونل موجب آزادسازی تنش‌های برجای خاک شده و تغییر شکل‌های زمین از نتایج غیر قابل اجتناب ساخت تونل است. در واقع هیچ‌گاه این امکان وجود ندارد که دقیقاً هم‌زمان با حفاری، یک پوشش با سختی بی‌نهایت در تونل نصب کرد و بنابراین همواره مقداری تغییر مکان در محل حفاری تونل ایجاد می‌شود و این تغییر مکان به صورت زنجیره‌ای تا سطح زمین را تحت تاثیر قرار داده و موجب نشست سطح می‌شود. در محل‌هایی که در سطح زمین سازه‌ای وجود دارد، توجه به این مساله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سازه‌های سطحی شامل ساختمان‌ها، پل‌ها، خطوط انتقال نیرو و غیره می‌باشد.

پل قزوین و ساختمان اظهري، سازه‌های سطحی هستند که تا متر اژ ۴۰۰۰ در مسیر پروژه‌ی قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران قرار دارند. به منظور طبقه‌بندی این عامل در طول مسیر تونل مورد مطالعه، از معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۲ استفاده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این معیار شامل ۲ دسته بر اساس وجود و یا عدم وجود معارضان زیرزمینی است. ۱۵ پهنه‌ی مسیر این تونل بر اساس معیار مذکور طبقه‌بندی شده و در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در ابتدای مسیر این پروژه، سازه‌ی سطحی وجود دارد؛ ولی در ادامه و تا متر اژ ۴۰۰۰ سازه‌ی سطحی دیگری در مسیر آن قرار ندارد.

جدول ۴-۱۲- معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس عبور از زیر سازه‌های سطحی

امتیاز	وضعیت وجود سازه‌ی سطحی	ردیف
۰	وجود سازه‌ی سطحی	۱
۱	عدم وجود سازه‌ی سطحی	۲

## عبور از زیر سازه‌های سطحی



شکل ۴-۱۳- توزیع آماری عبور از زیر سازه‌های سطحی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۲

## ۴-۳-۳- عوامل مربوط به طراحی

این عوامل مربوط به طراحی و ساخت تونل مورد نظر در طول مسیر آن با توجه به شرایط منطقه‌ی

حفر است که عبارتند از:

## ۴-۳-۳-۱- نسبت عمق (ضخامت روباره) به قطر تونل

یکی از عوامل مهم در طراحی تونل‌ها، عمق (ضخامت روباره) آن در طول مسیر مورد نظر است.

هرچه تونل در عمق کمتری قرار داشته باشد، تاثیر بیشتری از حفر آن به سطح زمین می‌رسد و لذا

نشست سطح بیشتری را به همراه خواهد داشت. برای بی بعد کردن عامل عمق تونل در پژوهش حاضر،

نسبت عمق به قطر در نظر گرفته شده است. با توجه به این که قطر تونل در طول مسیر ثابت است،

بنابراین روباره‌ی تونل عامل اصلی تعیین‌کننده‌ی این عامل در طول مسیر است. هرچه نسبت عمق به قطر

تونل بیشتر باشد احتمال ریزش و نشست سطح زمین کمتر خواهد بود. چنانچه نسبت عمق به قطر تونل

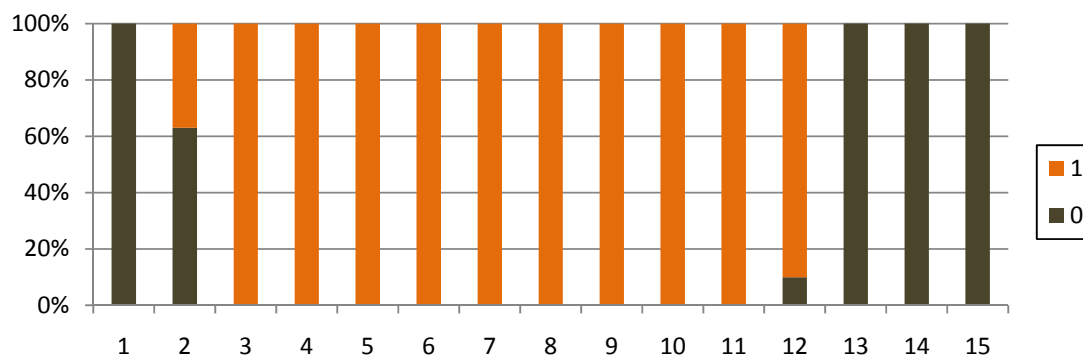
بیش از ۲ باشد، تاثیرات ناشی از حفاری تونل به مراتب کمتر به سطح زمین می‌رسد و در نتیجه نشست

سطحی کمتری در پی دارد (WG “Research”, 2007). بنابراین معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۳ برای طبقه‌بندی این عامل استفاده شده است. این معیار شامل ۲ دسته بر اساس نسبت عمق به قطر تونل است. ۱۵ پهنه‌ی مسیر این تونل بر اساس معیار مذکور طبقه‌بندی شده و در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۳- معیار طبقه‌بندی مسیر تونل بر اساس نسبت عمق (روباره) به قطر تونل

ردیف	نسبت عمق (روباره) به قطر تونل	امتیاز
۱	کمتر از ۲	۰
۲	بیشتر از ۲	۱

نسبت عمق (ضخامت روباره) به قطر تونل



شکل ۴-۱۴- توزیع آماری نسبت عمق به قطر تونل در پهنه‌های مسیر بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۳

#### ۴-۳-۲- شیب تونل

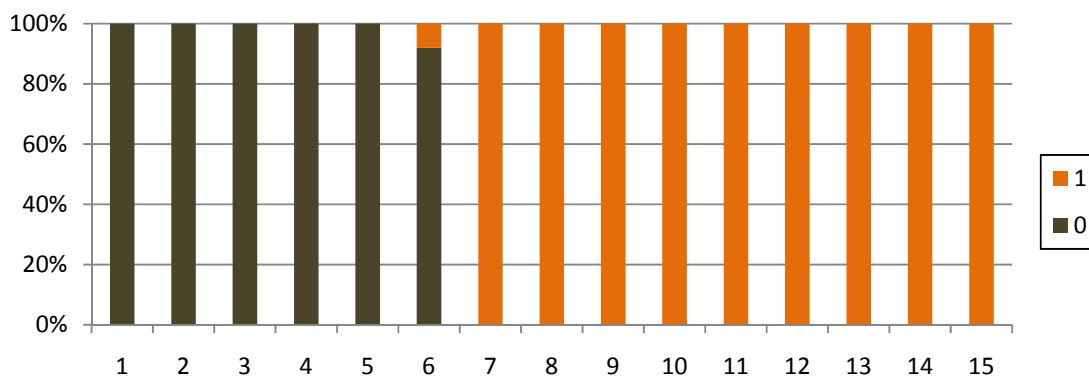
یکی از عوامل مهم در هندسه‌ی مسیر تونل، شیب طولی آن است. این عامل از لحاظ خروج آب به صورت ثقلی حائز اهمیت است. شیب تونل می‌تواند مثبت یا منفی باشد. در حالتی که شیب تونل مثبت است، آب داخل تونل به صورت ثقلی خارج می‌شود. در صورتی که برای حالت شیب منفی، به منظور خارج کردن آب به سیستم آبکشی جداگانه نیاز است. با توجه به این موضوع، معیار طبقه‌بندی ارایه شده در جدول ۴-۱۴ برای این عامل در نظر گرفته شده است.

شیب طولی تونل در قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران از ۰/۲ تا ۳/۵ درصد متغیر است. اطلاعات مربوط به شیب تونل این پروژه بر اساس معیار ارزیابی شده در جدول ۴-۱۴ برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر، طبقه‌بندی گردیده و در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۴- معیار طبقه‌بندی مسیر تونل بر اساس شیب طولی آن

ردیف	شیب تونل	امتیاز
۱	منفی (عدم خروج آب به صورت ثقلی)	۰
۲	مثبت (خروج آب به صورت ثقلی)	۱

## شیب تونل



شکل ۴-۱۵- توزیع آماری شیب تونل در پهنه‌های مسیر بر اساس معیار ارزیابی شده در جدول ۴-۱۴

## ۴-۳-۳- قوس مسیر تونل

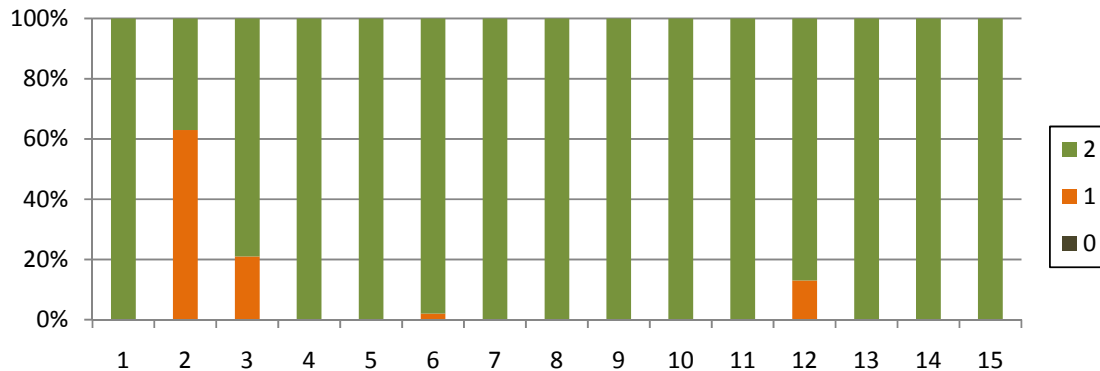
یکی دیگر از عوامل هندسی مسیر تونل، قوس مسیر آن است. ماشین‌های حفر تونل تمام مقطع از این بابت دارای محدودیت بوده و تا حداقل شعاع قوس مشخصی قابلیت کاربرد دارند. راهبری ماشین و سگمنت‌گذاری در قوس‌هایی با شعاع کم خیلی مشکل‌تر از شعاع‌های زیاد است.

از ابتدای قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران تا مترائز ۴۳۰۰، سه مورد قوس در مسیر آن وجود دارد. برای طبقه‌بندی این عامل در طول مسیر تونل، با مشورت کارشناسان تونل‌سازی و بهره‌گیری از تجربیات کارگاهی، معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۵ مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این معیار شامل ۳ دسته بر اساس شعاع قوس مسیر تونل است. ۱۵ پهنه‌ی مسیر این تونل بر اساس معیار مذکور طبقه‌بندی شده و در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۵- معیار طبقه‌بندی مسیر تونل بر اساس قوس آن

ردیف	شعاع قوس (متر)	امتیاز
۱	۱۰۰ تا ۳۰۰	۰
۲	۳۰۰ تا ۱۰۰۰	۱
۳	بیشتر از ۱۰۰۰	۲

قوس مسیر تونل



شکل ۴-۱۶- توزیع آماری قوس مسیر تونل در پهنه‌های مسیر بر اساس معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۵

### ۴-۳-۴- عامل انسانی

به کارگیری هر دستگاه و استفاده‌ی بهینه از آن، وابستگی زیادی به مهارت و تجربه‌ی کار با آن دستگاه دارد. لذا به عنوان نماینده عوامل انسانی در این تحقیق، ضریبی تحت عنوان تجربه و مهارت لحاظ

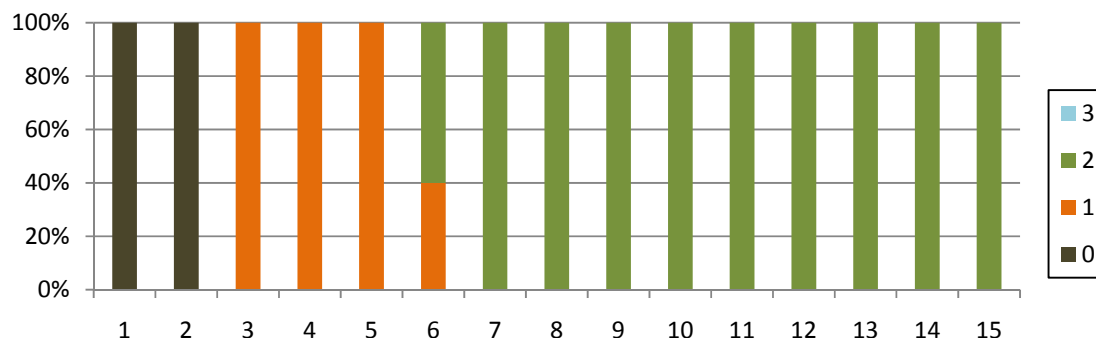
گردیده است. هم‌زمان با پیشرفت هر پروژه‌ی تونل‌سازی مکانیزه با TBM، تیم اجرایی آشنایی بیشتری با شرایط خاص پروژه و نحوه‌ی به‌کارگیری بهینه‌ی دستگاه پیدا می‌کند که این امر موجب افزایش بهره‌وری TBM می‌شود.

به منظور در نظر گرفتن عامل انسانی در پژوهش حاضر، با نظر کارشناسان شرکت مشاور پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران، معیار ارایه شده در جدول ۴-۱۶ برای طبقه‌بندی این عامل در نظر گرفته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این معیار شامل ۴ دسته بوده که با پیشروی ساخت تونل، میزان امتیاز مربوطه افزایش می‌یابد. ۱۵ پهنه‌ی مسیر این تونل بر اساس معیار مذکور طبقه‌بندی شده و در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۶- معیار طبقه‌بندی مسیر تونل بر اساس تجربه‌ی تیم اجرایی

رتبه	میزان تجربه	فاصله (از دهانه‌ی ورودی)	امتیاز
۱	فاقد تجربه	۰ تا ۰+۵۰۰	۰
۲	تجربه‌ی کم	۱+۵۰۰ تا ۰+۵۰۰	۱
۳	تجربه‌ی متوسط	۵+۰۰۰ تا ۱+۵۰۰	۲
۴	تجربه‌ی زیاد	بیشتر از ۵+۰۰۰	۳

میزان تجربه‌ی تیم اجرایی



شکل ۴-۱۷- توزیع آماری تجربه‌ی تیم اجرایی در پهنه‌های مسیر تونل بر اساس معیار ارایه شده جدول ۴-۱۶

#### ۴-۴- جمع‌بندی

در این فصل به بیان مفهوم ضریب بهره‌وری TBM و محاسبه‌ی آن برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ پرداخته شد. همچنین عوامل موثر بر بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم معرفی گردید. برای هر یک از عوامل نیز یک معیار طبقه‌بندی ارائه شد که با توجه به شرایط بهینه‌ی کارکرد EPB-TBM، هر یک از دسته‌های معیارها امتیازبندی شده است. همچنین اطلاعات مربوط به تونل مورد مطالعه بر اساس معیارهای ارائه شده، طبقه‌بندی گردید.

در فصل بعد با استفاده از اطلاعات قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ که در این فصل طبقه‌بندی شده است و با بهره‌گیری از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ، به برآورد ضریب بهره‌وری TBM مورد استفاده در تونل مورد بررسی پرداخته می‌شود.

# فصل پنجم

برآورد ضریب بهره‌وری ماشین حفرتونل تمام مقطع

در زمین‌های نرم



## ۵-۱- مقدمه

هدف نهایی از پژوهش حاضر، برآورد ضریب بهره‌وری به کمک شاخص بهره‌وری (UI) است. در این فصل با بهره‌گیری از روش کدگذاری احتمالاتی PESQ، به کدگذاری ماتریس اندرکنش پرداخته شده و وزن هر یک از عوامل در مسأله‌ی 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 بهره‌وری برای هر یک از پهنه‌های مسیر محاسبه می‌شود. در نهایت نیز با مقایسه‌ی مقادیر شاخص بهره‌وری و ضریب بهره‌وری واقعی محاسبه شده (که در فصل قبل ارائه شده است) برای هر یک از پهنه‌های مسیر، رابطه‌ی آرایه می‌گردد. با استفاده از این رابطه، می‌توان ضریب بهره‌وری TBM تونل مورد مطالعه را برای ادامه‌ی 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.

## ۵-۲- 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.

### ۵-۲-۱- کدگذاری ماتریس اندرکنش

همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، در روش کدگذاری نیمه عددی خبره‌ی احتمالاتی (PESQ) به جای استفاده از یک کارشناس، از چندین کارشناس استفاده می‌شود و نظرات آن‌ها به صورت احتمالاتی تحلیل می‌گردد. با توجه به این که مطابق جدول ۴-۲، ۱۴ عامل در مساله‌ی حاضر در نظر گرفته شده است، ماتریس‌های اندرکنش حاصل به صورت  $14 \times 14$  خواهد بود.

در این پژوهش از نظرات ۱۱ کارشناس برای کدگذاری ماتریس اندرکنش استفاده شده است. پیاده‌سازی روش کدگذاری PESQ از طریق تشکیل ۵ ماتریس اندرکنش (برای هر یک از مقادیر ۰ تا ۴ یک ماتریس) ممکن می‌گردد. این ماتریس‌ها با نام‌های  $M_0$  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 (برای هر یک از مقادیر ۰ تا ۴) داده‌اند تقسیم بر تعداد کارشناسان (در این مساله ۱۱) می‌شود. بنابراین به جای تعیین یک مقدار کد یکتا (و قطعی) برای هر اندرکنش، احتمال امکان در نظر گرفتن مقادیر مختلف کدها (در این مورد از ۰ تا ۴) به اندرکنش‌ها اختصاص می‌یابد. این احتمالات در ۵ ماتریس نشان داده می‌شوند ( $M_0$  تا  $M_4$ ) که در آن‌ها درایه‌های غیر

اصلی دربرگیرنده‌ی احتمال رخداد یک کد به خصوص برای یک اندرکنش خاص است (جدول ۵-۱ تا جدول ۵-۵).

به عنوان مثالی از فرآیند کدگذاری، نحوه‌ی تخصیص پنج مقدار کد به اثر عامل سینه‌کار مختلط ( $P_3$ ) بر انسداد ( $P_4$ ) (درایه‌ی (۳,۴) در ماتریس‌های  $M_0$  تا  $M_4$ ) توضیح داده می‌شود. احتمال‌های اختصاص یافته عبارتند از:  $9/1\%$  برای احتمال رخداد کد ۰ (بدون اندرکنش)،  $9/1\%$  برای رخداد کد ۱ (اندرکنش ضعیف)،  $45/5\%$  برای رخداد کد ۲ (اندرکنش متوسط)،  $18/2\%$  برای احتمال روی دادن کد ۳ (اندرکنش قوی) و در نهایت  $18/2\%$  برای احتمال رخداد کد ۴ (اندرکنش بحرانی). مسلماً هنوز PESQ نیز تا حد بسیاری جنبه ذهنی داشته و از حالت برون‌ذات خارج است، ولی دارای این مزیت نسبی است که به ما این اجازه را می‌دهد تا بهترین تخمین‌های احتمالی از ارتباط عوامل را وارد تحلیل‌ها نماییم.

جدول ۵-۱- ماتریس اندرکنش  $M_0$  برای احتمال کد صفر

$P_1$	0	9.1	0	0	0	9.1	9.1	100	72.7	81.8	100	100	100
54.5	$P_2$	18.2	0	18.2	18.2	63.6	0	100	81.8	90.9	100	100	100
36.4	36.4	$P_3$	9.1	9.1	18.2	9.1	0	90.9	72.7	100	90.9	81.8	36.4
63.6	63.6	63.6	$P_4$	18.2	81.8	90.9	72.7	90.9	90.9	90.9	100	90.9	54.5
90.9	63.6	36.4	9.1	$P_5$	18.2	90.9	0	90.9	63.6	90.9	81.8	90.9	36.4
72.7	72.7	54.5	81.8	100	$P_6$	100	100	100	100	100	100	100	45.5
36.4	45.5	0	63.6	54.5	45.5	$P_7$	63.6	100	81.8	90.9	90.9	90.9	36.4
81.8	81.8	63.6	18.2	18.2	9.1	90.9	$P_8$	90.9	63.6	90.9	90.9	90.9	36.4
90.9	90.9	45.5	100	90.9	63.6	72.7	27.3	$P_9$	63.6	63.6	63.6	63.6	27.3
90.9	90.9	63.6	90.9	90.9	90.9	90.9	54.5	81.8	$P_{10}$	81.8	90.9	72.7	27.3
100	100	27.3	45.5	36.4	81.8	36.4	0	0	54.5	$P_{11}$	27.3	45.5	45.5
100	100	81.8	63.6	45.5	100	100	90.9	90.9	90.9	63.6	$P_{12}$	54.5	54.5
100	100	81.8	90.9	72.7	90.9	100	100	45.5	36.4	100	90.9	$P_{13}$	36.4
100	100	72.7	18.2	27.3	72.7	100	72.7	81.8	90.9	90.9	90.9	90.9	$P_{14}$

$P_1$ : دانه‌بندی خاک؛  $P_2$ : شاخص استحکام؛  $P_3$ : سینه‌کار مختلط؛  $P_4$ : انسداد؛  $P_5$ : آب ورودی به تونل؛  $P_6$ :

سایندگی خاک؛  $P_7$ : وجود قطعه سنگ؛  $P_8$ : فشار زمین؛  $P_9$ : برخورد با معارضان زیرزمینی؛  $P_{10}$ : عبور از زیر

سازه‌های سطحی؛  $P_{11}$ : نسبت عمق به قطر تونل؛  $P_{12}$ : شیب تونل؛  $P_{13}$ : قوس مسیر تونل؛  $P_{14}$ : تجربه

جدول ۵-۲- ماتریس اندرکنش  $M_1$  برای احتمال کد ۱

$P_1$	18.2	27.3	0	9.1	9.1	27.3	18.2	0	27.3	9.1	0	0	0
18.2	$P_2$	18.2	18.2	27.3	45.5	36.4	36.4	0	9.1	0	0	0	0
9.1	27.3	$P_3$	9.1	27.3	18.2	36.4	18.2	9.1	18.2	0	9.1	9.1	9.1
9.1	18.2	27.3	$P_4$	54.5	9.1	0	27.3	9.1	9.1	0	0	0	0
0	18.2	27.3	45.5	$P_5$	36.4	9.1	0	9.1	27.3	0	0	0	18.2
18.2	27.3	36.4	18.2	0	$P_6$	0	0	0	0	0	0	0	27.3
9.1	36.4	18.2	18.2	36.4	9.1	$P_7$	9.1	0	18.2	0	0	0	18.2
9.1	18.2	18.2	54.5	45.5	27.3	9.1	$P_8$	0	9.1	0	0	9.1	27.3
0	9.1	18.2	0	0	27.3	9.1	18.2	$P_9$	9.1	9.1	9.1	0	18.2
0	9.1	18.2	0	0	0	0	0	18.2	$P_{10}$	0	0	9.1	9.1
0	0	36.4	36.4	27.3	9.1	45.5	9.1	36.4	27.3	$P_{11}$	54.5	27.3	18.2
0	0	18.2	36.4	27.3	0	0	0	0	9.1	27.3	$P_{12}$	27.3	9.1
0	0	9.1	9.1	18.2	9.1	0	0	36.4	45.5	0	9.1	$P_{13}$	27.3
0	0	18.2	9.1	9.1	0	0	27.3	18.2	9.1	0	9.1	9.1	$P_{14}$

$P_1$ : دانه‌بندی خاک؛  $P_2$ : شاخص استحکام؛  $P_3$ : سینه‌کار مختلط؛  $P_4$ : انسداد؛  $P_5$ : آب ورودی به تونل؛  $P_6$ :  
سایندگی خاک؛  $P_7$ : وجود قطعه سنگ؛  $P_8$ : فشار زمین؛  $P_9$ : برخورد با معارضان زیرزمینی؛  $P_{10}$ : عبور از زیر  
سازه‌های سطحی؛  $P_{11}$ : نسبت عمق به قطر تونل؛  $P_{12}$ : شیب تونل؛  $P_{13}$ : قوس مسیر تونل؛  $P_{14}$ : تجربه

جدول ۵-۳- ماتریس اندرکنش  $M_2$  برای احتمال کد ۲

$P_1$	18.2	9.1	0	18.2	18.2	18.2	36.4	0	0	9.1	0	0	0
18.2	$P_2$	36.4	45.5	45.5	27.3	0	36.4	0	9.1	9.1	0	0	0
27.3	9.1	$P_3$	45.5	27.3	45.5	18.2	36.4	0	9.1	0	0	0	18.2
27.3	18.2	0	$P_4$	27.3	9.1	0	0	0	0	9.1	0	0	18.2
9.1	18.2	27.3	9.1	$P_5$	27.3	0	36.4	0	9.1	0	0	9.1	18.2
0	0	9.1	0	0	$P_6$	0	0	0	0	0	0	0	27.3
18.2	18.2	45.5	9.1	0	0	$P_7$	18.2	0	0	9.1	9.1	0	9.1
9.1	0	18.2	18.2	27.3	54.5	0	$P_8$	9.1	18.2	9.1	9.1	0	18.2
9.1	0	27.3	0	0	9.1	9.1	36.4	$P_9$	9.1	18.2	9.1	9.1	27.3
9.1	0	18.2	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	0	$P_{10}$	9.1	9.1	9.1	18.2
0	0	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	45.5	18.2	$P_{11}$	9.1	27.3	36.4
0	0	0	0	27.3	0	0	9.1	9.1	0	0	$P_{12}$	9.1	36.4
0	0	9.1	0	9.1	0	0	0	9.1	0	0	0	$P_{13}$	18.2
0	0	9.1	18.2	45.5	27.3	0	0	0	0	9.1	0	0	$P_{14}$

$P_1$ : دانه‌بندی خاک؛  $P_2$ : شاخص استحکام؛  $P_3$ : سینه‌کار مختلط؛  $P_4$ : انسداد؛  $P_5$ : آب ورودی به تونل؛  $P_6$ :  
سایندگی خاک؛  $P_7$ : وجود قطعه سنگ؛  $P_8$ : فشار زمین؛  $P_9$ : برخورد با معارضان زیرزمینی؛  $P_{10}$ : عبور از زیر  
سازه‌های سطحی؛  $P_{11}$ : نسبت عمق به قطر تونل؛  $P_{12}$ : شیب تونل؛  $P_{13}$ : قوس مسیر تونل؛  $P_{14}$ : تجربه

جدول ۴-۵- ماتریس اندرکنش  $M_3$  برای احتمال کد ۳

$P_1$	36.4	27.3	9.1	45.5	45.5	36.4	27.3	0	0	0	0	0	0
9.1	$P_2$	18.2	27.3	9.1	0	0	27.3	0	0	0	0	0	0
0	9.1	$P_3$	18.2	18.2	0	18.2	18.2	0	0	0	0	9.1	18.2
0	0	9.1	$P_4$	0	0	9.1	0	0	0	0	0	9.1	18.2
0	0	9.1	27.3	$P_5$	18.2	0	9.1	0	0	0	9.1	0	18.2
9.1	0	0	0	0	$P_6$	0	0	0	0	0	0	0	0
27.3	0	36.4	9.1	9.1	36.4	$P_7$	9.1	0	0	0	0	9.1	27.3
0	0	0	9.1	9.1	9.1	0	$P_8$	0	9.1	0	0	0	18.2
0	0	9.1	0	9.1	0	9.1	18.2	$P_9$	0	9.1	18.2	27.3	9.1
0	0	0	0	0	0	0	18.2	0	$P_{10}$	9.1	0	0	18.2
0	0	18.2	9.1	27.3	0	9.1	36.4	18.2	0	$P_{11}$	9.1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.1	$P_{12}$	9.1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	9.1	9.1	0	0	$P_{13}$	18.2
0	0	0	45.5	18.2	0	0	0	0	0	0	0	0	$P_{14}$

$P_1$ : دانه‌بندی خاک؛  $P_2$ : شاخص استحکام؛  $P_3$ : سینه‌کار مختلط؛  $P_4$ : انسداد؛  $P_5$ : آب ورودی به تونل؛  $P_6$ :  
سایندگی خاک؛  $P_7$ : وجود قطعه سنگ؛  $P_8$ : فشار زمین؛  $P_9$ : برخورد با معارضان زیرزمینی؛  $P_{10}$ : عبور از زیر  
سازه‌های سطحی؛  $P_{11}$ : نسبت عمق به قطر تونل؛  $P_{12}$ : شیب تونل؛  $P_{13}$ : قوس مسیر تونل؛  $P_{14}$ : تجربه

جدول ۵-۵- ماتریس اندرکنش  $M_4$  برای احتمال کد ۴

$P_1$	27.3	27.3	90.9	27.3	27.3	9.1	9.1	0	0	0	0	0	0
0	$P_2$	9.1	9.1	0	9.1	0	0	0	0	0	0	0	0
27.3	18.2	$P_3$	18.2	18.2	18.2	18.2	27.3	0	0	0	0	0	18.2
0	0	0	$P_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.1
0	0	0	9.1	$P_5$	0	0	54.5	0	0	9.1	9.1	0	9.1
0	0	0	0	0	$P_6$	0	0	0	0	0	0	0	0
9.1	0	0	0	0	9.1	$P_7$	0	0	0	0	0	0	9.1
0	0	0	0	0	0	0	$P_8$	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	$P_9$	18.2	0	0	0	18.2
0	0	0	0	0	0	0	18.2	0	$P_{10}$	0	0	9.1	27.3
0	0	9.1	0	0	0	0	45.5	0	0	$P_{11}$	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$P_{12}$	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.1	0	0	$P_{13}$	0
0	0	0	9.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$P_{14}$

$P_1$ : دانه‌بندی خاک؛  $P_2$ : شاخص استحکام؛  $P_3$ : سینه‌کار مختلط؛  $P_4$ : انسداد؛  $P_5$ : آب ورودی به تونل؛  $P_6$ :  
سایندگی خاک؛  $P_7$ : وجود قطعه سنگ؛  $P_8$ : فشار زمین؛  $P_9$ : برخورد با معارضان زیرزمینی؛  $P_{10}$ : عبور از زیر  
سازه‌های سطحی؛  $P_{11}$ : نسبت عمق به قطر تونل؛  $P_{12}$ : شیب تونل؛  $P_{13}$ : قوس مسیر تونل؛  $P_{14}$ : تجربه

علاوه بر مقادیر احتمالی کدها که ارایه گردید، مقادیر متوسط کدها نیز محاسبه شده است (جدول ۶-۵). در این جدول مقادیر متوسط علت و اثر عوامل (به ترتیب جمع سطرها و ستون‌ها) نیز ارایه گردیده است.

با توجه به جدول ۶-۵، عامل دانه‌بندی و ساینده‌گی خاک به ترتیب با مقادیر  $19/6$  و  $2/3$  بیشترین و کم‌ترین تاثیرگذاری را در سیستم دارند. عامل فشار زمین و شیب تونل نیز به ترتیب با مقادیر  $17/4$  و  $3/3$  دارای بیشترین و کم‌ترین تاثیرپذیری در سیستم هستند.

مجموع علت و اثر (C+E) هر عامل تحت عنوان شدت اندرکنش<sup>۱</sup> آن عامل مطرح می‌شود که نشان‌دهنده‌ی اهمیت عامل مذکور در سیستم مورد بررسی است. با استفاده از جدول ۶-۵، شدت اندرکنش متوسط عوامل محاسبه شده است (شکل ۵-۱). همان‌طور که مشاهده می‌شود، عوامل سینه‌کار مختلط، دانه‌بندی خاک، آب ورودی به تونل و فشار زمین بیشترین شدت اندرکنش را در سیستم دارند. همچنین عوامل شیب تونل و قوس مسیر دارای کم‌ترین میزان اندرکنش در سیستم هستند.

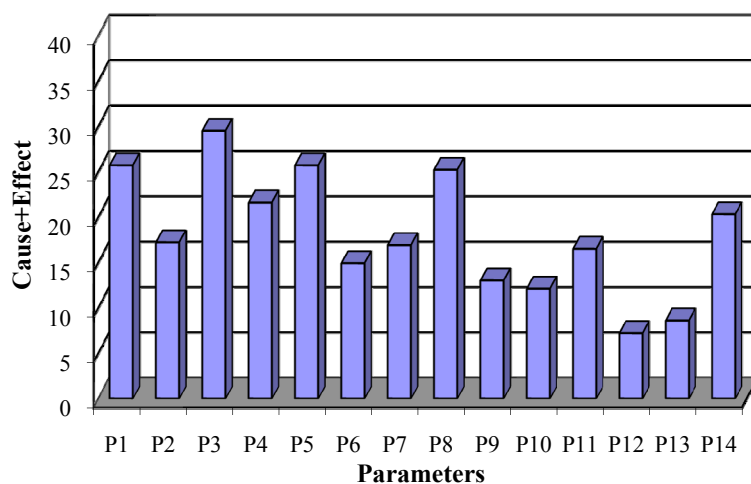
نمودار علت-اثر این سیستم با استفاده از مقادیر متوسط کدها در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. غالب بودن یک عامل در سیستم یعنی اثرگذاری عامل مذکور چه مقدار از اثرپذیری آن در سیستم بیشتر است (یعنی C-E). یک عامل غالب در سیستم، در نمودار علت-اثر نسبت به خط  $C=E$  در سمت محور علت (C) قرار دارد و هر چه عامل غالب‌تر باشد فاصله‌ی بیشتری با خط  $C=E$  خواهد داشت. مشابهاً یک عامل مغلوب در سیستم، در نمودار علت-اثر نسبت به خط  $C=E$  در سمت محور اثر (E) بوده و هر چه عامل مغلوب‌تر باشد در فاصله‌ی بیشتری نسبت به خط  $C=E$  قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۵-۲، عامل دانه‌بندی و نسبت عمق به قطر تونل، غالب‌ترین عوامل در سیستم هستند. همچنین مغلوب‌ترین عوامل در این سیستم شامل انسداد، ساینده‌گی خاک، فشار زمین و تجربه است.

<sup>۱</sup> Interaction intensity

جدول ۵-۶- ماتریس اندرکنش متوسط

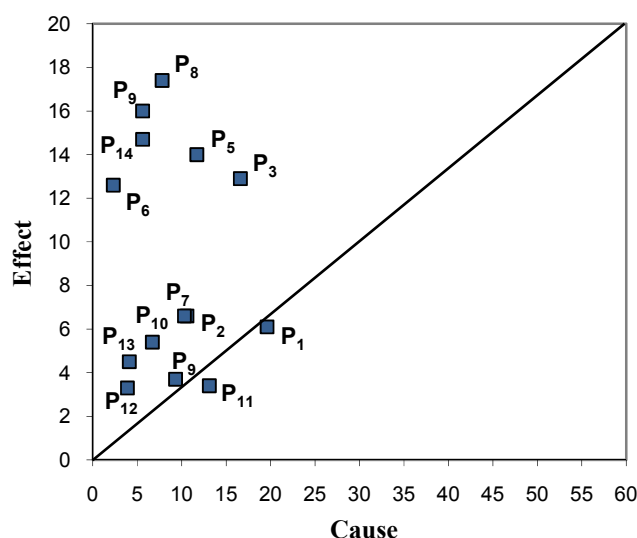
P <sub>1</sub>	2.7	2.4	3.9	2.9	2.9	2.1	2.1	0	0.3	0.3	0	0	0	19.6	
0.8	P <sub>2</sub>	1.8	2.3	1.5	1.4	0.4	1.9	0	0.3	0.2	0	0	0	10.6	
1.7	1.5	P <sub>3</sub>	2.3	2.1	1.8	2	2.5	0.1	0.4	0	0.1	0.4	1.7	16.6	
0.6	0.5	0.5	P <sub>4</sub>	1.1	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0	0.3	1.3	5.6	
0.2	0.5	1.1	1.8	P <sub>5</sub>	1.5	0.1	3.2	0.1	0.5	0.4	0.6	0.2	1.5	11.7	
0.5	0.3	0.5	0.2	0	P <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	2.3
1.6	0.7	2.2	0.6	0.6	1.5	P <sub>7</sub>	0.7	0	0.2	0.2	0.2	0.3	1.5	10.3	
0.3	0.2	0.5	1.2	1.3	1.6	0.1	P <sub>8</sub>	0.2	0.7	0.2	0.2	0.1	1.2	7.8	
0.2	0.1	1	0	0.3	0.5	0.5	1.5	P <sub>9</sub>	1	0.7	0.8	1	1.7	9.3	
0.2	0.1	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	1.5	0.2	P <sub>10</sub>	0.5	0.2	0.6	2.1	6.7	
0	0	1.5	0.8	1.3	0.3	0.9	3.2	1.8	0.6	P <sub>11</sub>	1	0.8	0.9	13.1	
0	0	0.2	0.4	0.8	0	0	0.2	0.2	0.1	0.5	P <sub>12</sub>	0.7	0.8	3.9	
0	0	0.3	0.1	0.4	0.1	0	0	0.8	1.1	0	0.1	P <sub>13</sub>	1.2	4.1	
0	0	0.4	2.2	1.5	0.5	0	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	P <sub>14</sub>	5.6	
6.1	6.6	12.9	16	14	12.6	6.6	17.4	3.7	5.4	3.4	3.3	4.5	14.7		

P<sub>1</sub>: دانه‌بندی خاک؛ P<sub>2</sub>: شاخص استحکام؛ P<sub>3</sub>: سینه‌کار مختلط؛ P<sub>4</sub>: انسداد؛ P<sub>5</sub>: آب ورودی به تونل؛ P<sub>6</sub>: سایندگی خاک؛ P<sub>7</sub>: وجود قطعه سنگ؛ P<sub>8</sub>: فشار زمین؛ P<sub>9</sub>: برخورد با معارضان زیرزمینی؛ P<sub>10</sub>: عبور از زیر سازه‌های سطحی؛ P<sub>11</sub>: نسبت عمق به قطر تونل؛ P<sub>12</sub>: شیب تونل؛ P<sub>13</sub>: قوس مسیر تونل؛ P<sub>14</sub>: تجربه



شکل ۵-۱- شدت اندرکنش عوامل موثر بر بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم

P<sub>1</sub>: دانه‌بندی خاک؛ P<sub>2</sub>: شاخص استحکام؛ P<sub>3</sub>: سینه‌کار مختلط؛ P<sub>4</sub>: انسداد؛ P<sub>5</sub>: آب ورودی به تونل؛ P<sub>6</sub>: سایندگی خاک؛ P<sub>7</sub>: وجود قطعه سنگ؛ P<sub>8</sub>: فشار زمین؛ P<sub>9</sub>: برخورد با معارضان زیرزمینی؛ P<sub>10</sub>: عبور از زیر سازه‌های سطحی؛ P<sub>11</sub>: نسبت عمق به قطر تونل؛ P<sub>12</sub>: شیب تونل؛ P<sub>13</sub>: قوس مسیر تونل؛ P<sub>14</sub>: تجربه



شکل ۵-۲- نمودار علت- اثر عوامل موثر بر بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم

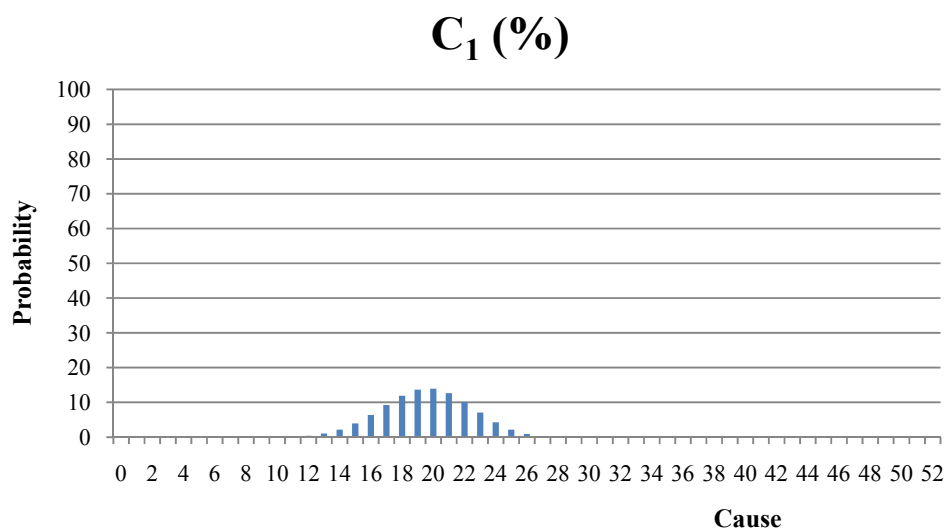
P<sub>1</sub>: دانه‌بندی خاک؛ P<sub>2</sub>: شاخص استحکام؛ P<sub>3</sub>: سینه کار مختلط؛ P<sub>4</sub>: انسداد؛ P<sub>5</sub>: آب ورودی به تونل؛ P<sub>6</sub>: سایندگی خاک؛ P<sub>7</sub>: وجود قطعه سنگ؛ P<sub>8</sub>: فشار زمین؛ P<sub>9</sub>: برخورد با معارضان زیرزمینی؛ P<sub>10</sub>: عبور از زیر سازه‌های سطحی؛ P<sub>11</sub>: نسبت عمق به قطر تونل؛ P<sub>12</sub>: شیب تونل؛ P<sub>13</sub>: قوس مسیر تونل؛ P<sub>14</sub>: تجربه

همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، در ماتریس کدگذاری شده (به روش قطعی) با روش ESQ مرسوم، اثر هر عامل بر روی سیستم و نیز 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.

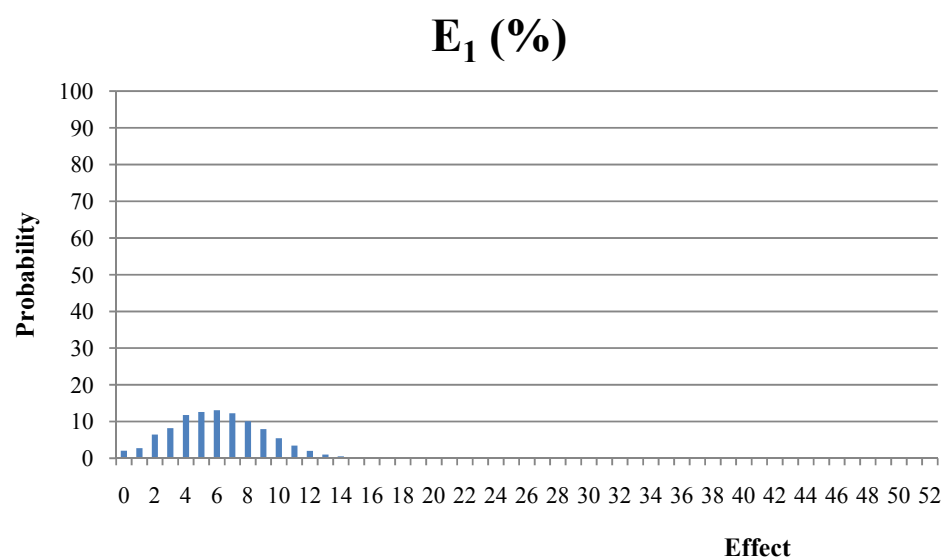
همچنین با استفاده از این توزیع‌ها و بکارگیری قوانین ساده و پایه‌ای احتمالات می‌توان مقادیر محتمل  $C_i$  و  $E_i$  را برای عامل  $P_i$  محاسبه نمود. در ادامه شکل ۵-۳ تا شکل ۵-۱۶ توزیع‌های احتمال را برای علت و اثر عوامل P<sub>1</sub> تا P<sub>14</sub> نشان می‌دهند. شایان ذکر است به دلیل این که در هر سطر و ستون ۱۳ درایه‌ی غیر اصلی با مقادیر اندرکنش صفر تا ۴ وجود دارند، مقادیر توزیع‌های C و E مابین صفر و ۵۲ خواهد بود. برای مثال، همان‌طور که در نمودارهای شکل ۵-۳ دیده می‌شود، برای عامل دانه‌بندی (P<sub>1</sub>)،



مقدار  $C_1$  با احتمال بیش از ۵۰٪ مابین ۱۸ و ۲۲ خواهد بود، و همین طور مقدار  $E_1$  با احتمال بیش از ۵۰٪ مابین اعداد ۴ و ۸ خواهد بود (چنین تحلیلی برای تمام عوامل قابل بیان است).



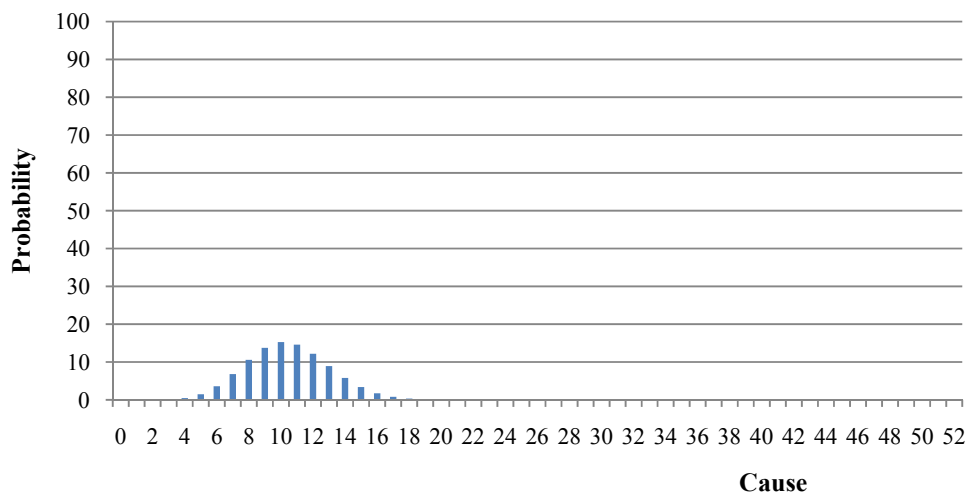
(الف)



(ب)

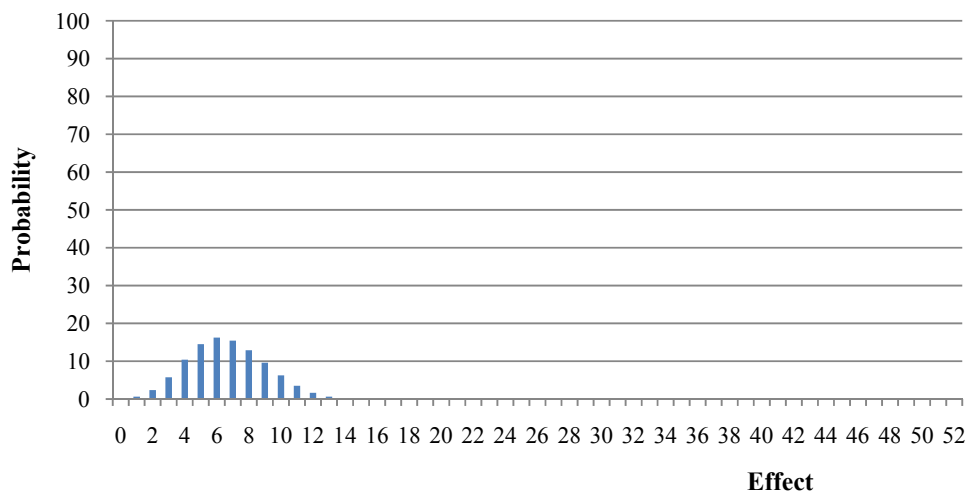
شکل ۵-۳- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "دانه‌بندی خاک" ( $P_1$ )؛  
الف: علت (C)، ب: اثر (E)

### C<sub>2</sub> (%)



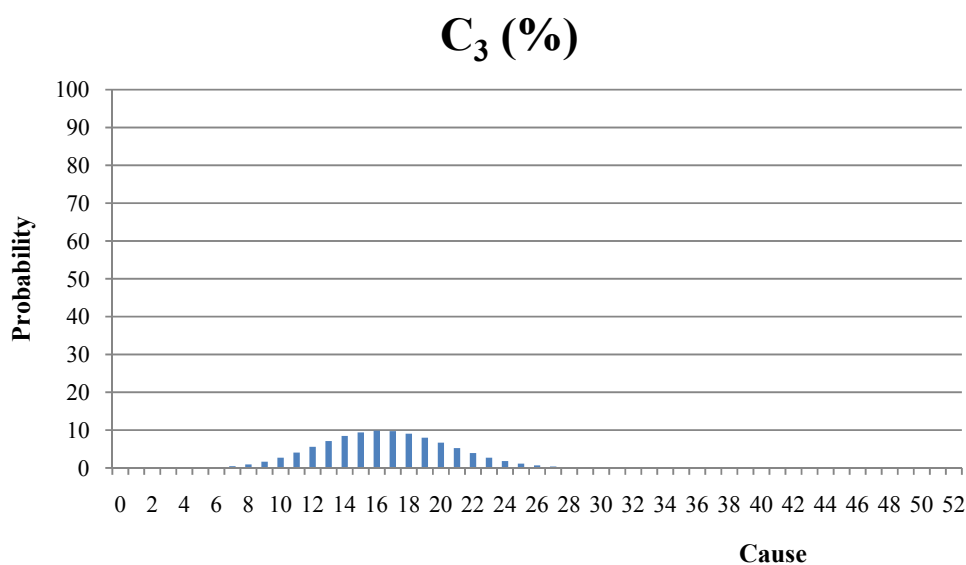
(الف)

### E<sub>2</sub> (%)

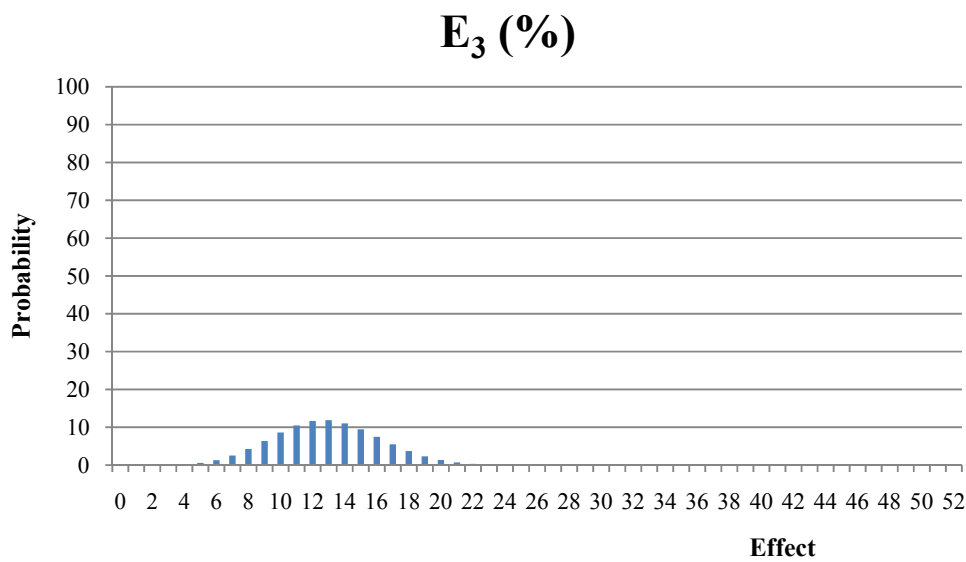


(ب)

شکل ۴-۵- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "شاخص استحکام" (P<sub>2</sub>):  
الف: علت (C)، ب: اثر (E)



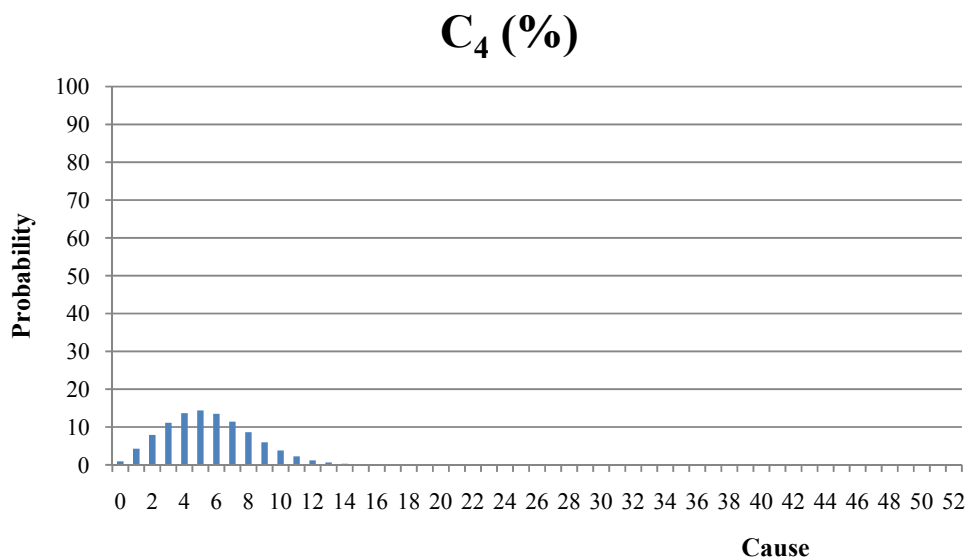
(الف)



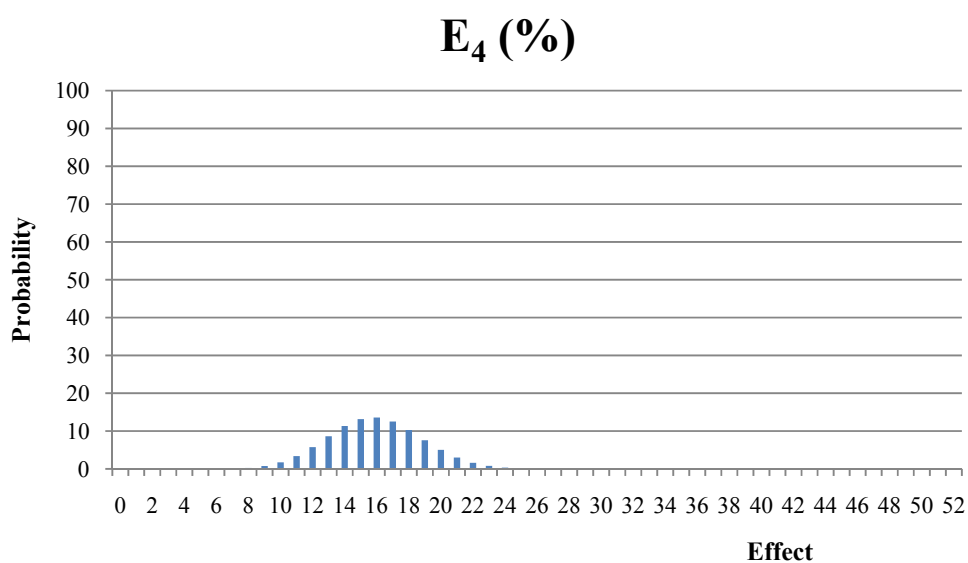
(ب)

شکل ۵-۵- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "سینه‌کار مختلط" (P<sub>3</sub>)؛

الف: علت (C)، ب: اثر (E)



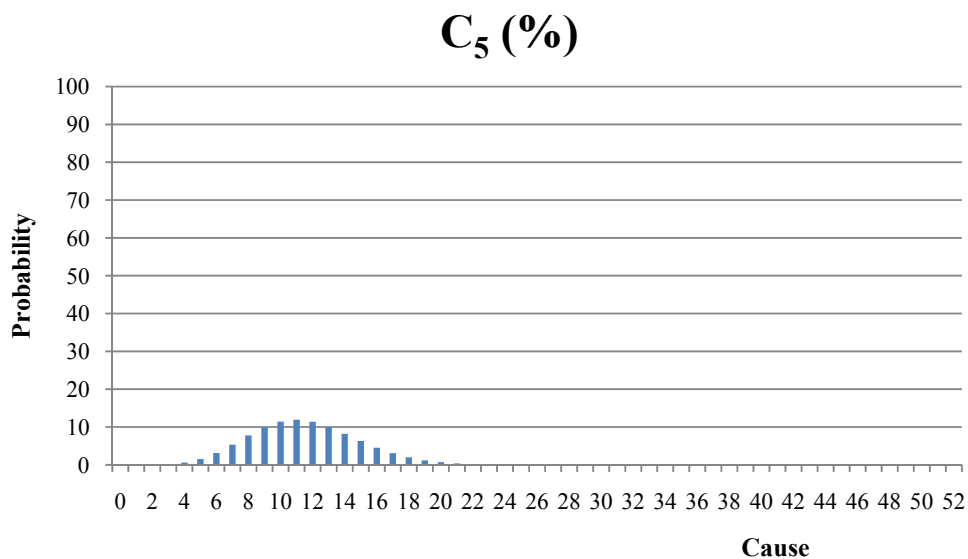
(الف)



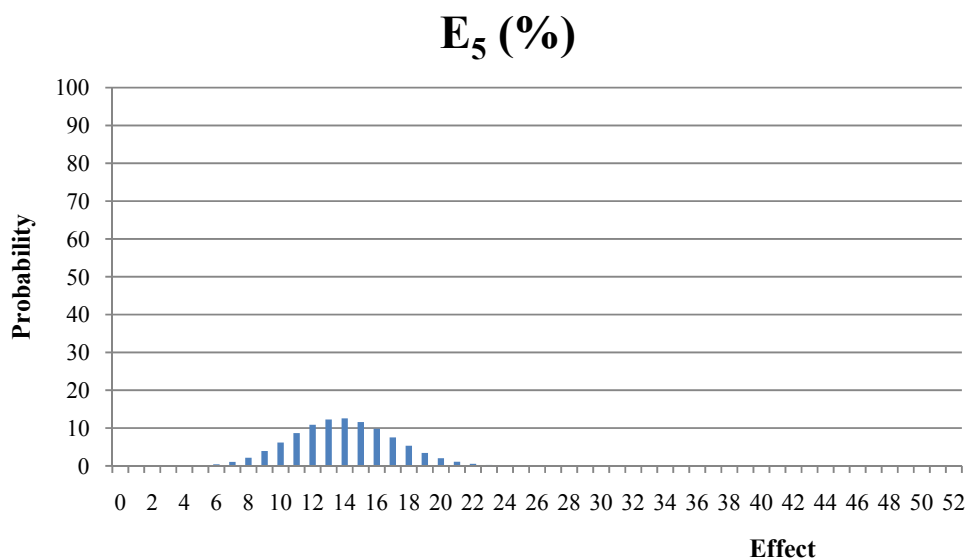
(ب)

شکل ۵-۶- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "انسداد" (P<sub>4</sub>)؛

الف: علت (C)، ب: اثر (E)



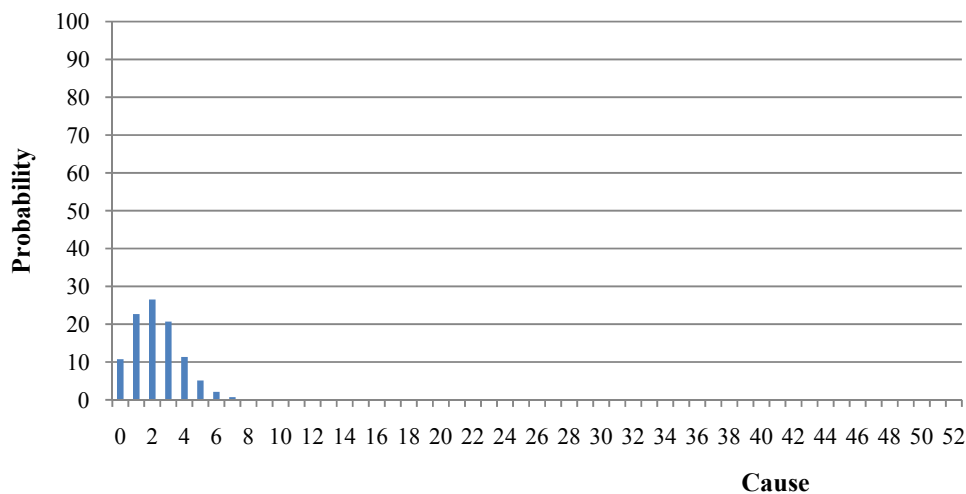
(الف)



(ب)

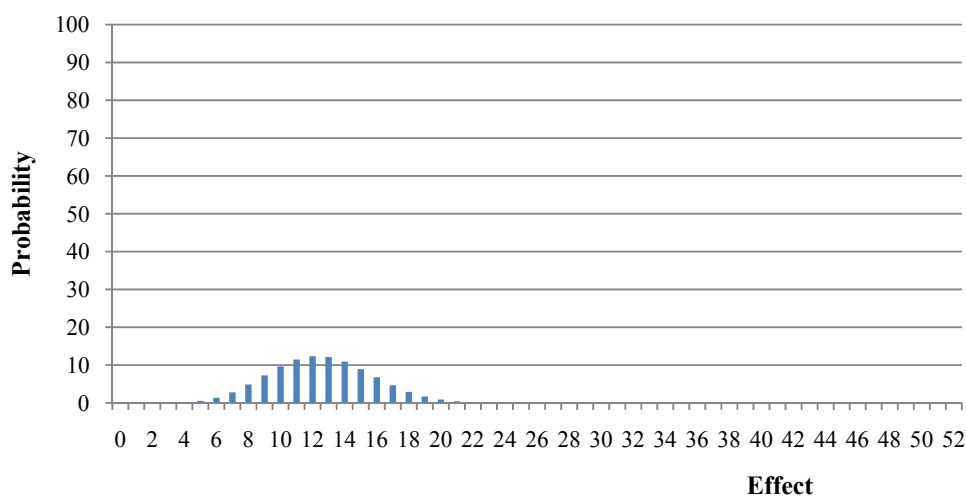
شکل ۵-۷- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "آب ورودی به تونل" (P<sub>5</sub>)؛  
الف: علت (C)، ب: اثر (E)

### C<sub>6</sub> (%)



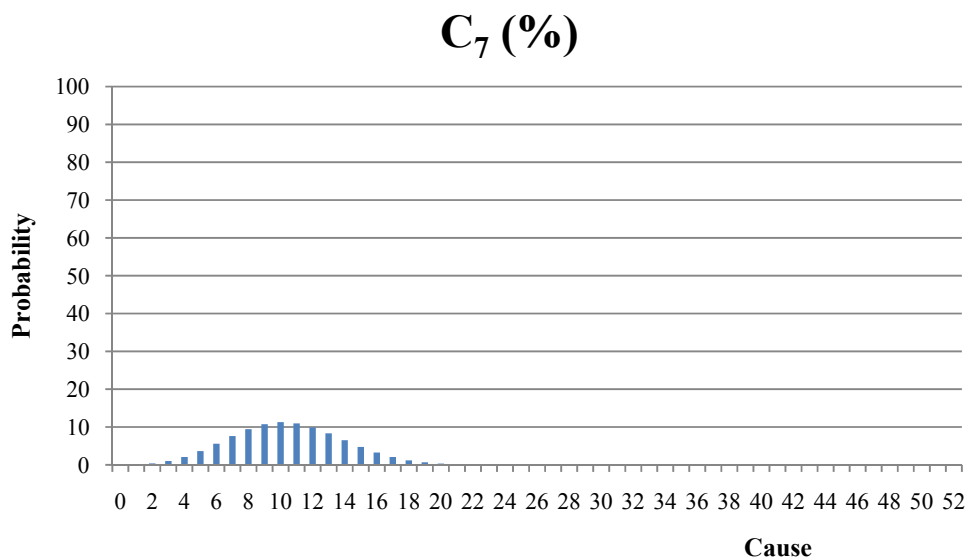
(الف)

### E<sub>6</sub> (%)

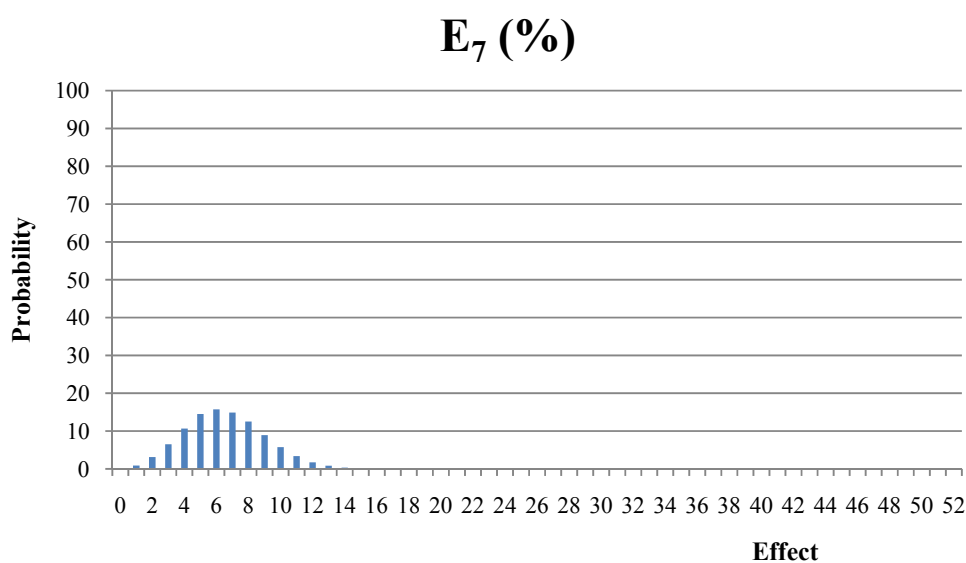


(ب)

شکل ۵-۸- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "سایندگی خاک" (P<sub>6</sub>)؛  
الف: علت (C)، ب: اثر (E)

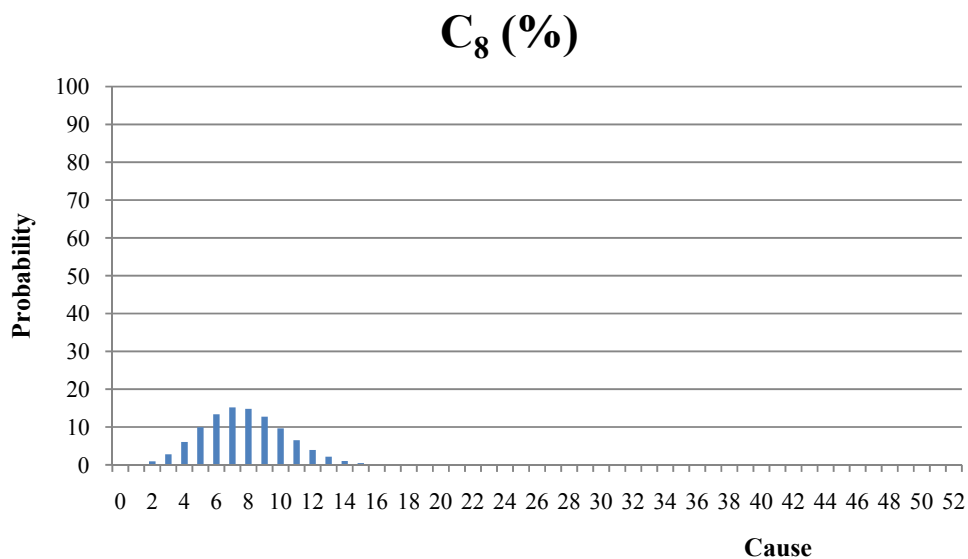


(الف)

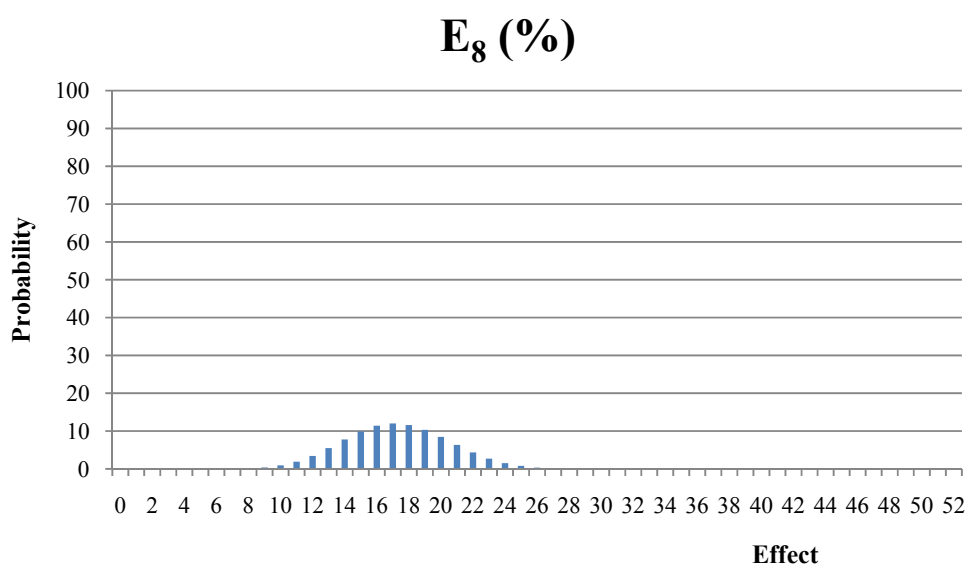


(ب)

شکل ۵-۹- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "وجود قطعه سنگ" (P<sub>7</sub>):  
الف: علت (C)، ب: اثر (E)



(الف)

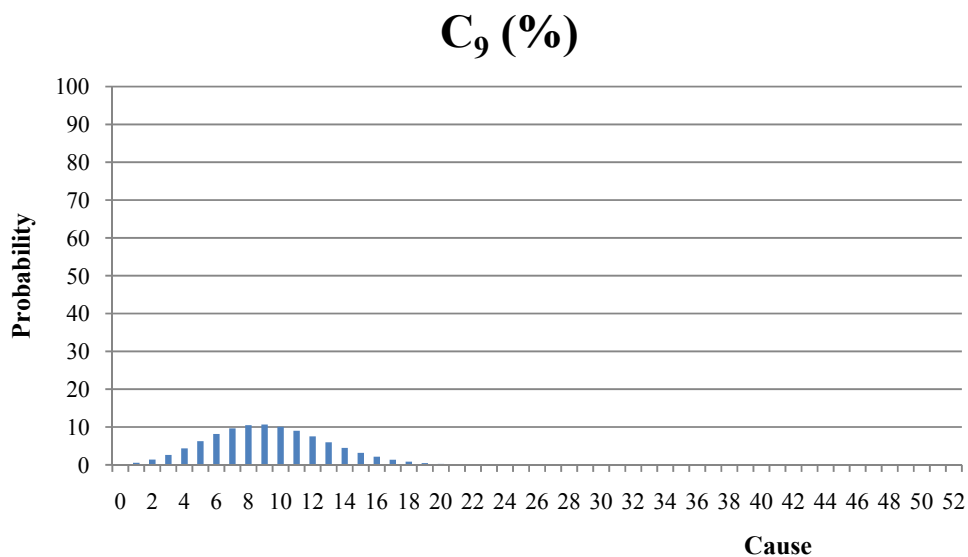


(ب)

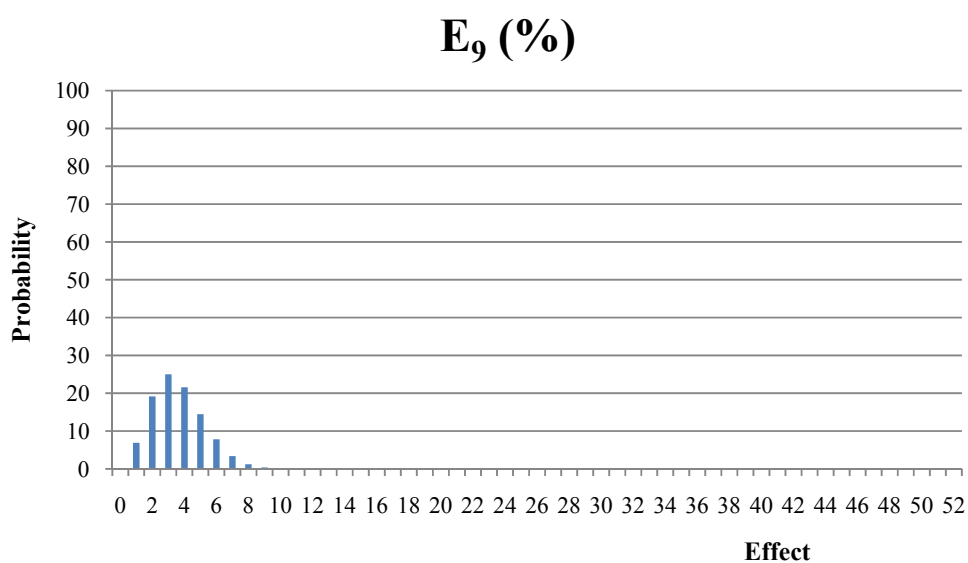
شکل ۵-۱۰- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "فشار زمین" (P<sub>8</sub>)؛

الف: علت (C)، ب: اثر (E)





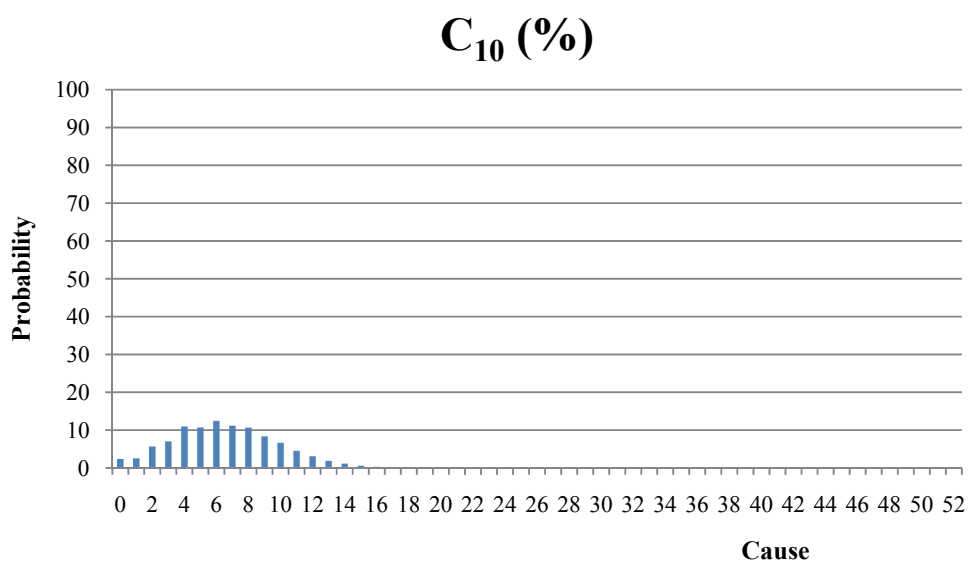
(الف)



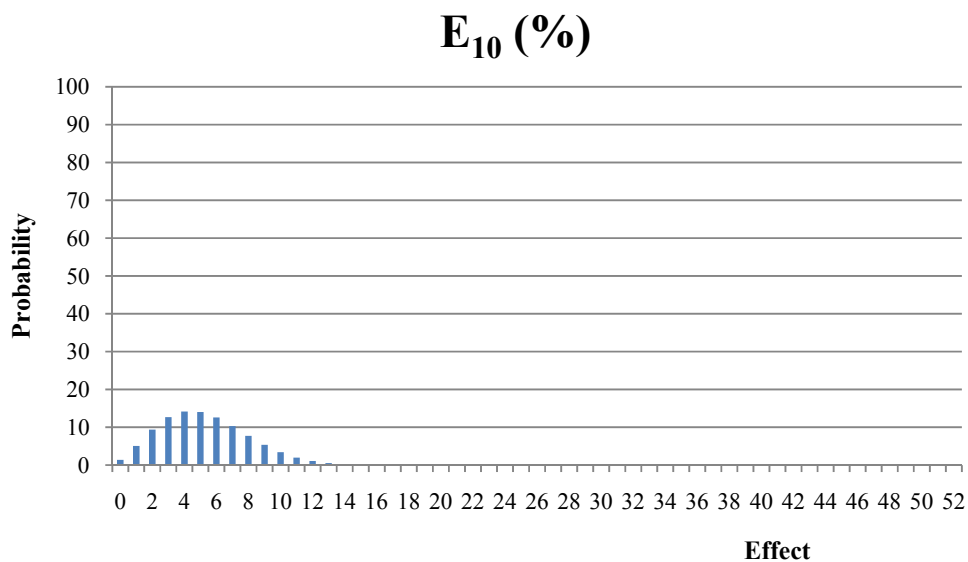
(ب)

شکل ۵-۱۱- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "برخورد با معارضان زیرزمینی" (P<sub>9</sub>);

الف: علت (C)، ب: اثر (E)



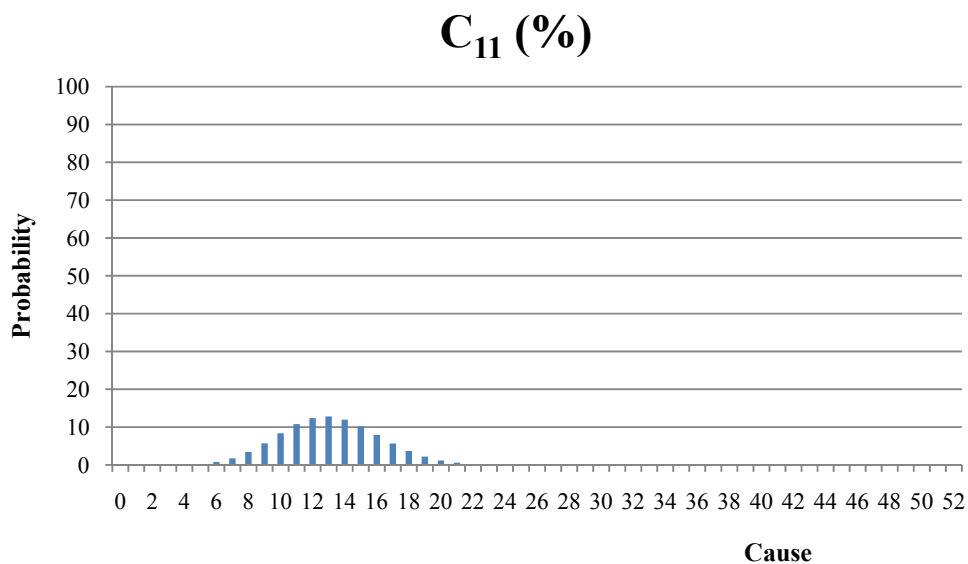
(الف)



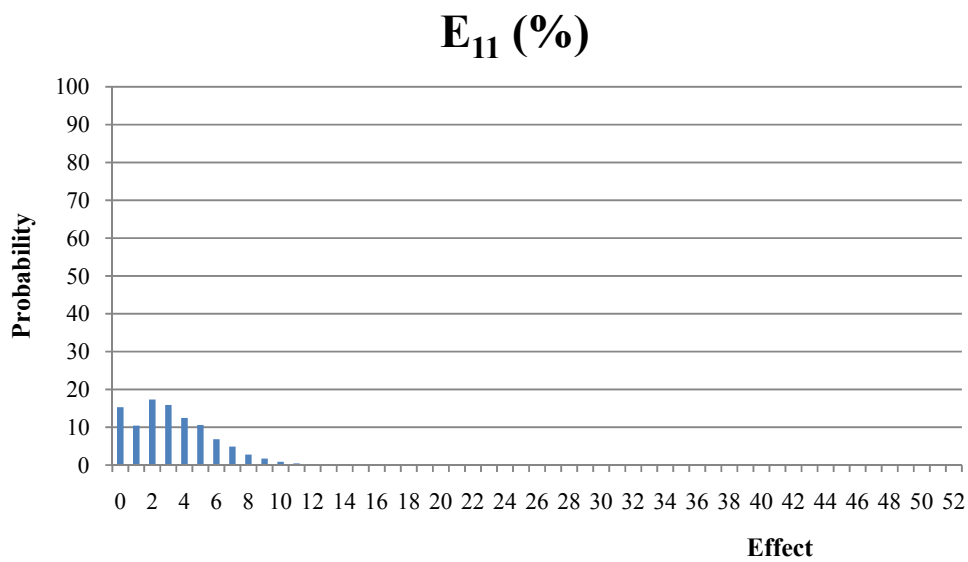
(ب)

شکل ۵-۱۲- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "عبور از زیر سازه‌های سطحی" (P<sub>10</sub>):

الف: علت (C)، ب: اثر (E)



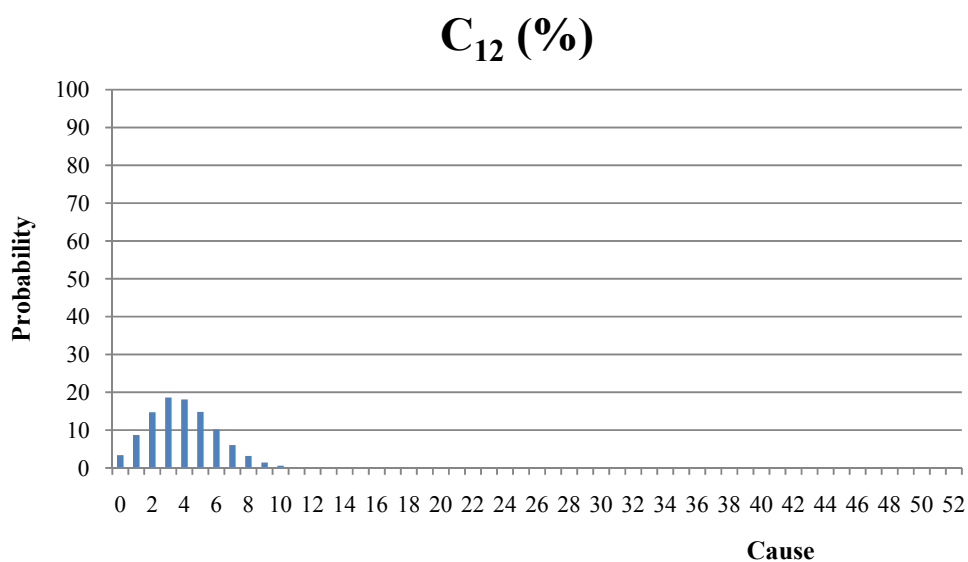
(الف)



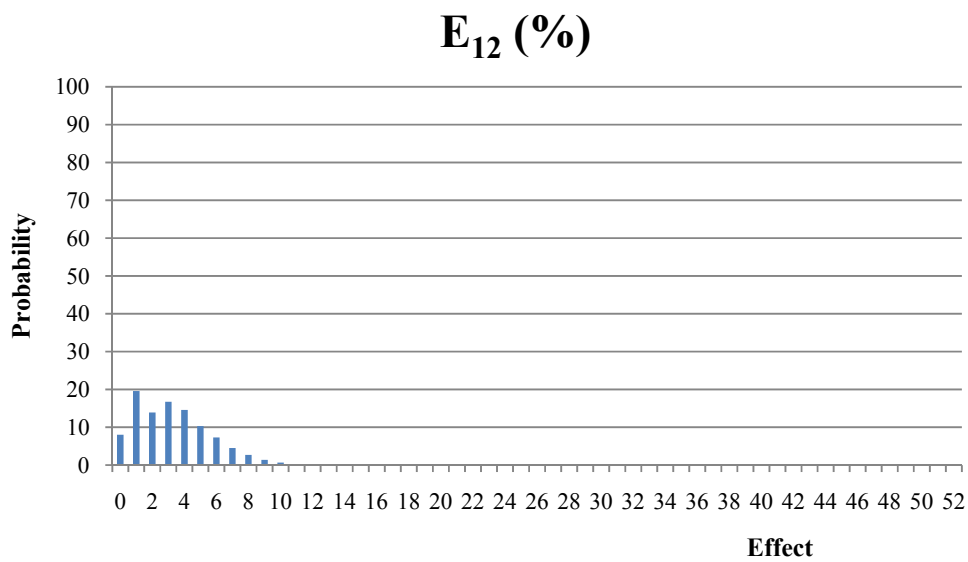
(ب)

شکل ۵-۱۳- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "نسبت عمق به قطر تونل" ( $P_{11}$ )؛

الف: علت (C)، ب: اثر (E)



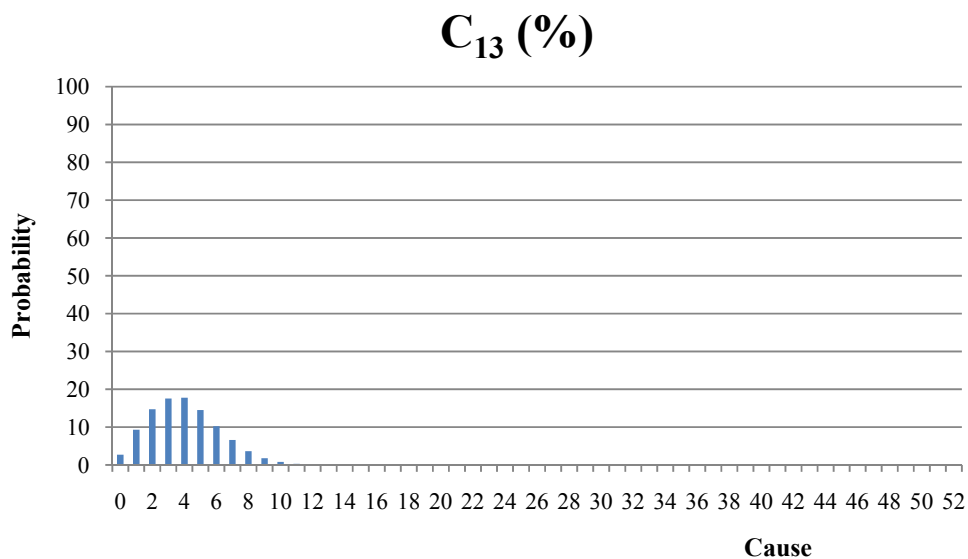
(الف)



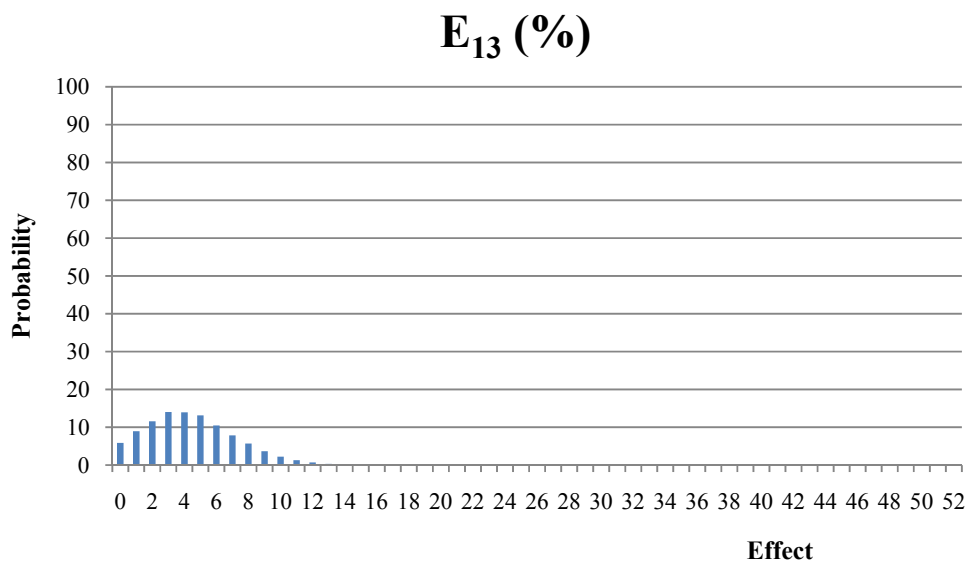
(ب)

شکل ۵-۱۴- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "شیب تونل" (P<sub>12</sub>)؛

الف: علت (C)، ب: اثر (E)



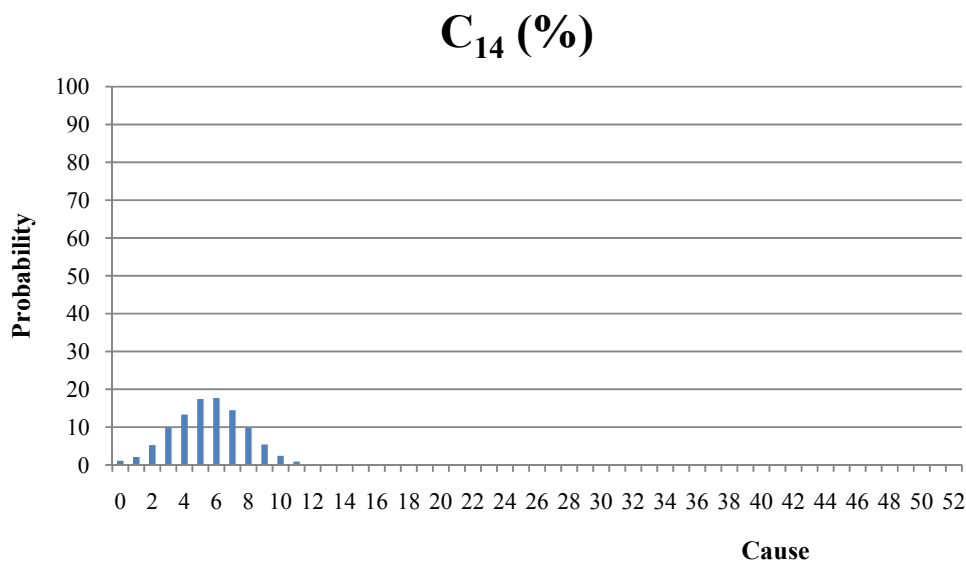
(الف)



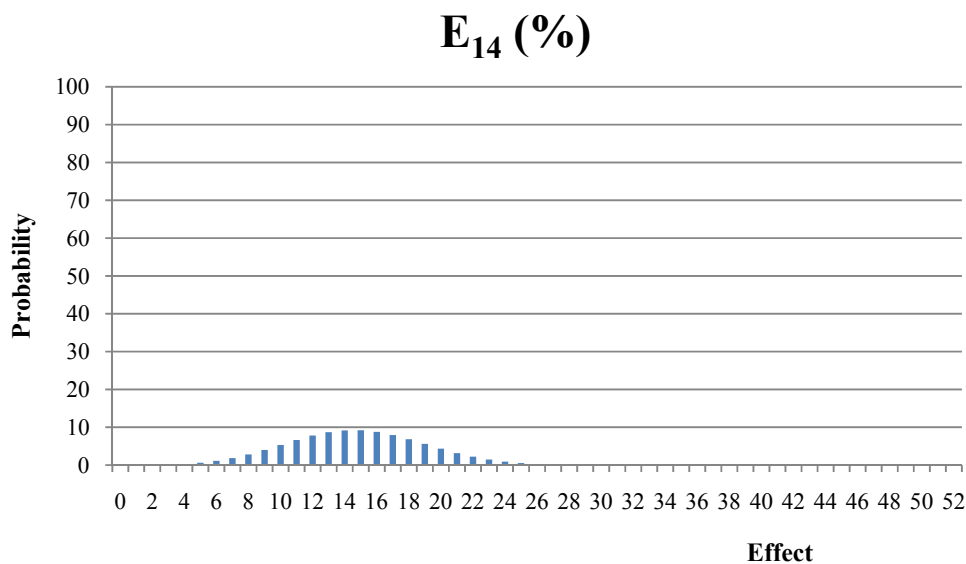
(ب)

شکل ۵-۱۵- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "قوس مسیر تول" (P<sub>13</sub>)؛

الف: علت (C)، ب: اثر (E)



(الف)



(ب)

شکل ۵-۱۶- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای عامل "تجربه و مهارت" (P<sub>14</sub>):

الف: علت (C)، ب: اثر (E)

## ۵-۲-۲- 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 (۵-۱)، مقدار درصد شدت اندرکنش عوامل به عنوان ضریب وزن آن‌ها در مساله در نظر گرفته می‌شود (Mazzoccola and Hudson, 1996).

$$a_i = \frac{(C_i + E_i)}{(\sum_i C_i + \sum_i E_i)} (\%) \quad (۵-۱)$$

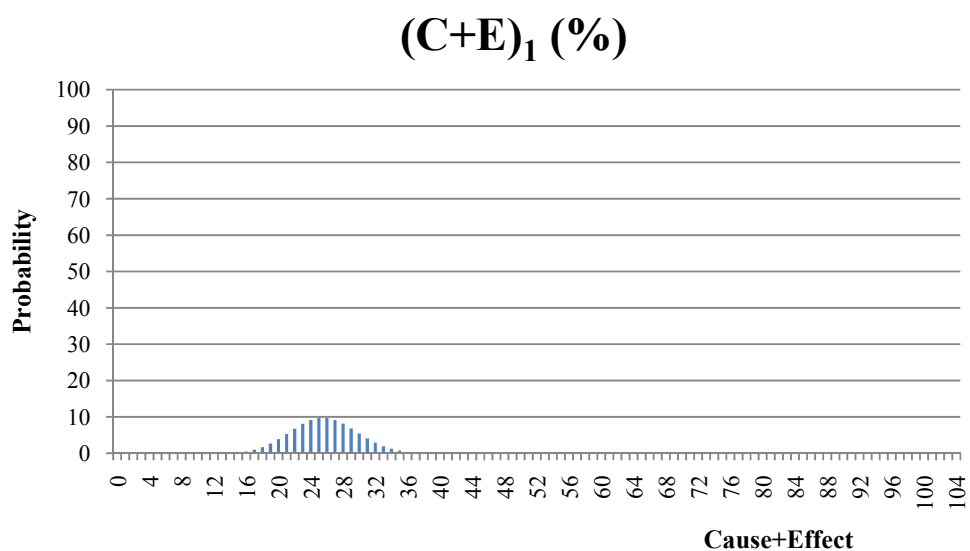
در این رابطه،  $C_i$  و  $E_i$  به ترتیب علت و اثر عامل  $i$  ام و  $i$  شمارنده‌ی عامل است. بدیهی است  $a_i$  مقداری بین صفر تا یک به خود اختصاص می‌دهد. مقادیر متوسط شدت اندرکنش عوامل در پژوهش حاضر، در شکل ۵-۱ ارائه گردید. با توجه به این که روش محاسباتی در نظر گرفته شده برای پژوهش حاضر به صورت احتمالاتی 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 (۵-۱) (یعنی  $C_i+E_i$ )، 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 برابر ۲۵۲/۹۱ 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 ۲۵۲/۹۱ تقسیم شده است (شکل ۵-۱۷ تا شکل ۵-۳۰). به عنوان مثال، وزن عامل شیب تونل ( $a_{12}$ ) که از شدت اندرکنش آن در سیستم ( $C_{12}+E_{12}$ ) محاسبه شده است، در جدول ۵-۷ مشاهده می‌شود. بدیهی است که تفاوت دو

توزیع  $C_i+E_i$  و  $a_i$  در مقادیر آن‌ها است (محور افقی نمودارها)، در حالی که شکل توزیع با توجه به ثابت ماندن احتمالات (محور عمودی نمودارها) تغییری نمی‌کند.

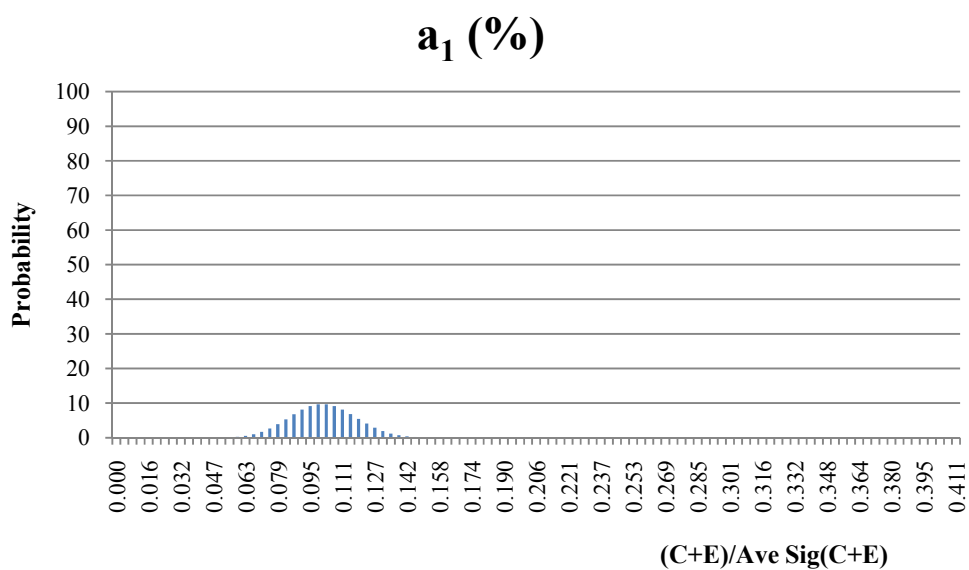
جدول ۵-۷- محاسبه‌ی وزن عامل شیب تونل ( $P_{12}$ ) در پژوهش حاضر

احتمال	وزن عامل ( $a_{12}$ )	شدت اندرکنش ( $C_{12}+E_{12}$ )
۰/۲۷۰	۰/۰۰۰	۰
۱/۳۵۸	۰/۰۰۴	۱
۳/۳۵۷	۰/۰۰۸	۲
۶/۱۵۳	۰/۰۱۲	۳
۹/۰۹۲	۰/۰۱۶	۴
۱۱/۴۰۶	۰/۰۲۰	۵
۱۲/۶۴۳	۰/۰۲۴	۶
۱۲/۵۸۶	۰/۰۲۸	۷
۱۱/۴۴۶	۰/۰۳۲	۸
۹/۶۰۳	۰/۰۳۶	۹
۷/۴۷۹	۰/۰۴۰	۱۰
۵/۴۴۵	۰/۰۴۳	۱۱
۳/۷۱۴	۰/۰۴۷	۱۲
۲/۳۸۰	۰/۰۵۱	۱۳
۱/۴۳۴	۰/۰۵۵	۱۴
۰/۸۱۲	۰/۰۵۹	۱۵
۰/۴۳۲	۰/۰۶۳	۱۶
۰/۲۱۶	۰/۰۶۷	۱۷
۰/۱۰۱	۰/۰۷۱	۱۸
۰/۰۴۵	۰/۰۷۵	۱۹
۰/۰۱۸	۰/۰۷۹	۲۰
۰/۰۰۷	۰/۰۸۳	۲۱
۰/۰۰۲	۰/۰۸۷	۲۲
۰/۰۰۱	۰/۰۹۱	۲۳





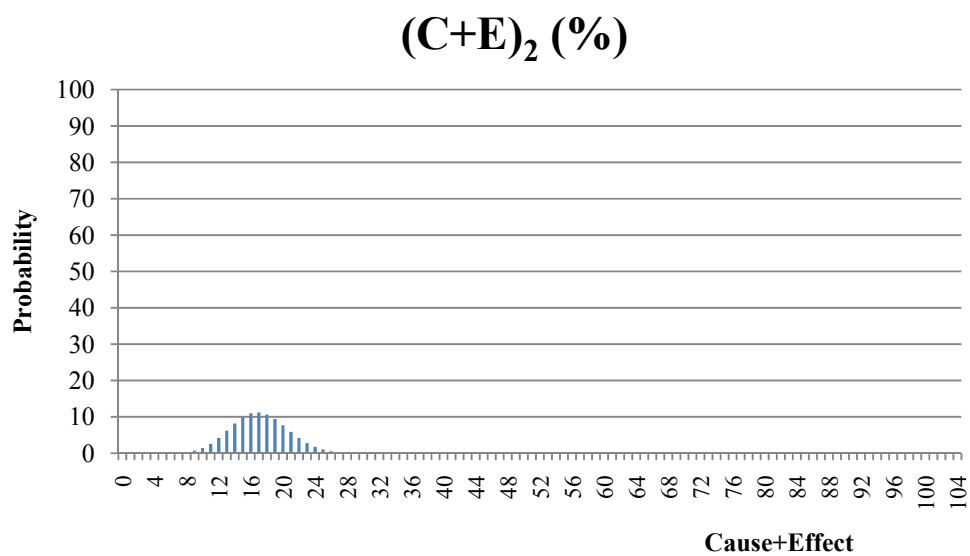
(الف)



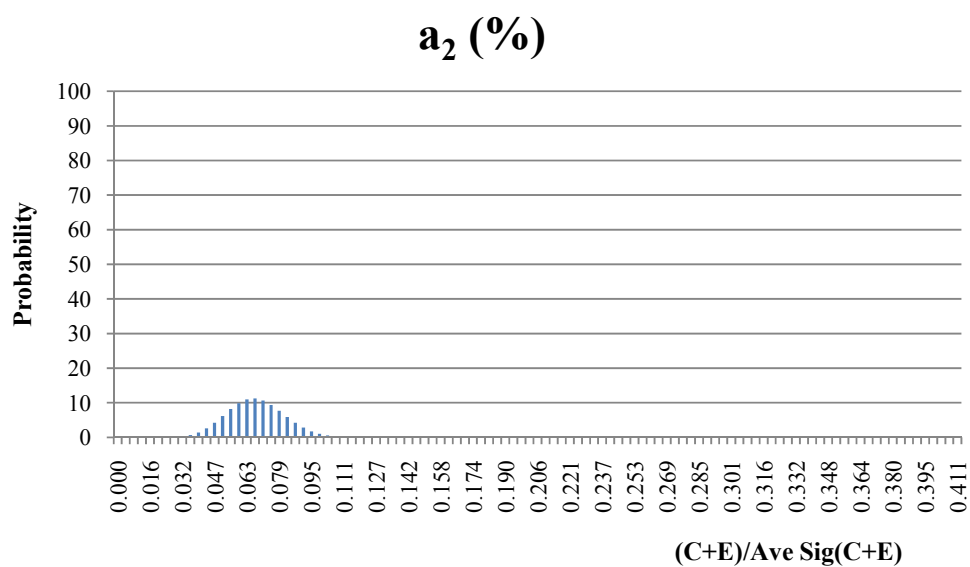
(ب)

شکل ۵-۱۷- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_i)$  برای عامل "دانه‌بندی خاک"  $(P_1)$ ؛

الف: شدت اندرکنش  $(C+E)$ ، ب: وزن  $(a_i)$



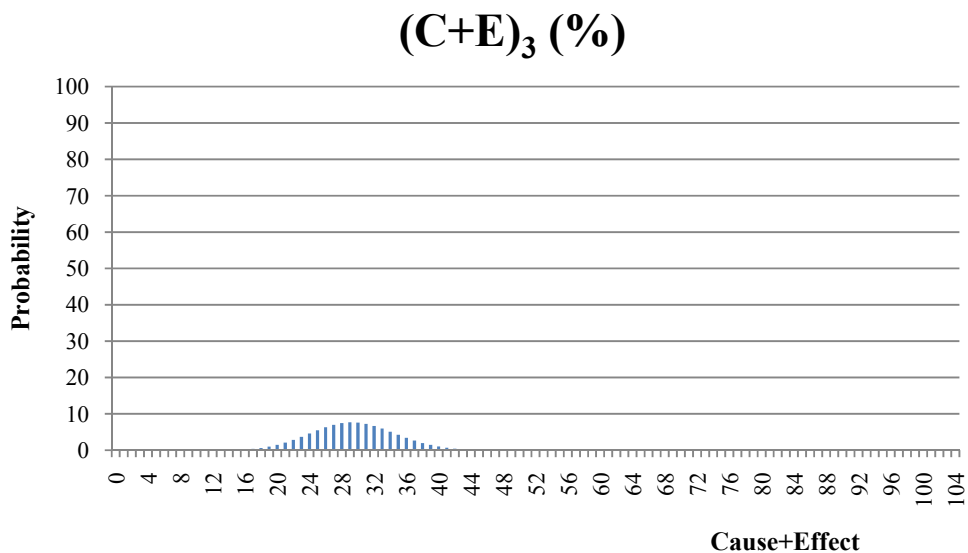
(الف)



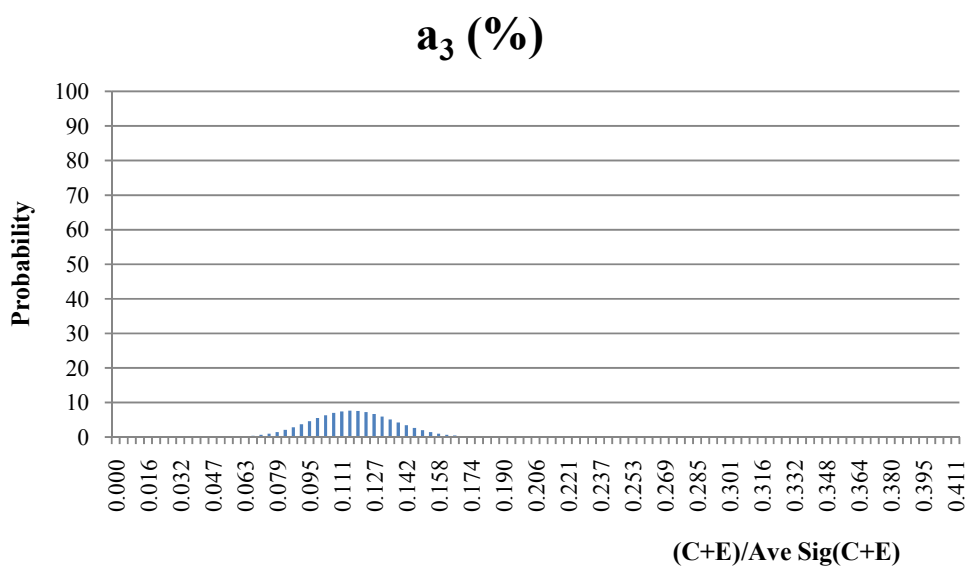
(ب)

شکل ۵-۱۸- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (a<sub>i</sub>) برای عامل "شاخص استحکام" (P<sub>2</sub>);

الف: شدت اندرکنش (C+E)، ب: وزن (a<sub>i</sub>)

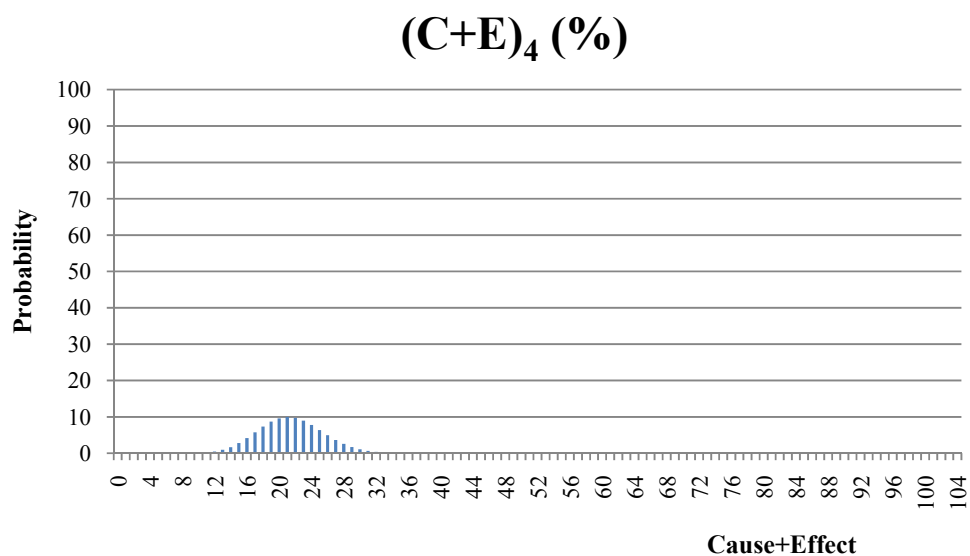


(الف)

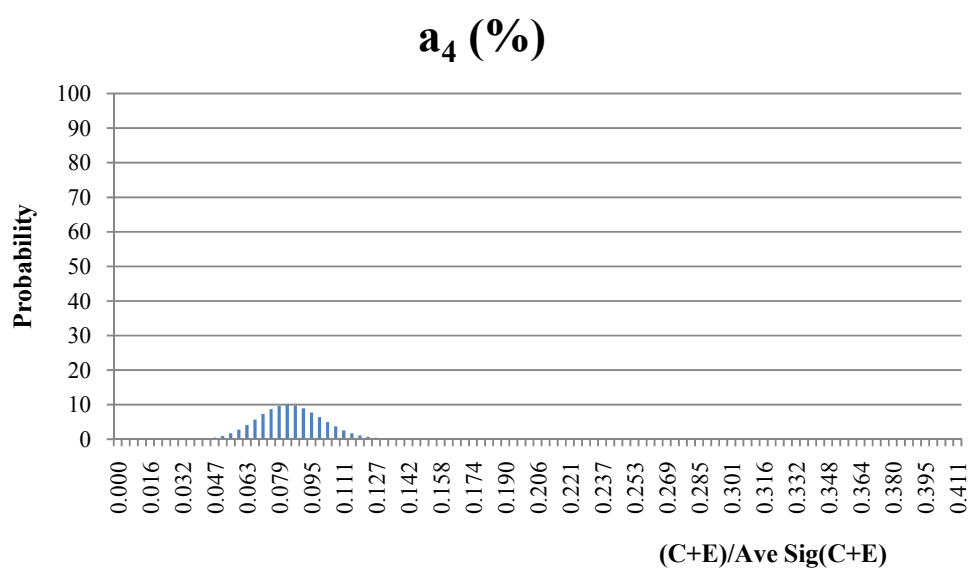


(ب)

شکل ۵-۱۹- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (a<sub>i</sub>) برای عامل "سینه‌کار مختلط" (P<sub>3</sub>)؛  
الف: شدت اندرکنش (C+E)، ب: وزن (a<sub>i</sub>)

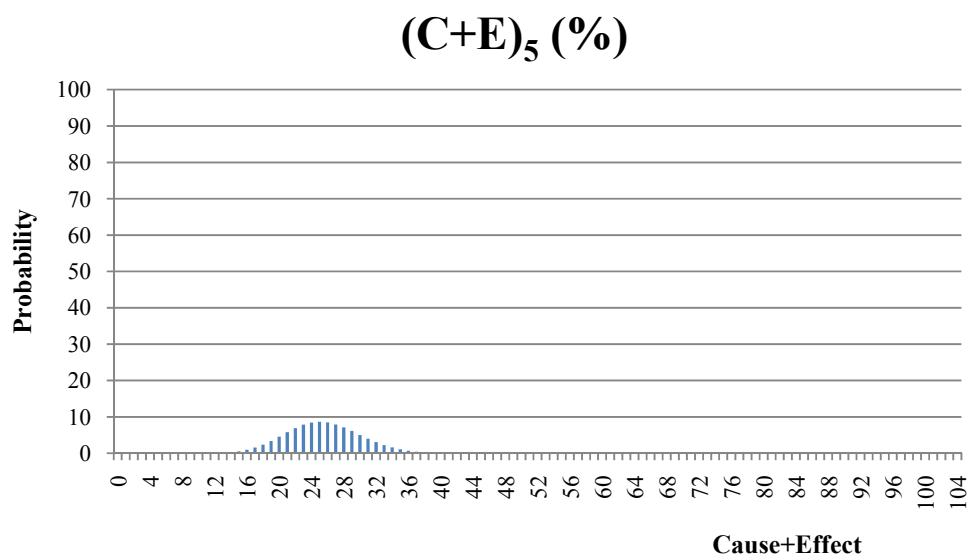


(الف)

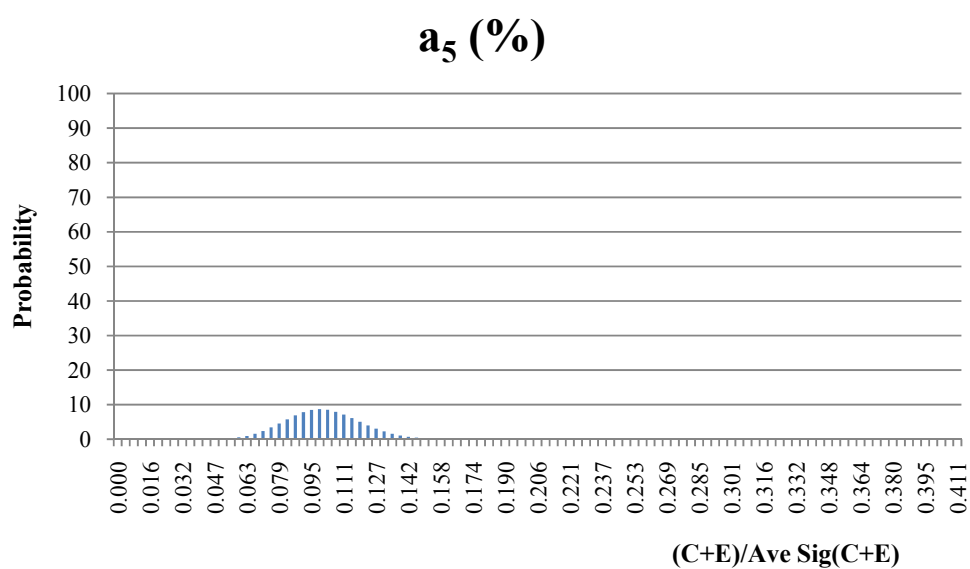


(ب)

شکل ۵-۲۰- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_i)$  برای عامل "انسداد"  $(P_4)$ ؛  
الف: شدت اندرکنش  $(C+E)$ ، ب: وزن  $(a_i)$

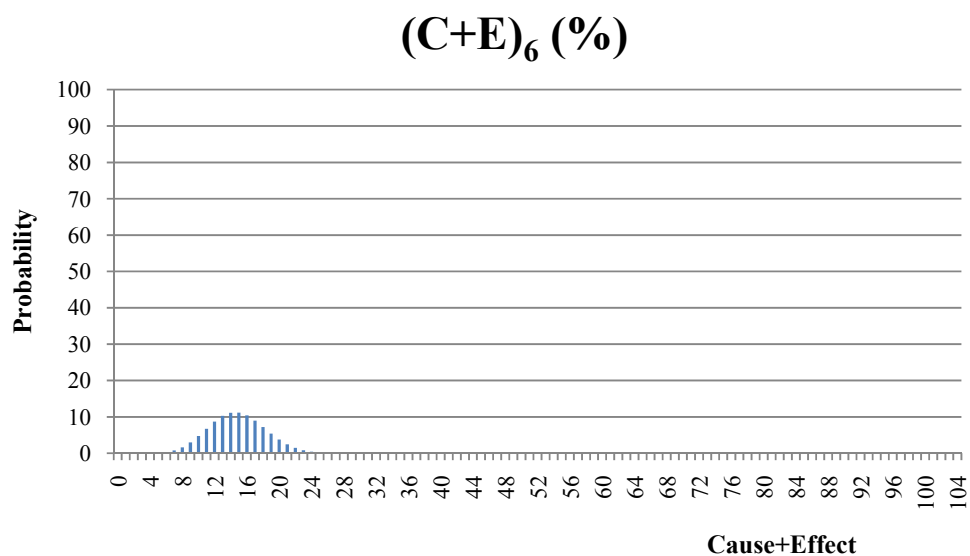


(الف)

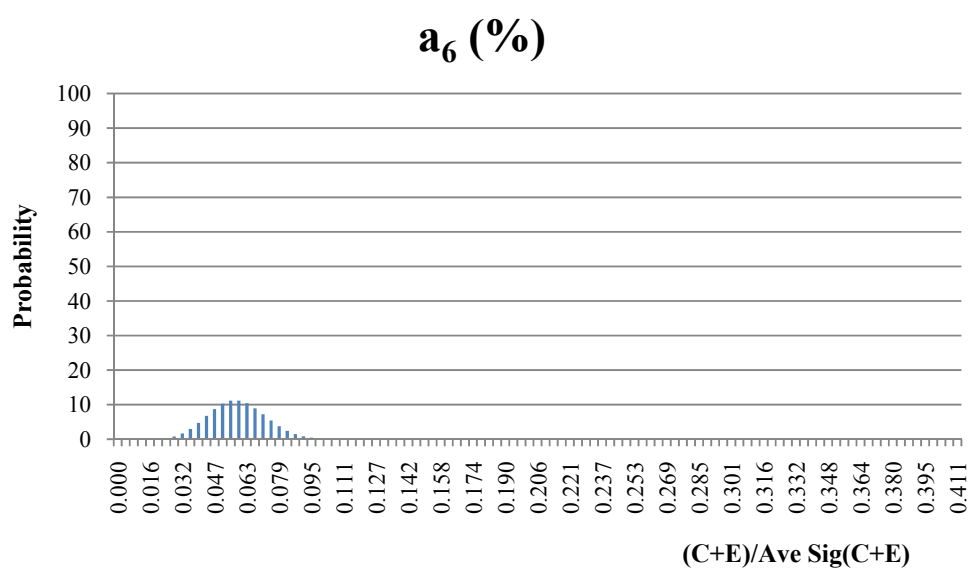


(ب)

شکل ۵-۲۱- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_i)$  برای عامل "آب ورودی به تونل"  $(P_5)$ ؛  
الف: شدت اندرکنش  $(C+E)$ ، ب: وزن  $(a_i)$



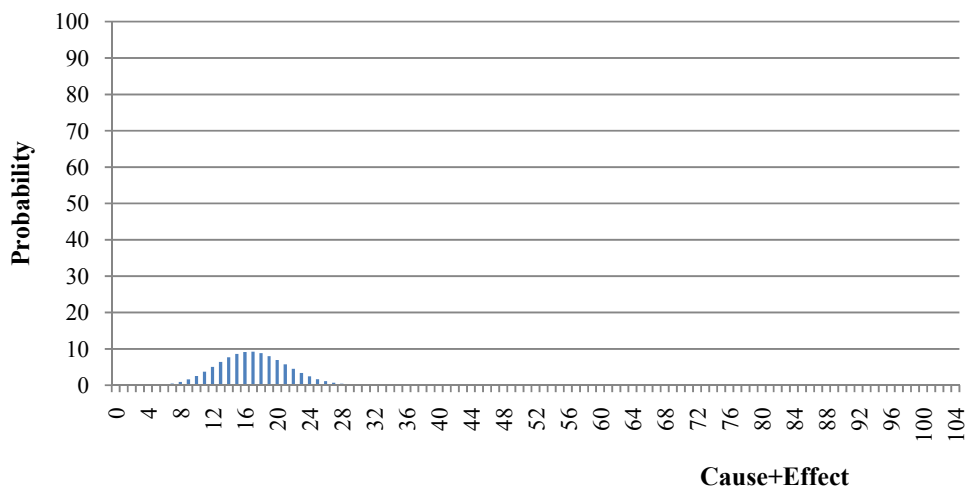
(الف)



(ب)

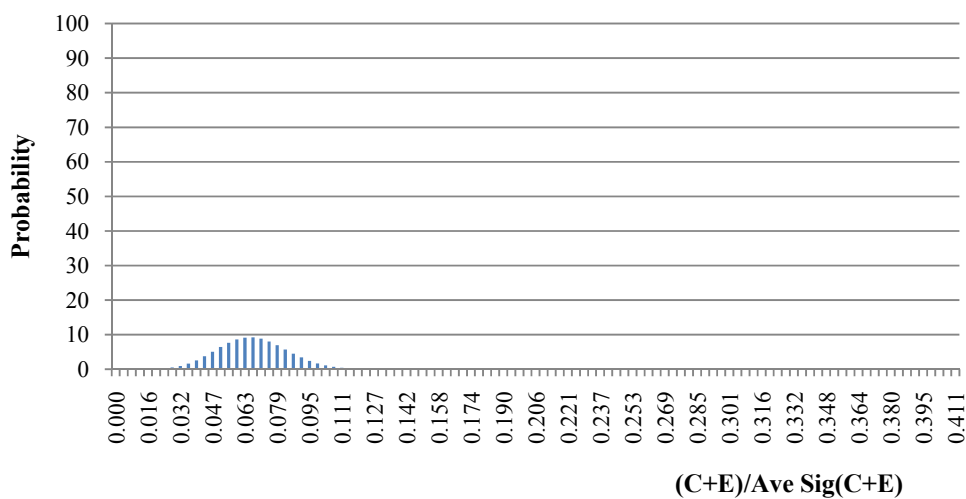
شکل ۵-۲۲- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_i)$  برای عامل "سایندگی خاک"  $(P_6)$ ؛  
الف: شدت اندرکنش  $(C+E)$ ، ب: وزن  $(a_i)$

$(C+E)_7$  (%)



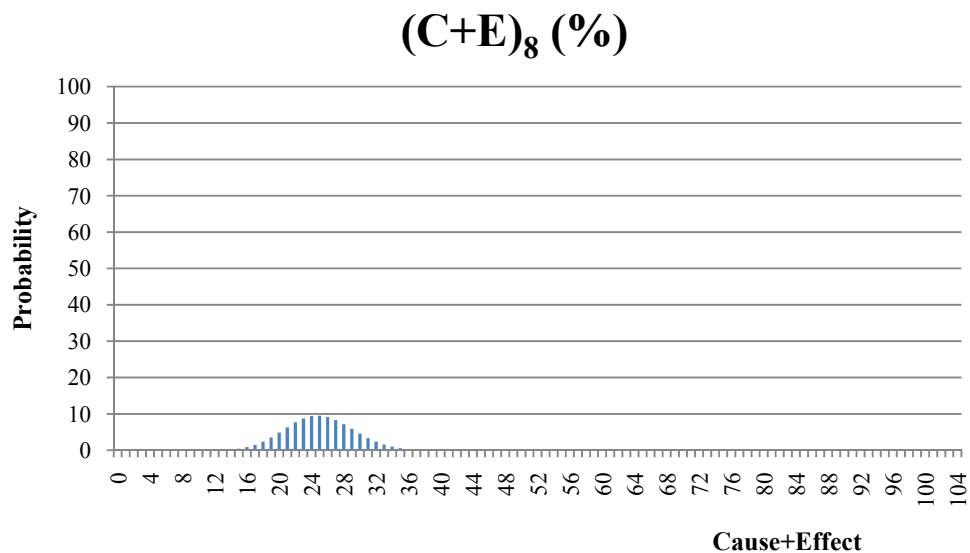
(الف)

$a_7$  (%)

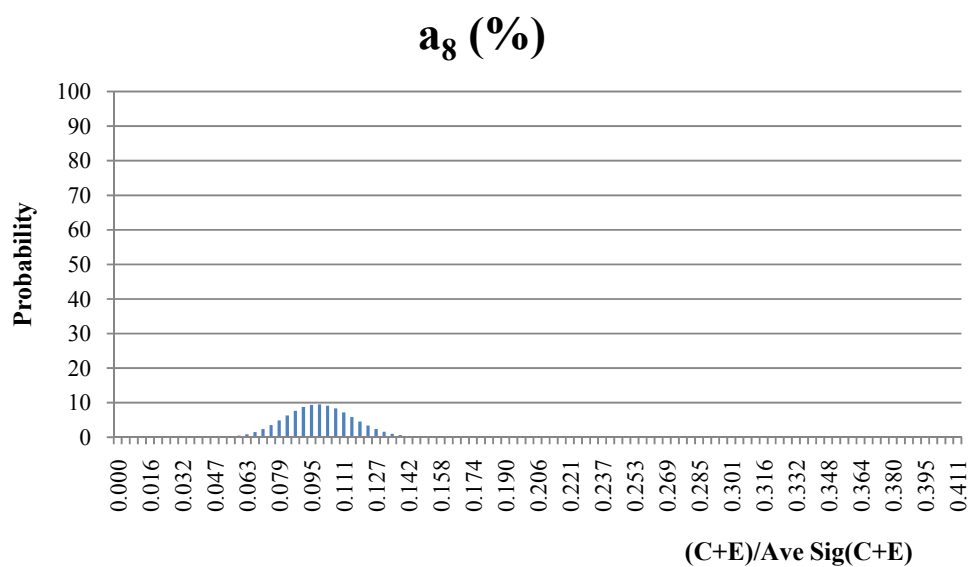


(ب)

شکل ۵-۲۳- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_i)$  برای عامل "وجود قطعه سنگ"  $(P_7)$ ؛  
الف: شدت اندرکنش  $(C+E)$ ، ب: وزن  $(a_i)$



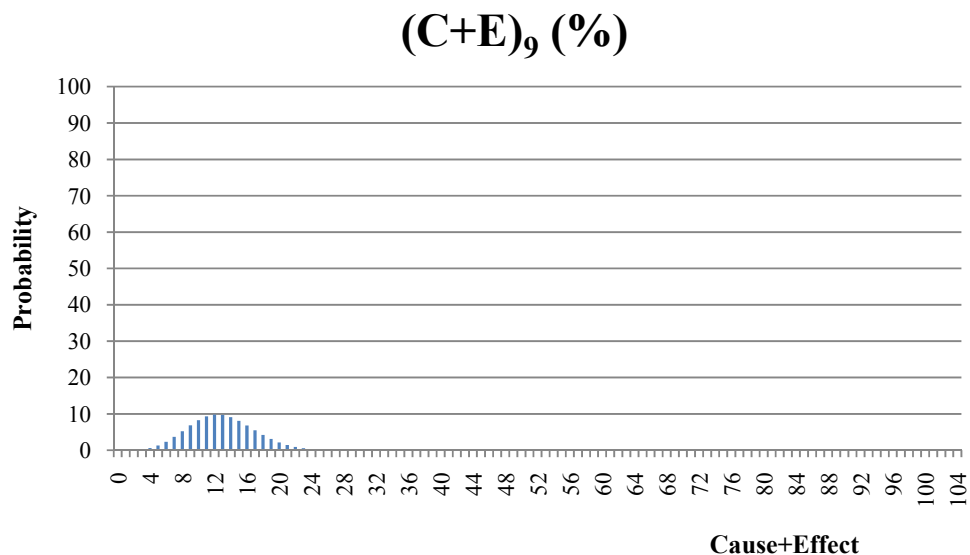
(الف)



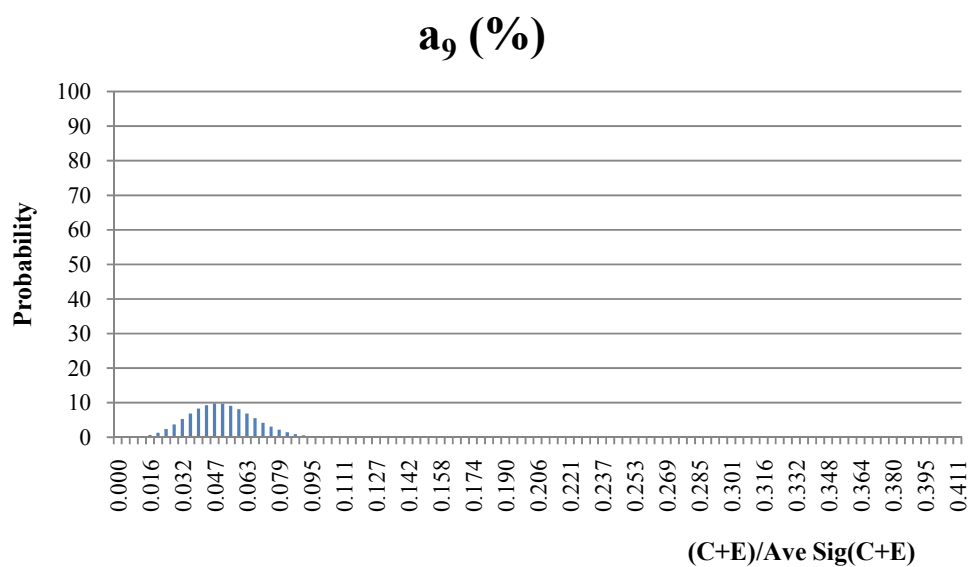
(ب)

شکل ۵-۲۴- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_i)$  برای عامل "فشار زمین"  $(P_8)$ ؛  
الف: شدت اندرکنش  $(C+E)$ ، ب: وزن  $(a_i)$



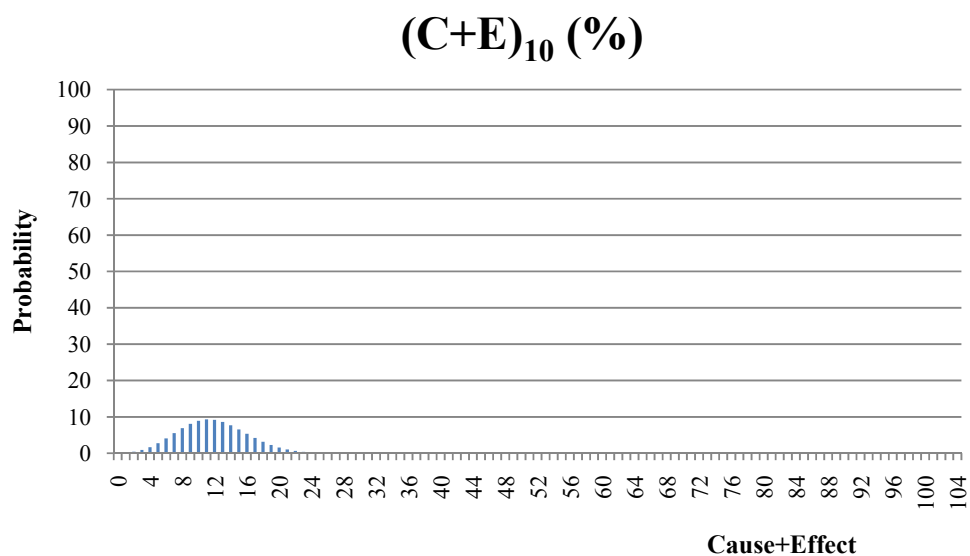


(الف)

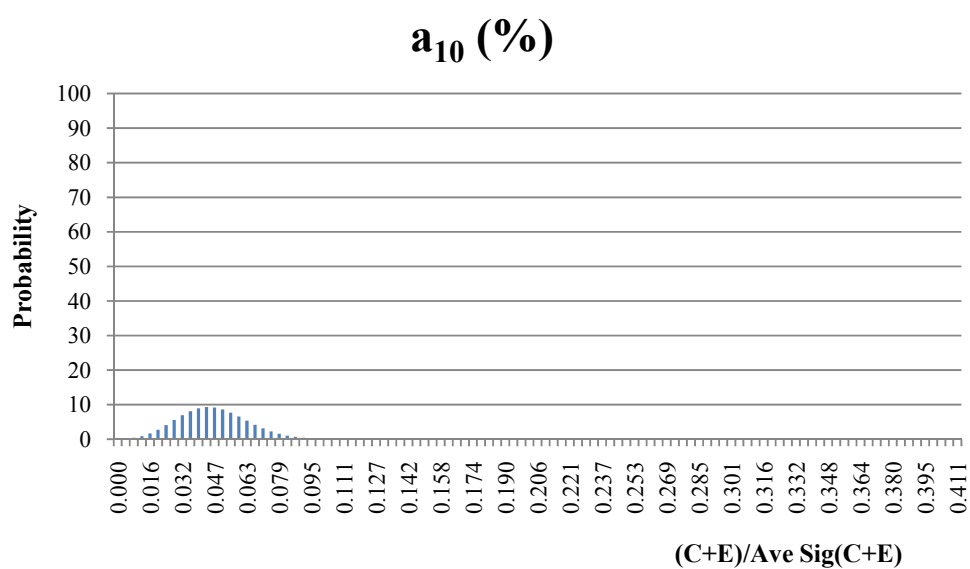


(ب)

شکل ۵-۲۵- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش (C+E) و وزن (a<sub>i</sub>) برای عامل "برخورد با معارضان زیرزمینی"  
 الف: شدت اندرکنش (C+E)، ب: وزن (a<sub>i</sub>)

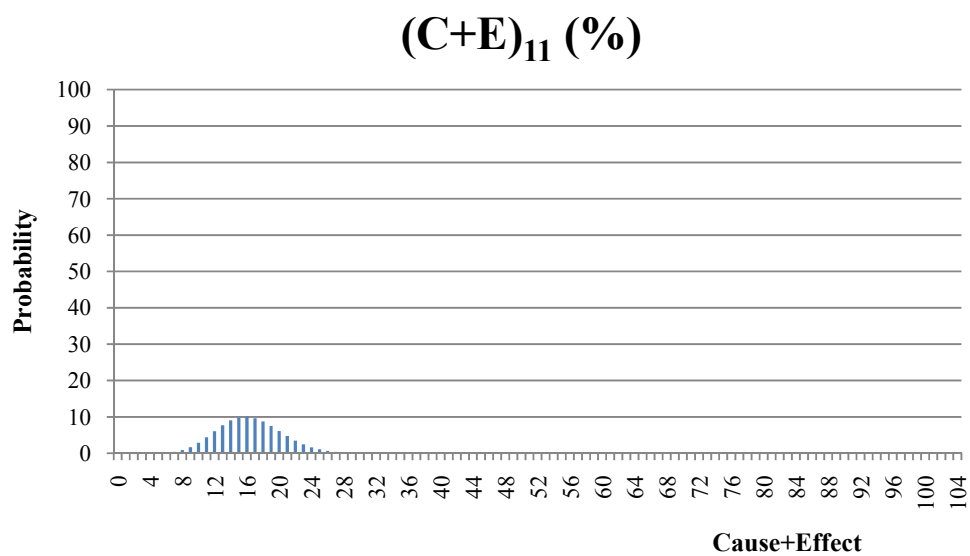


(الف)

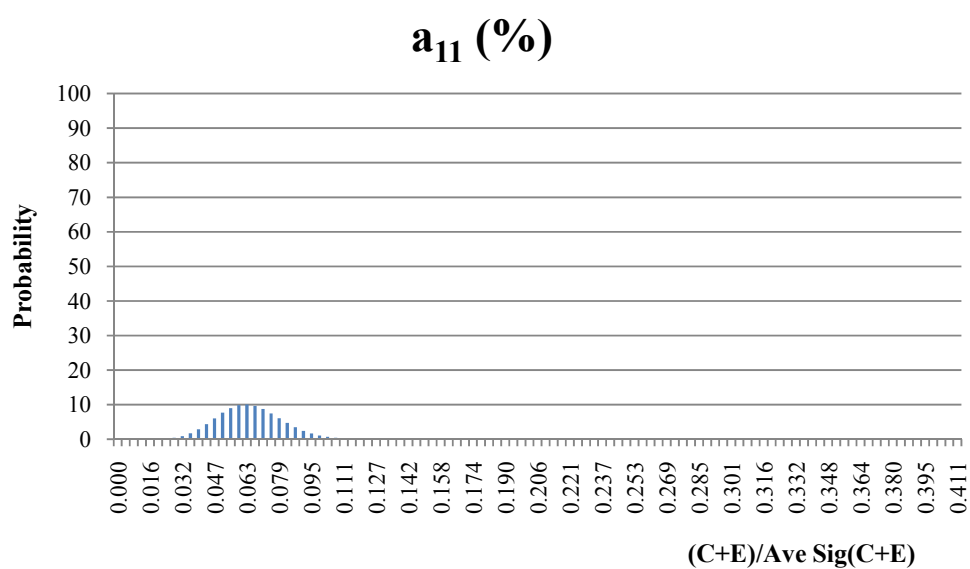


(ب)

شکل ۵-۲۶- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_i)$  برای عامل "عبور از زیر سازه‌های سطحی"  
 الف: شدت اندرکنش  $(C+E)$ ، ب: وزن  $(a_i)$

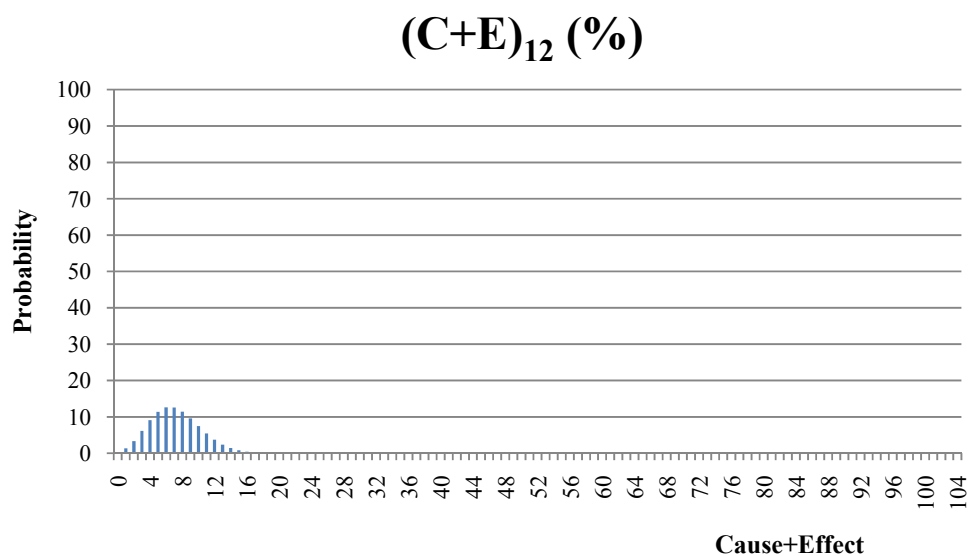


(الف)

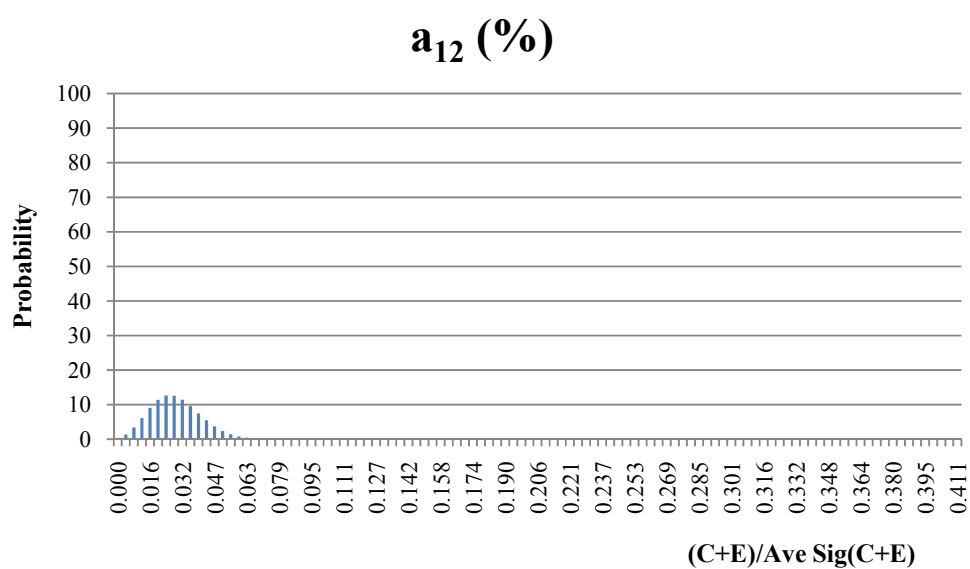


(ب)

شکل ۵-۲۷- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_i)$  برای عامل "نسبت عمق به قطر تونل"  $(P_{11})$ ؛  
الف: شدت اندرکنش  $(C+E)$ ، ب: وزن  $(a_i)$



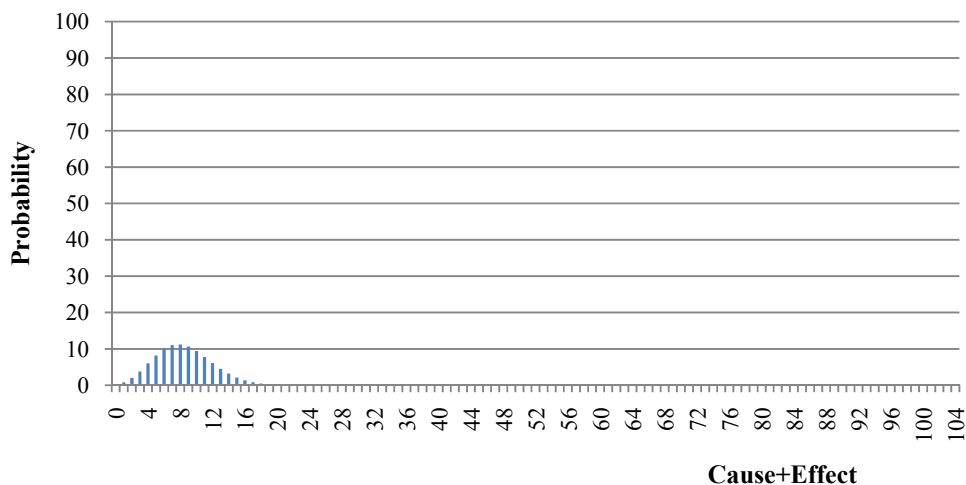
(الف)



(ب)

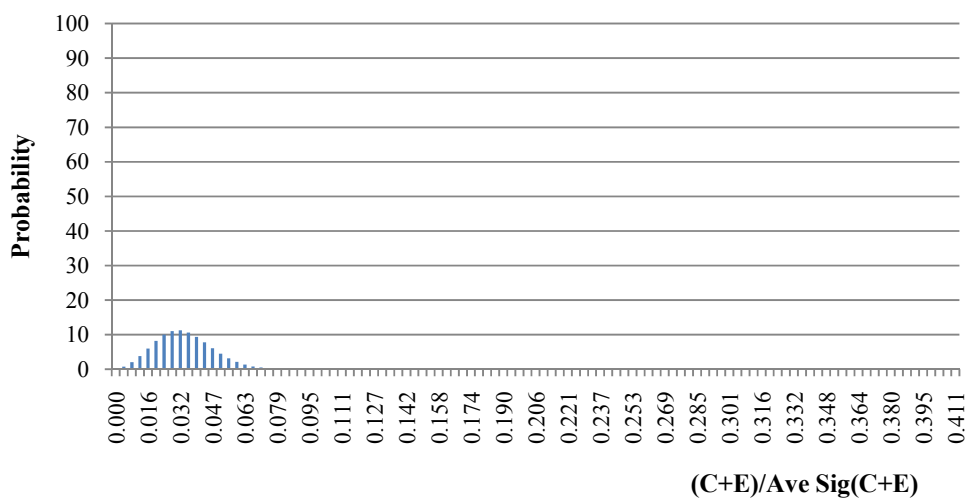
شکل ۵-۲۸- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن برای عامل "شیب تونل"  $(P_{12})$ ؛  
الف: شدت اندرکنش  $(C+E)$ ، ب: وزن  $(a_i)$

$(C+E)_{13}$  (%)



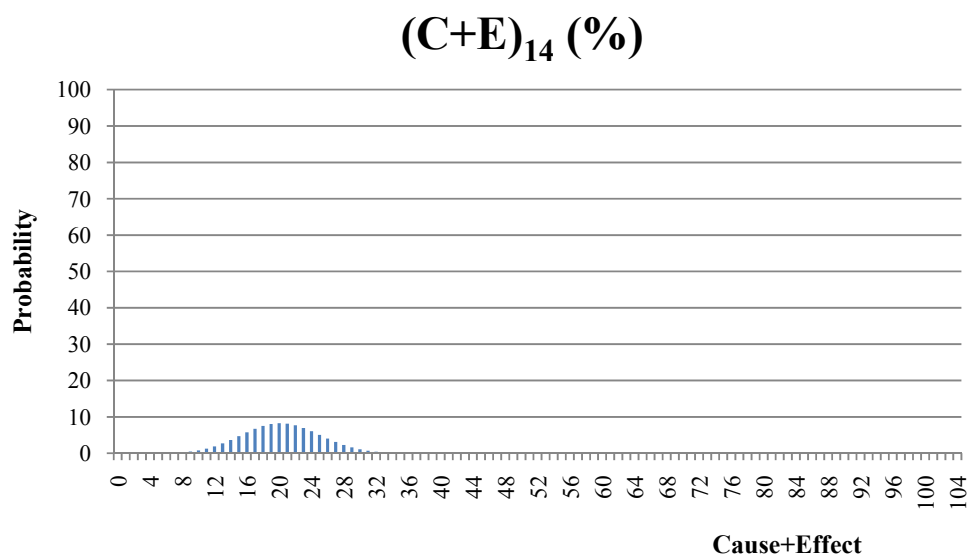
(الف)

$a_{13}$  (%)

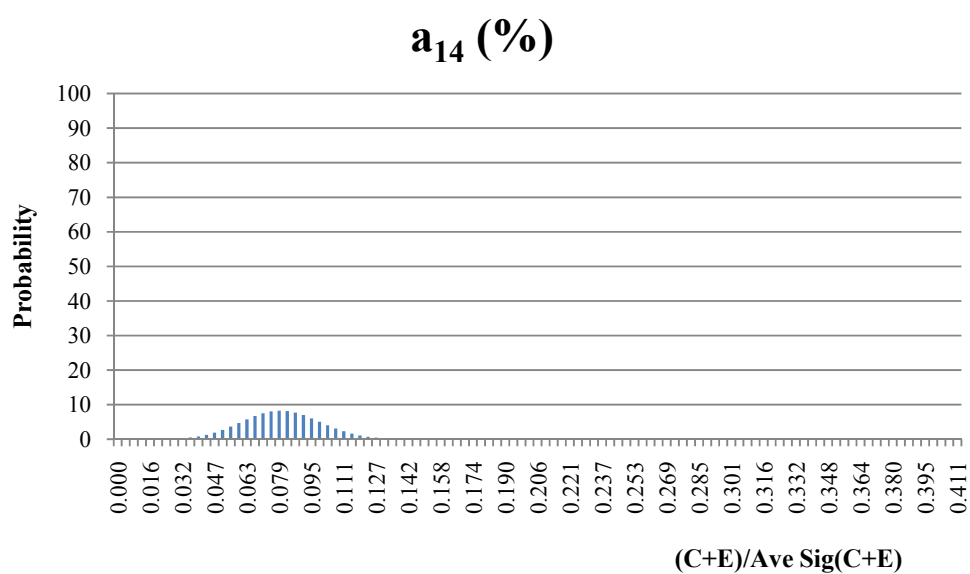


(ب)

شکل ۵-۲۹- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_i)$  برای عامل "فوس مسیر تونل"  $(P_{13})$ ؛  
الف: شدت اندرکنش  $(C+E)$ ، ب: وزن  $(a_i)$



(الف)



(ب)

شکل ۵-۳- توزیع‌های احتمال شدت اندرکنش  $(C+E)$  و وزن  $(a_i)$  برای عامل "تجربه و مهارت"  $(P_{14})$ ؛  
الف: شدت اندرکنش  $(C+E)$ ، ب: وزن  $(a_i)$

## ۳-۵- برآورد شاخص بهره‌وری

پس از تعیین وزن هر یک از عوامل، به برآورد شاخص بهره‌وری (UI) برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل پرداخته می‌شود. شاخص بهره‌وری در هر پهنه، نشان‌دهنده‌ی میزان شرایط کاری پهنه‌ی TBM برای پهنه‌ی مورد نظر است. به عبارتی هرچه شرایط برای حفاری TBM در پهنه‌ی مد نظر مساعدتر باشد، مقدار شاخص بهره‌وری در آن پهنه بیشتر خواهد بود. مقدار شاخص بهره‌وری برای هر پهنه با استفاده از رابطه‌ی (۲-۵) محاسبه می‌گردد (Mazzoccola and Hudson, 1996).

$$UI = \sum_{i=1}^n a_i \frac{P_i}{P_{max}} \quad (2-5)$$

در این رابطه  $a_i$  وزن عامل  $i$  ام،  $P_i$  مقدار (امتیاز) عامل  $i$  ام،  $i$  شمارنده‌ی عامل و  $P_{max}$  حداکثر مقداری است که یک عامل می‌تواند داشته باشد (عامل یک‌گانه<sup>۱</sup>).

توزیع مقادیر عوامل ( $P_i$ ) برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل، در فصل چهارم ارائه گردید. مقدار  $P_{max}$  با توجه به معیار طبقه‌بندی و امتیازدهی برای هر عامل متفاوت است. به عنوان مثال، معیار طبقه‌بندی عامل دانه‌بندی دارای امتیازبندی از صفر تا ۳ است، بنابراین مقدار  $P_{max}$  برای این عامل برابر ۳ است. با توجه به این که  $a_i$  مقداری بین صفر تا یک دارد، عامل  $P_{max}$  موجب می‌شود مقادیر UI نیز بین صفر و یک قرار گیرد.

از مهم‌ترین روش‌های مدل‌سازی احتمالاتی به کار گرفته شده در مباحث ژئوتکنیکی، روش مونت کارلو<sup>۲</sup> است (Malkawi et al., 2000). به منظور برآورد شاخص بهره‌وری برای پهنه‌های مسیر تونل با استفاده از رابطه‌ی (۲-۵)، از روش مدل‌سازی احتمالاتی مونت کارلو استفاده شده است. روش مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه‌ی نتایج استفاده می‌کند.

<sup>۱</sup> برای این که شاخص بهره‌وری در همه‌ی پهنه‌ها مقداری بین صفر تا یک به خود اختصاص دهد (Normalization factor)

<sup>۲</sup> Monte Carlo

این روش معمولاً برای مدل‌سازی سیستم‌های فیزیکی، ریاضیاتی و اقتصادی استفاده می‌شود. از طرف دیگر روش مونت‌کارلو از نوع الگوریتم‌های محاسبه‌گر است که برای محاسبه‌ی نتایج خود بر نمونه‌گیری‌های تکرارشونده‌ی تصادفی اتکا می‌کند. این روش اغلب زمان انجام مدل‌سازی یک سامانه‌ی ریاضیاتی یا فیزیکی استفاده می‌شود. به دلیل اتکای آن بر محاسبات تکراری و اعداد تصادفی، روش مونت‌کارلو اغلب به گونه‌ای تنظیم می‌شود که توسط رایانه اجرا شود. گرایش به استفاده از روش مونت‌کارلو زمانی بیشتر می‌شود که محاسبه‌ی پاسخ دقیق با کمک الگوریتم‌های قطعی ناممکن یا ناموجه باشد. این روش برای مدل‌سازی پدیده‌هایی که عدم قطعیت زیادی در ورودی‌های آن‌ها وجود دارد بسیار مفید است (Hubbard, 2007). در یک الگوریتم مونت‌کارلو، راه حل مساله به صورت امید ریاضی<sup>۱</sup> یک متغیر تصادفی مدل می‌شود و سپس با میانگین‌گیری بر روی تعداد نسبتاً زیاد 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 مونت‌کارلو به جای ایجاد فرمولی برای حل مساله، سعی می‌شود "مدل" برای چندین بار (صدها بار) در شرایطی احتمالی مورد تجزیه و آزمایش قرار گیرد و هر بار نتایج به دست آمده یادداشت شود. آن‌گاه با تحلیل آماری، به نتایج قابل اطمینان از عملکرد حقیقی سیستم واقعی دسترسی حاصل خواهد شد. روشن است که تجربه‌ی چندین هزار بار تنها با استفاده از کامپیوتر عملی و منطقی خواهد بود. این روش از الگوی مشخص ذیل پیروی می‌کند:

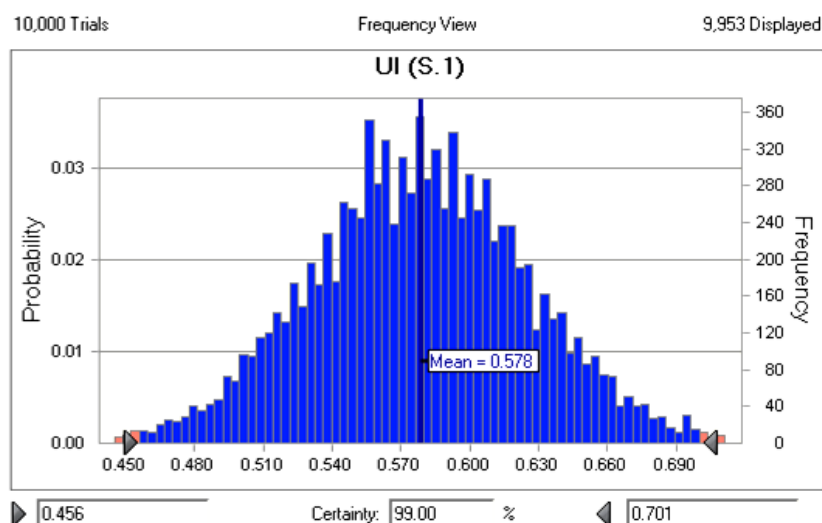
۱. محدوده‌ای از ورودی‌های ممکن را تعریف می‌کنند (عموماً به صورت توزیع آماری)؛
۲. از آن محدوده ورودی‌های تصادفی را تولید می‌کنند؛
۳. با استفاده از ورودی‌های به دست آمده یک سری محاسبات مشخص را انجام می‌دهند؛
۴. نتایج هر یک از اجراهای محاسباتی را در پاسخ نهایی ادغام می‌کنند.

---

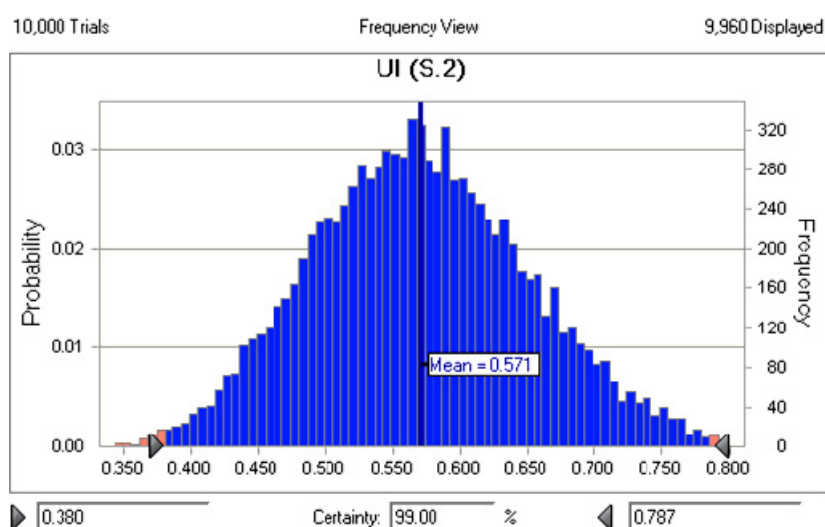
<sup>1</sup> Expected Value



با استفاده از روش مونت کارلو، توزیع احتمال شاخص بهره‌وری (UI) برای هر یک از ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل در ۱۰۰۰۰ بار اجرای این روش و سطح اطمینان ۹۹ درصد، به دست آمده است<sup>۱</sup> (شکل ۵-۳۱). همچنین مقادیر متوسط شاخص بهره‌وری در شکل ۵-۳۱ نشان داده شده است.

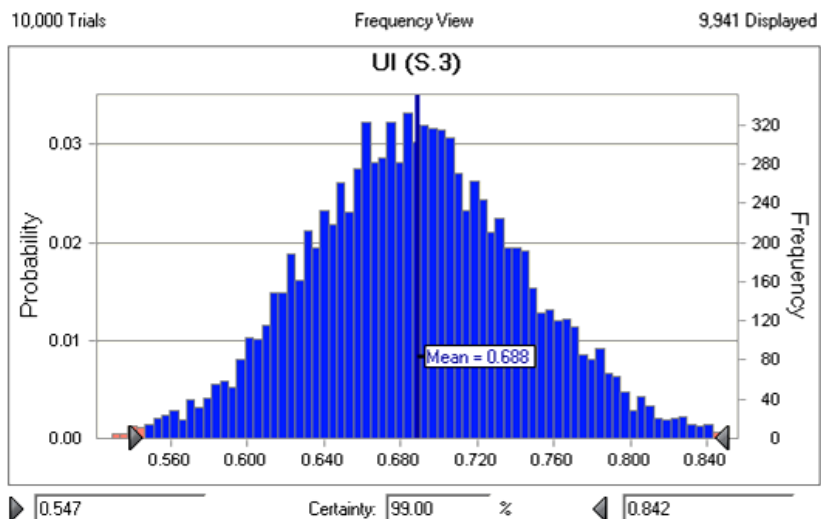


(الف): پهنه‌ی ۱ (S.1)

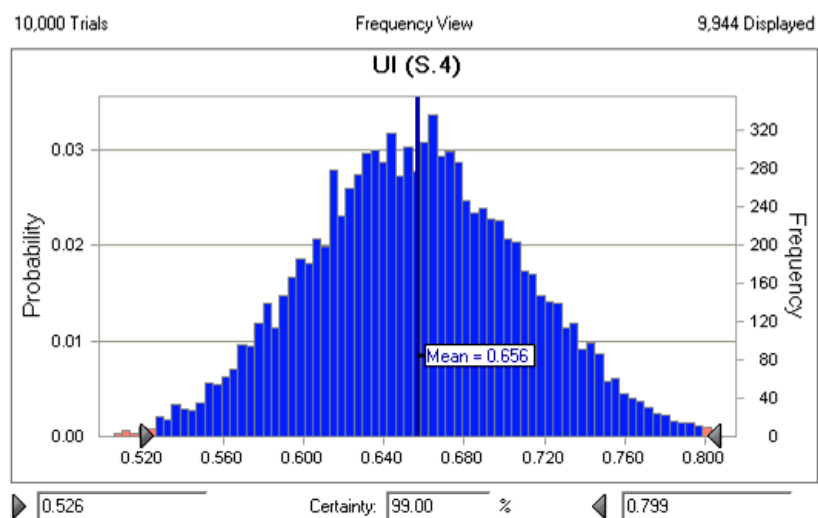


(ب): پهنه‌ی ۲ (S.2)

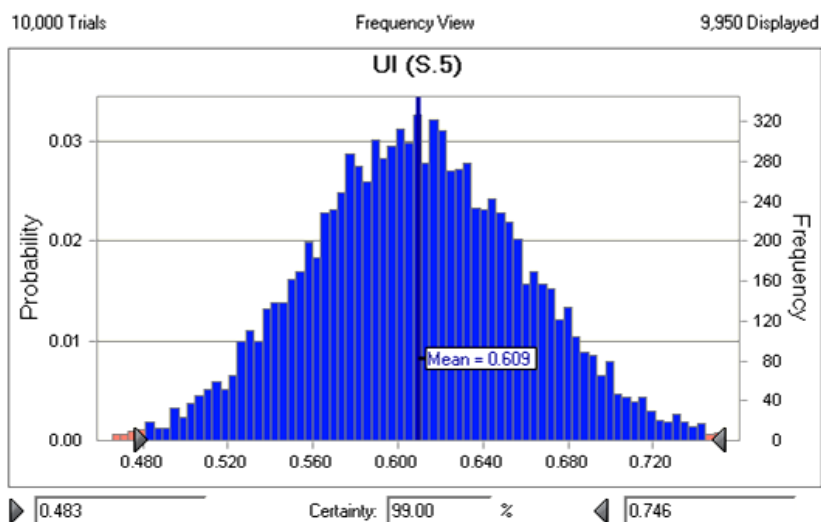
<sup>۱</sup>به این منظور نرم افزار Crystal Ball 7.3.1 که بر اساس روش مونت کارلو طراحی شده مورد استفاده قرار گرفته است.



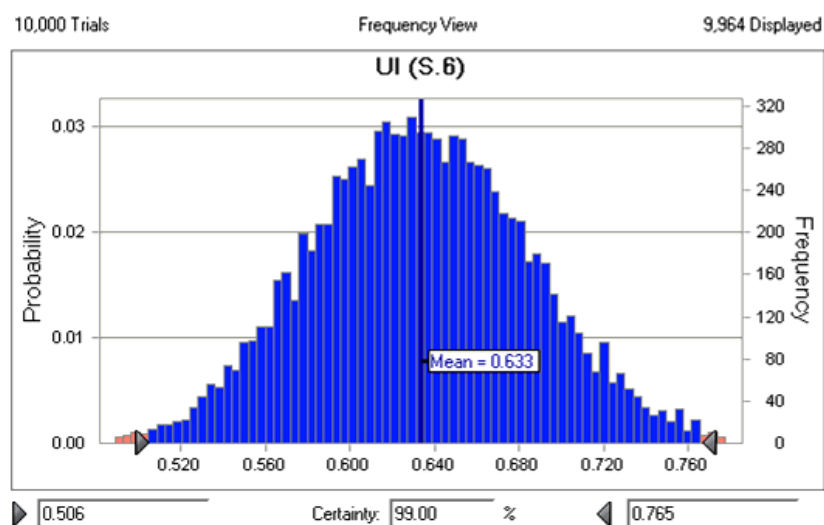
(ج): پهله‌ی ۳ (S.3)



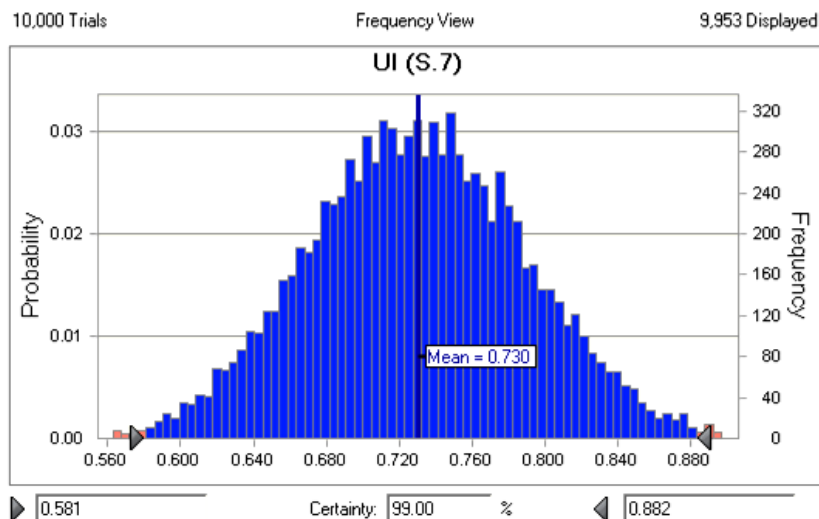
(د): پهله‌ی ۴ (S.4)



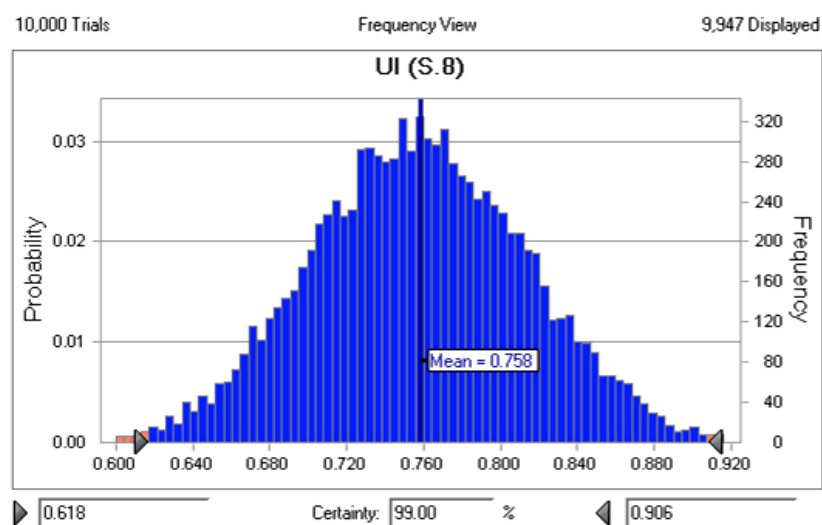
(ه): پهله‌ی ۵ (S.5)



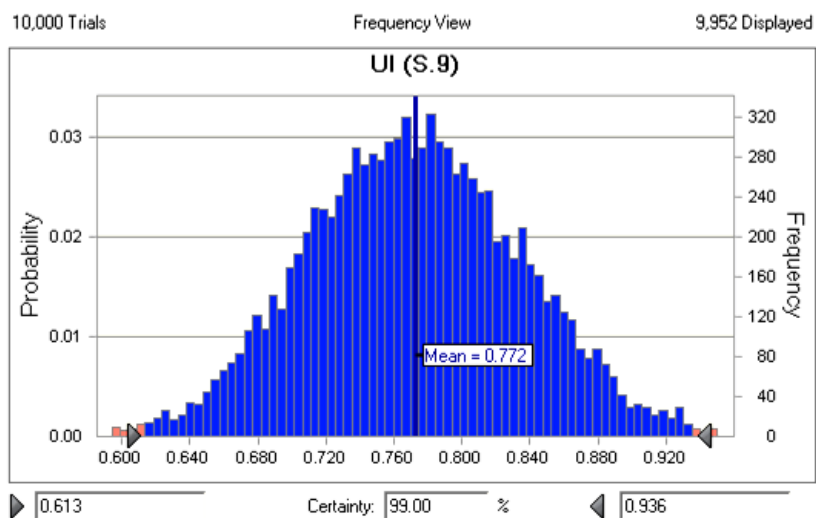
(و): پهله‌ی ۶ (S.6)



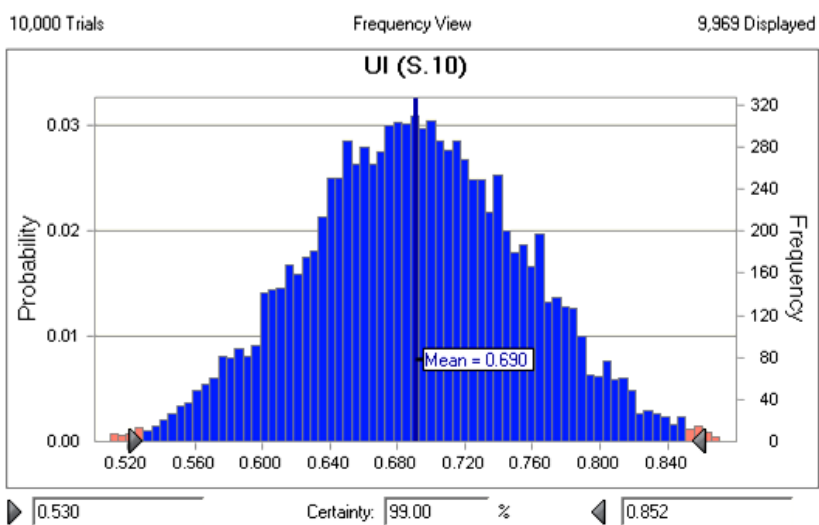
(ز): پهنه‌ی ۷ (S.7)



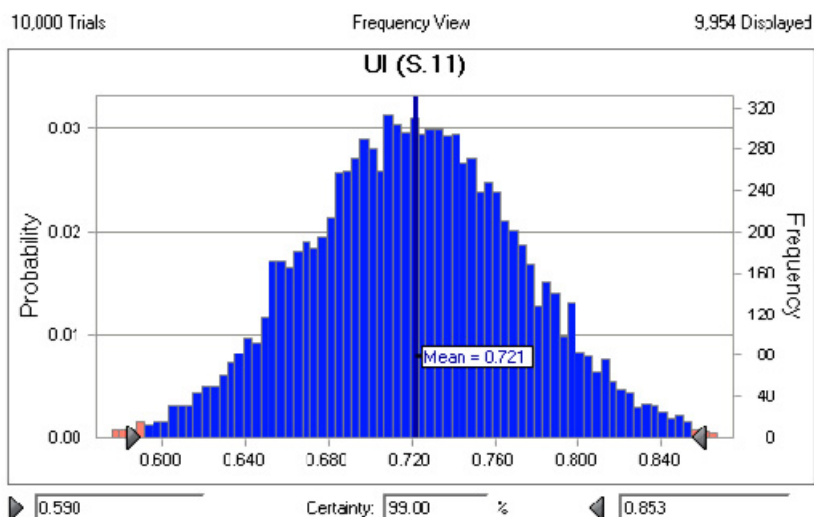
(ح): پهنه‌ی ۸ (S.8)



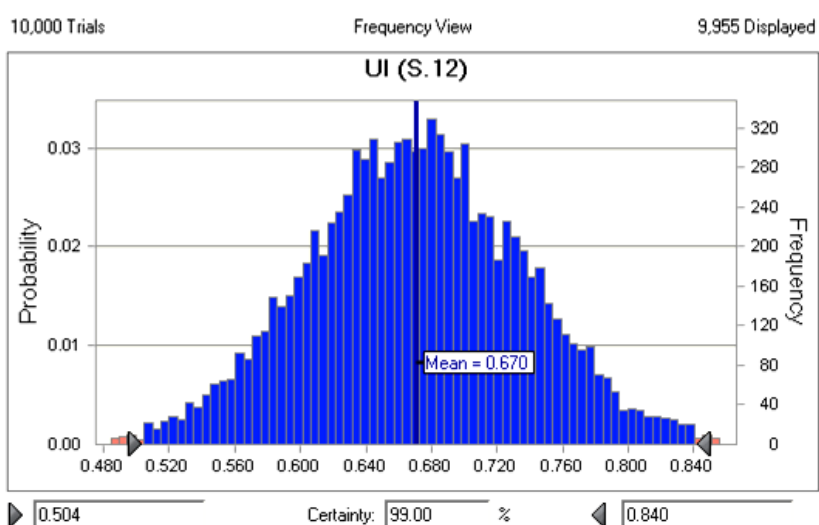
(ط): پهنه‌ی ۹ (S.9)



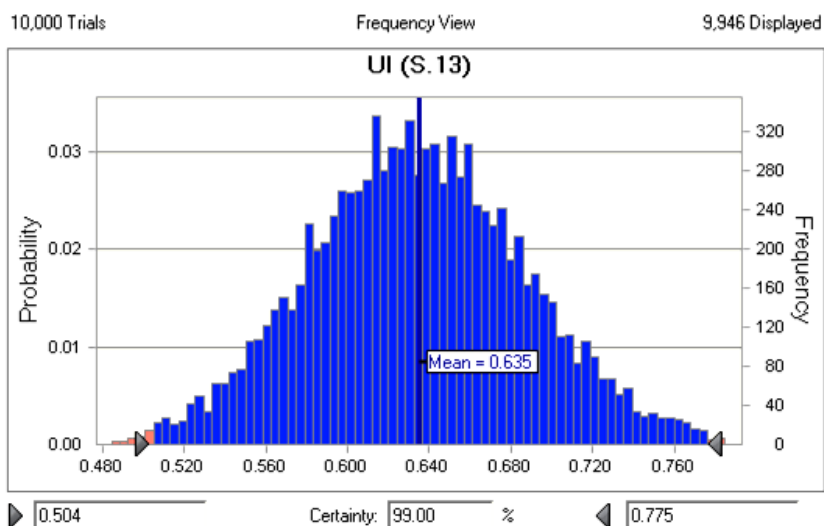
(ی): پهنه‌ی ۱۰ (S.10)



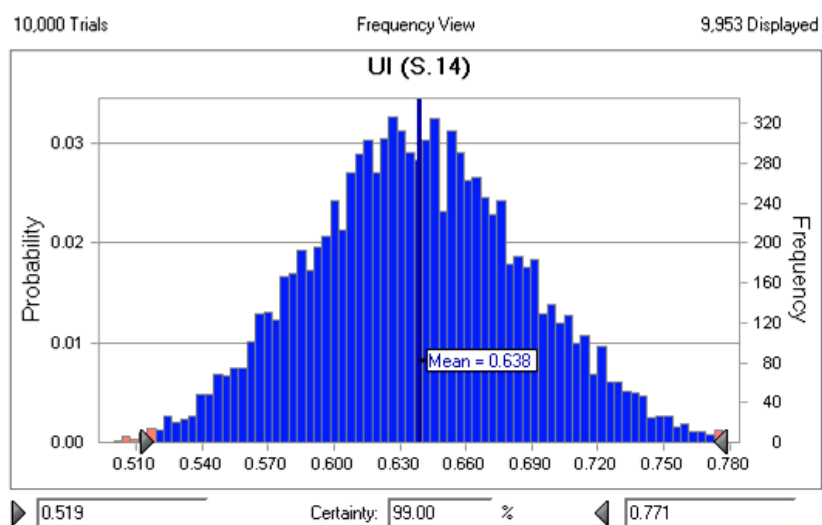
(ک): پهنه‌ی ۱۱ (S.11)



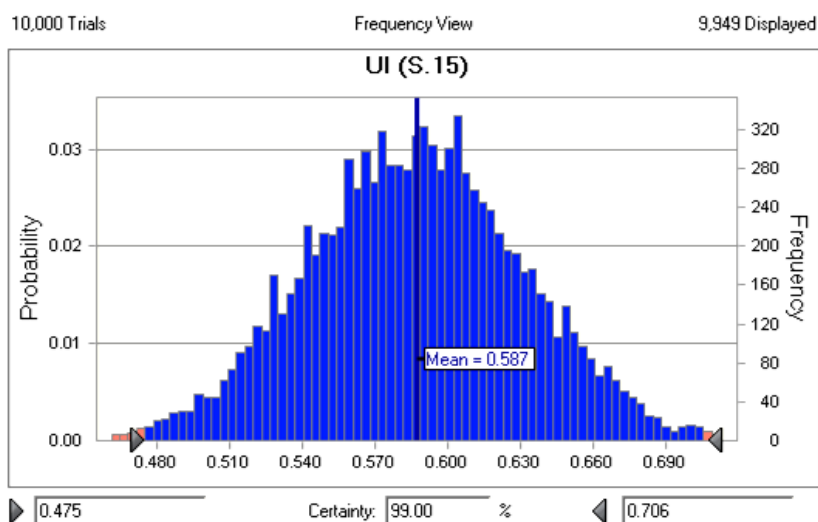
(ل): پهنه‌ی ۱۲ (S.12)



(م): پهندی ۱۳ (S.13)



(ن): پهندی ۱۴ (S.14)



(س): پهنه‌ی ۱۵ (S.15)

شکل ۵-۳۱- توزیع احتمال شاخص بهره‌وری (UI) حاصل از روش مونت کارلو به همراه مقادیر متوسط برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل، (الف تا س)

پارامترهای آماری حاصل از مدل‌سازی احتمالاتی برای محاسبه‌ی شاخص بهره‌وری، در جدول ۵-۸ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این جدول شامل میانگین، میانه، مد، انحراف معیار، واریانس، حداقل و حداکثر UI برای هر یک از پهنه‌های مسیر تونل است. در هر بار اجرای روش مونت کارلو (۱۰۰۰۰ بار نمونه‌گیری تصادفی) برای محاسبه‌ی UI، این پارامترهای آماری تقریباً ثابت می‌ماند.

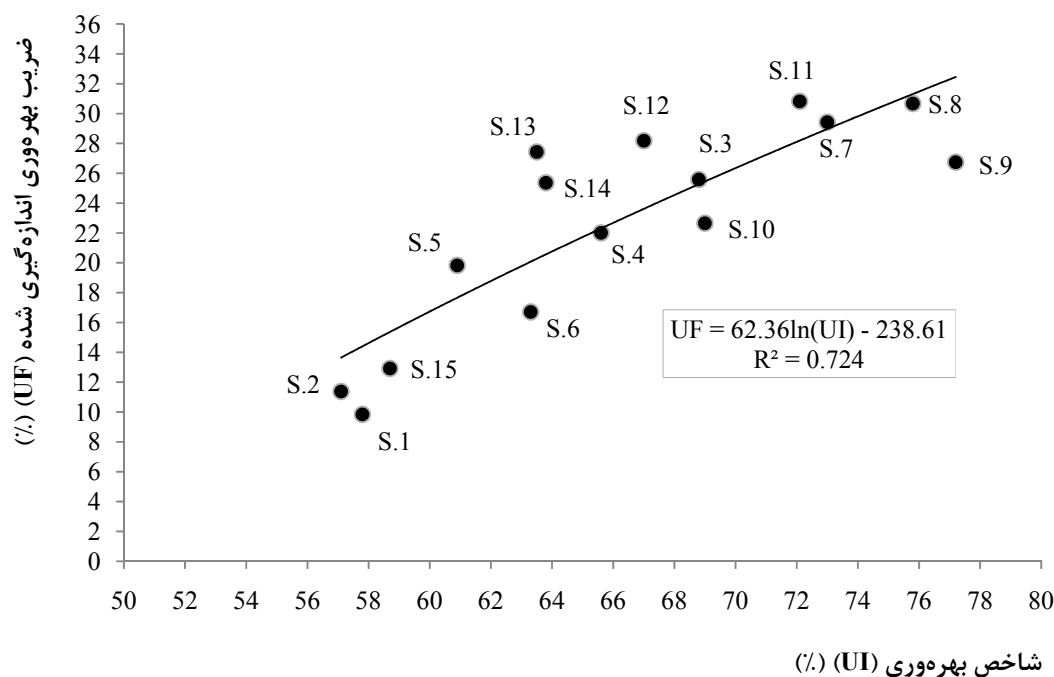
همان‌طور که اشاره شد، هرچه شرایط کارکرد TBM در یک پهنه مناسب‌تر باشد، شاخص بهره‌وری برای آن پهنه بیشتر است. علت این امر نحوه‌ی امتیازبندی عوامل است که در فصل قبل ارائه گردید.



جدول ۵-۸- پارامترهای آماری حاصل از مدل‌سازی احتمالاتی شاخص بهره‌وری برای پهنه‌های مسیر تونل

شاخص بهره‌وری (UI)							پهنه
حداکثر	حداقل	واریانس	انحراف معیار	مد	میانه	میانگین	
۰/۷۶۸	۰/۳۹۱	۰/۰۰۲	۰/۰۴۶	۰/۵۴۶	۰/۵۷۷	۰/۵۷۸	۱ (S.1)
۰/۹۰۰	۰/۳۱۷	۰/۰۰۷	۰/۰۸۱	۰/۵۶۹	۰/۵۷۰	۰/۵۷۱	۲ (S.2)
۰/۹۱۷	۰/۴۸۱	۰/۰۰۳	۰/۰۵۶	۰/۶۶۱	۰/۶۸۷	۰/۶۸۸	۳ (S.3)
۰/۸۷۱	۰/۴۷۷	۰/۰۰۳	۰/۰۵۴	۰/۶۲۰	۰/۶۵۵	۰/۶۵۶	۴ (S.4)
۰/۸۰۳	۰/۴۳۳	۰/۰۰۳	۰/۰۵۱	۰/۵۹۲	۰/۶۰۸	۰/۶۰۹	۵ (S.5)
۰/۸۴۵	۰/۴۶۰	۰/۰۰۳	۰/۰۵۲	۰/۶۳۸	۰/۶۳۳	۰/۶۳۳	۶ (S.6)
۰/۹۴۰	۰/۵۱۷	۰/۰۰۴	۰/۰۶۰	۰/۷۱۲	۰/۷۲۹	۰/۷۳۰	۷ (S.7)
۰/۹۶۹	۰/۵۴۳	۰/۰۰۳	۰/۰۵۶	۰/۷۶۲	۰/۷۵۸	۰/۷۵۸	۸ (S.8)
۰/۹۸۹	۰/۵۳۴	۰/۰۰۴	۰/۰۶۳	۰/۷۶۹	۰/۷۷۱	۰/۷۷۲	۹ (S.9)
۰/۹۵۱	۰/۴۲۷	۰/۰۰۴	۰/۰۶۵	۰/۶۴۱	۰/۶۸۹	۰/۶۹۰	۱۰ (S.10)
۰/۹۱۳	۰/۵۴۳	۰/۰۰۳	۰/۰۵۲	۰/۷۱۴	۰/۷۱۹	۰/۷۲۱	۱۱ (S.11)
۰/۹۲۳	۰/۴۲۴	۰/۰۰۴	۰/۰۶۶	۰/۶۷۳	۰/۶۷۰	۰/۶۷۰	۱۲ (S.12)
۰/۸۸۷	۰/۴۳۱	۰/۰۰۳	۰/۰۵۳	۰/۶۴۶	۰/۶۳۴	۰/۶۳۵	۱۳ (S.13)
۰/۸۳۴	۰/۴۵۹	۰/۰۰۲	۰/۰۵۰	۰/۶۳۱	۰/۶۳۹	۰/۶۳۸	۱۴ (S.14)
۰/۷۵۵	۰/۴۳۱	۰/۰۰۲	۰/۰۴۴	۰/۵۹۰	۰/۵۸۷	۰/۵۸۷	۱۵ (S.15)

به منظور بدست آوردن رابطه‌ای برای تخمین ضریب بهره‌وری بر اساس شاخص بهره‌وری در پروژه‌ی قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران، از مقادیر میانگین شاخص بهره‌وری (جدول ۵-۸) و ضرایب بهره‌وری که در فصل قبل (جدول ۴-۱) ارائه گردید استفاده می‌شود. جدول ۴-۱ نشان‌دهنده‌ی ضرایب بهره‌وری واقعی بر اساس روزهای کاری برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل است. نحوه‌ی ارتباط بین شاخص بهره‌وری (UI) و ضریب بهره‌وری (UF) در پروژه‌ی مورد مطالعه در شکل ۵-۳۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۲- ارتباط بین شاخص بهره‌وری و ضریب بهره‌وری در پهنه‌های مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی متروی تهران  
 نقاط ارایه شده در دستگاه مختصات شکل ۵-۳۲، مربوط به ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل است. بهترین  
 رگرسیون برای بیان ارتباط بین UI و UF، معادله‌ی لگاریتمی (۵-۳) با ضریب تعیین  $R^2 = 0.724$  بوده  
 که در شکل نیز نشان داده شده است.

$$UF = 62.36 \ln(UI) - 238.61 \quad (۵-۳)$$

در این رابطه، UF ضریب بهره‌وری و UI شاخص بهره‌وری است. با استفاده از این رابطه می‌توان  
 ضریب بهره‌وری TBM پروژه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران را برای ادامه‌ی مسیر آن برآورد نمود.

<sup>1</sup> Coefficient of determination

#### ۴-۵- اعتبارسنجی

مقادیر ضریب بهره‌وری با استفاده از رابطه‌ی (۵-۳) برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر پیش‌بینی شده است (جدول ۵-۹). به منظور اعتبارسنجی پژوهش حاضر، مقادیر ضریب بهره‌وری اندازه‌گیری‌شده‌ی واقعی با مقادیر پیش‌بینی شده در یک دستگاه مختصات ترسیم شده است (شکل ۵-۳۳).

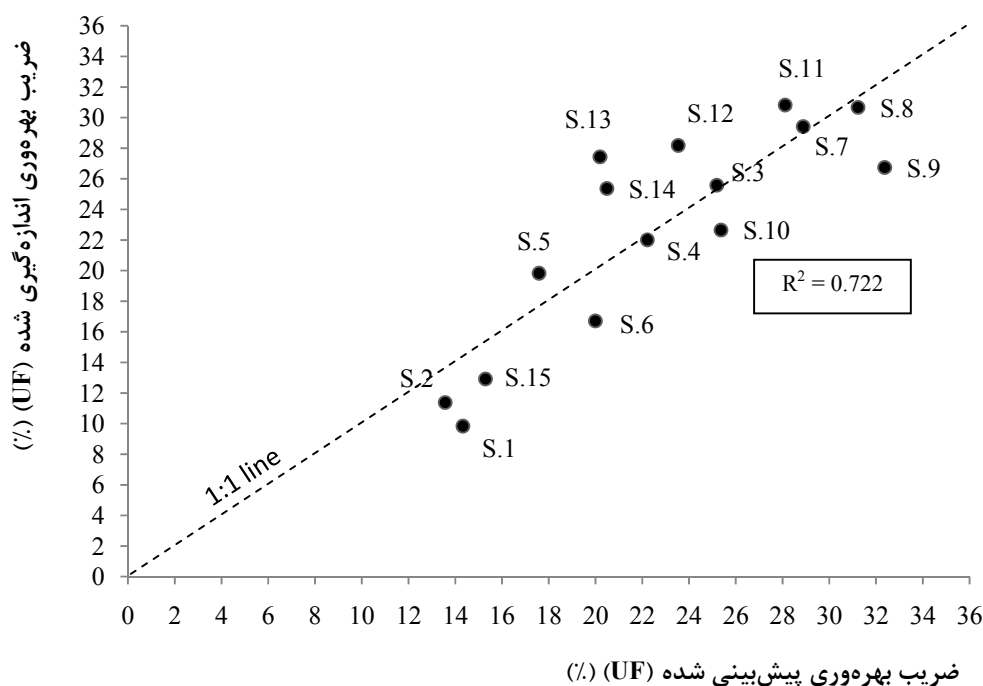
جدول ۵-۹- مقادیر شاخص بهره‌وری و ضریب بهره‌وری پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (واقعی) برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی متروی تهران

پهنه	شاخص بهره‌وری	ضریب بهره‌وری پیش‌بینی شده	ضریب بهره‌وری اندازه‌گیری شده (واقعی)
۱ (S.1)	۵۷/۸	۱۴/۳۳	۹/۸۴
۲ (S.2)	۵۷/۱	۱۳/۵۷	۱۱/۳۸
۳ (S.3)	۶۸/۸	۲۵/۱۹	۲۵/۵۸
۴ (S.4)	۶۵/۶	۲۲/۲۲	۲۲/۰۱
۵ (S.5)	۶۰/۹	۱۷/۵۸	۱۹/۸۳
۶ (S.6)	۶۳/۳	۱۹/۹۹	۱۶/۷۱
۷ (S.7)	۷۳/۰	۲۸/۸۸	۲۹/۴۲
۸ (S.8)	۷۵/۸	۳۱/۲۳	۳۰/۶۷
۹ (S.9)	۷۷/۲	۳۲/۳۷	۲۶/۷۴
۱۰ (S.10)	۶۹/۰	۲۵/۳۷	۲۲/۶۵
۱۱ (S.11)	۷۲/۱	۲۸/۱۱	۳۰/۸۲
۱۲ (S.12)	۶۷/۰	۲۳/۵۴	۲۸/۱۸
۱۳ (S.13)	۶۳/۵	۲۰/۱۹	۲۷/۴۳
۱۴ (S.14)	۶۳/۸	۲۰/۴۸	۲۵/۳۷
۱۵ (S.15)	۵۸/۷	۱۵/۲۹	۱۲/۹۲

همان‌طور که در شکل ۵-۳۳ ملاحظه می‌شود، ضریب تعیین آن‌ها در حالت یک به یک،

$R^2=0/722$  است که به طور قطع نشان‌دهنده‌ی همبستگی مناسبی میان مقادیر پیش‌بینی شده و

اندازه‌گیری شده‌ی ضریب بهره‌وری است. این موضوع به خوبی نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ تا چه حد در پیش‌بینی ضریب بهره‌وری ماشین حفار تمام مقطع در طول مسیر موفق عمل کند.



شکل ۵-۳۳- مقایسه‌ی مقادیر ضریب بهره‌وری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی متروی تهران

## ۵-۵- جمع‌بندی

در این فصل به ارزیابی رابطه‌ی برای تخمین ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم 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 بهره‌وری (UI) برای ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران محاسبه شد.

مقادیر متوسط شاخص بهره‌وری و ضریب بهره‌وری محاسبه شده مربوط به ۱۵ پهنه‌ی مسیر تونل، در یک دستگاه مختصات ترسیم و ارتباط بین آن‌ها برآورد گردید. بهترین رگرسیون این نقاط، معادله‌ی لگاریتمی با ضریب تعیین  $R^2 = 0.724$  است. با محاسبه‌ی شاخص بهره‌وری (UI) و استفاده از معادله‌ی لگاریتمی مذکور، می‌توان برای ادامه‌ی مسیر تونل مورد مطالعه ضریب بهره‌وری (UF) را برآورد کرد. برای اعتبارسنجی پژوهش، مقادیر ضریب بهره‌وری با استفاده از رابطه‌ی لگاریتمی به دست آمده برای هر یک از پهنه‌های مسیر محاسبه شده و در یک دستگاه مختصات با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی واقعی مقایسه شده است. نتایج این مقایسه، ضریب تعیین  $R^2 = 0.722$  را نشان می‌دهد که مقدار قابل قبولی است.

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

## فصل هشتم

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

## ۶-۱- جمع‌بندی

مطالعات متعددی در رابطه با بهره‌وری TBM در محیط‌های سنگی انجام شده است؛ با این حال بهره‌وری این دستگاه در محیط‌های خاکی و نرم کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در پایان‌نامه‌ی حاضر به تحقیق در مورد بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم و به ویژه محیط‌های شهری پرداخته شد. مطالعه‌ی موردی این تحقیق، پروژه‌ی قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران بوده است.

با توجه به این که مقادیر عوامل موثر بر بهره‌وری TBM (مانند دانه‌بندی خاک و غیره) همواره با عدم قطعیت همراه بوده و از طرفی وزن هر یک از عوامل در مساله به طور کاملاً دقیق و قطعی مشخص نیست، در این پژوهش با روش احتمالی به حل مساله پرداخته شد. به این منظور توزیع احتمال مقادیر عوامل در طول مسیر مشخص گردید. همچنین با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)، وزن عوامل موثر در مساله به صورت احتمالی تعیین شد. با بهره‌گیری از روش مدل‌سازی احتمالاتی

مونت کارلو و تلفیق وزن و مقادیر عوامل، شاخص بهره‌وری (UI) برای TBM در هر یک از پهنه‌های مسیر تونل مورد مطالعه برآورد گردید. این شاخص نیز به صورت احتمالی بوده که از مقادیر متوسط آن در مراحل بعدی استفاده شده است. با محاسبه‌ی ضریب بهره‌وری (UF) هر یک از پهنه‌های مسیر با استفاده از زمان‌های پروژه و مقایسه‌ی آن‌ها با شاخص بهره‌وری متناظر، رابطه‌ای برای تخمین ضریب بهره‌وری در ادامه‌ی مسیر تونل به دست آمد.

همان‌طور که در فصل اول نیز بیان شد، نوآوری‌های پایان‌نامه‌ی حاضر شامل موارد ذیل است:

- تحقیق در مورد ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم،
- بهره‌گیری از روش کدگذاری PESQ برای تشکیل ماتریس اندرکنش در رویکرد RES،
- تولید شاخص احتمالی (شاخص بهره‌وری) از مقادیر و وزن‌های احتمالی عوامل به کمک رویکرد RES.

## ۶-۲- نتایج

از نتایج اصلی این پژوهش می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود.

**تعیین شدت تاثیر عوامل موثر بر بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم:** ۱۴ عامل موثر بر ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت. وزن این عوامل در مساله‌ی حاضر به صورت کلی تعیین شده است و محدود به مطالعه‌ی موردی خط ۷ متروی تهران نمی‌شود. بنابراین از نتایج این بخش می‌توان در موارد مشابه استفاده نمود.

عملاً بهینه‌سازی تمامی عوامل برای شرایط کارکرد ایده‌آل TBM امکان‌پذیر نیست. با نگاه ویژه به عواملی که تاثیر بیشتری بر بهره‌وری TBM دارند، می‌توان شرایط بهتری برای حفاری TBM فراهم نمود.



در بین این عوامل، دانه‌بندی و ساینده‌گی خاک به ترتیب بیشترین و کم‌ترین تاثیرگذاری را در مساله‌ی حاضر دارند. با توجه به این که دانه‌بندی عامل ذاتی خاک است، با بهسازی زمین می‌توان شرایط مناسب‌تری برای این عامل و در نتیجه حفاری TBM فراهم کرد. عامل فشار زمین و شیب تونل نیز به ترتیب دارای بیشترین و کم‌ترین تاثیرپذیری هستند. عوامل سینه‌کار مختلط و شیب تونل به ترتیب بیشترین و کم‌ترین اندرکنش را در سیستم دارند. بنابراین بایستی نگاه ویژه به عامل سینه‌کار مختلط داشت. شرایط این عامل نیز با بهسازی زمین قابل ارتقا است.

#### برآورد ضریب بهره‌وری TBM در زمین‌های نرم: برای کاهش خطاهای ناشی از عدم قطعیت

مقادیر عوامل و وزن آن‌ها، و همین‌طور به منظور اهمیت دادن بیشتر به نظرات کارشناسان مختلف (و در نتیجه کاهش خطاهای قضاوت مهندسی در تعیین وزن عوامل)، از روش احتمالاتی در پژوهش حاضر استفاده شده است. با بهره‌گیری از رویکرد RES، شاخص بهره‌وری برای پهنه‌های مسیر تونل مورد مطالعه برآورد شد. نهایتاً با مقایسه‌ی متناظر این شاخص و ضریب بهره‌وری محاسبه شده از زمان‌های پروژه، رابطه‌ای با ضریب تعیین  $R^2 = 0/724$  برای تخمین ضریب بهره‌وری TBM در ادامه‌ی مسیر تونل حاصل شد. به منظور محاسبه‌ی ضریب بهره‌وری در ادامه‌ی مسیر تونل، کافی است مقادیر عوامل در پهنه‌های دلخواه ادامه‌ی مسیر تعیین و از روی آن‌ها شاخص بهره‌وری (UI) برآورد گردد؛ لذا با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده می‌توان ضریب بهره‌وری (UF) را تعیین نمود. برای اعتبارسنجی پژوهش حاضر، مقادیر ضریب بهره‌وری با استفاده از رابطه‌ی لگاریتمی به دست آمده برای هر یک از پهنه‌های مسیر محاسبه شده و در یک دستگاه مختصات با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی واقعی در حالت یک به یک مقایسه شده است. نتایج این مقایسه، ضریب تعیین  $R^2 = 0/722$  را نشان می‌دهد که همبستگی مناسبی است.

مدل ارایه شده در این مساله برای پروژه‌های مشابه (حفاری تونل با TBM در زمین نرم) نیز قابل استفاده است. همان‌طور که اشاره شد، وزن عوامل به صورت کلی (و نه خاص پژوهش حاضر) تعیین شده است. با استفاده از وزن عوامل که در این پژوهش محاسبه شده است و تعیین مقادیر عوامل در پروژه‌ی مشابه، شاخص بهره‌وری تعیین می‌گردد. سپس با مقایسه‌ی این شاخص و ضریب بهره‌وری پهنه‌ای از طول مسیر آن تونل، رابطه‌ای حاصل می‌شود. این امر به این خاطر است که شرایط هر پروژه (مانند عوامل ژئوتکنیکی) متفاوت بوده و در رابطه‌ی نهایی تعیین ضریب بهره‌وری تاثیرگذار است.

منابع

## منابع فارسی

- حسینی، م. ۱۳۹۰. تونل‌های شهری، راهکاری مطمئن در توسعه‌ی پایدار. نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، ۱۰ تا ۱۲ آبان ماه، تهران، ایران، ص: ۹۹-۱۱۰.
- دوروسنی، ژ.، بیشون، ج. ۱۳۷۰. روش تفکر سیستمی. (ترجمه‌ی امیرحسین جهانگللو)، پیشبرد، انتشارات مفهرس، ص: ۳۴.
- مهندسین مشاور ساحل. ۱۳۸۸. خدمات مهندسی پروژه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران، قطعه‌ی شرقی - غربی، روش اجرای حفاری مکانیزه. تهران.
- مهندسین مشاور ساحل. ۱۳۸۹. مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مسیر تونل (قطعه‌ی شرقی - غربی). تهران.

## منابع لاتین

Ali K.M., Hasan K. 2002. Rock mass Characterization to indicate slope instability in Bandarban: a rock engineering systems approach. *Environmental and Engineering Geoscience* 8(2):105-119.

Allenby B.R. 1999. Industrial ecology-policy framework and implementation. *Complex Systems and Risks, Costs and Benefits*, Chapters 9 and 10, pp. 132-162.

Anderiux P., Hadjigeorgiou J. 2008. The destressability index methodology for the assessment of the likelihood of success of a large-scale confined destress blast in an underground mine pillar. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 45(3):407-421.

Anonymous, 2005. Closed face tunnelling machines and ground stability, A guideline for best practice, British Tunnelling Society—Institution of Civil Engineers, Thomas Telford Publishing.

ASCE, 1958. Progress report on glossary of terms and definitions in soil mechanics. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Proceedings of the ASCE, v. 84, no. SM4, part 1, pp. 1-43.

Avila R., Moberg L. 1999. A systematic approach to the migration of <sup>137</sup>Cs in forest ecosystems using interaction matrices. *Environmental Radioactivity* 45:271-282.

Barton, N., 2000. *TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock*. Balkema, Brookfield, p. 173.

Bell, F. G., 2000, *Engineering Properties of Soils and Socks*: Blackwell Science Ltd., Oxford, 482 p.

Benardos A.G., Kaliampakos D.C. 2004. A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunneling- Illustrated by the Athens Metro, Greece. *International Journal*

of Rock Mechanics and Mining Sciences 41(6):987-999.

Bendz D., Flyhammer P., Hartlen J., Elert M. 2005. Leaching from residues used in road constructions- a system analysis. In: The Handbook of Environmental Chemistry Vol. 5F, Springer Berlin: Heidelberg, pp. 293-320.

Bertalanffy L.V. 1968. General system theory- foundations, development, applications. George Braziller Publisher, NY, 295 p.

Blindheim, O.T., 1979. Boreability predictions for tunnelling. Ph.D. Thesis. Department of geological engineering. The Norwegian Institute of Technology, p. 406.

BTS, 2005. Closed-Face Tunnelling Machines and Ground Stability. British Tunnelling Society (Closed-Face Working Group) in association with the Institution of Civil engineers, Thomas Telford Publishing, London, 77 p.

Budetta P., Santo A., Vivencio F. 2008. Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach. *Geomorphology* 94:340-352.

Castaldini D., Genevois R., Panizza M., Puccinelli A., Berti M., Simoni A. 1998. An integrated approach for analyzing earthquake-induced surface effects: a case study from the Northern Apennins, Italy. *Journal of Geodynamics* 26(2-4):413-441.

Ceryan N., Ceryan S. 2008. 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* 67(3):375-385.

Condor J., Asghari K. 2009. An Alternative Theoretical Methodology for Monitoring the Risks of CO2 Leakage from Wellbores. *Energy Procedia* 1:2599-2605.

DAUB, 1997. Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines. *Tunnel*, Val. 5(97), pp. 20-35.

- 
- DAUB, 2010. Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen. DIN 18196. p. 44.
- Davies J.P., Clarke B.A., Ockleston G.O., Whiter J.T., Cunningham R.J. 1999. Application of interaction matrices to the problem of sewer collapse. In: Proceedings of the 11th European Sewage and Refuse Symposium, Liquid Wastes Section, Munich, pp. 11.
- Den, J. 1982. Control problem of grey system. *System and Control Letters* 1(15): 228-294.
- De Pippo T., Donadio C., Pennetta M., Petrosino C., Terlizzi F., Valente A. 2008. Coastal hazard assessment and mapping in Northern Campania, Italy. *Geomorphology* 97:451-466.
- Faramarzi, F., Ebrahimi Farsangi, M.A., and Mansouri, H., 2012: An RES-based model for risk assessment and prediction of backbreak in benching blasting, *Rock Mechanics and Mining Engineering*.
- Ferentinou, M. Hasiotis. Th. Sakellariou. M. 2012. Application of computational intelligence tools for the analysis of marine geotechnical properties in the head of Zakynthos canyon, Greece. *Computers & Geosciences Journal*. pp. 166-174.
- Ferentinou M., Hasiotis T., Sakellariou M. 2011. Application of computational intelligence tools for the analysis of marine geotechnical properties in the head of Zakynthos canyon, Greece. *Computers & Geosciences*, DOI 10.1016/j.cageo.2011.06.022.
- Ferentinou M., 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. *Advances in Natural and Technological Hazards Research* 28(I):43-54.
- Ferentinou M., Sakellariou M. 2007. Computational intelligence tools for the prediction of slope performance. *Computers and Geotechnics* 34:362-384.

GEODATA, S. P. A., 1995. Review of alternative construction methods and feasibility of proposed methods for constructing Attiko Metro Extension of Line 3 to Egaleo: Attiko Metro S.A., pp. 191–193.

Hill J.D., Warfield J.N. 1972. Unified program planning. In: Sage A.P. (ed.) System Engineering: Methodology and Applications, IEEE Press, New York, NY.

Hudson J.A. 1992. Rock Engineering Systems, Theory and Practice. Ellis Horwood Ltd, Chichester, 185 p.

Hudson J.A., Harrison J.P. 1992. A new approach to studying complete rock engineering problems. Quarterly Journal of Engineering Geology 25:93-105.

Hudson J.A., Sheng J., Arnold P.N. 1992. Rock engineering risk assessment through critical mechanism and parameters evaluation. In: Proceedings of the 6th Australia- New Zealand Conference on Geomechanics, Christchurch: NZGS, pp. 442-447.

ITA, 2001. Guide lines for selecting TBMs for Soft Ground. ITA Working Group No.14 Mechanized Tunneling, Japan and Norway.

Jiao Y. 1995. Formalizing the systems approach to rock engineering. PhD Thesis, Imperial College, University of London, 326 p.

Jiao Y., Hudson J.A. 1995. The fully-coupled model for rock engineering systems. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 32(5):491-512.

Kalamaras, G.S., 1997: A computer-based system for supporting decision for tunneling in rock under condition of uncertainty, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Volume 34, Number 3-4.

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 36:41-55.

Lu P., Latham J-P. 1994. A continuous quantitative coding approach to the interaction



matrix in rock engineering systems based on grey systems approaches. In: Proceedings of the 7th International Congress of IAEG. Balkema, Rotterdam, pp. 4761-4770.

Maidl, B., Herrenknecht, M., Anheuser, L., 1996. Mechanised Shield Tunneling, Ernst & Sohn, Berlin.

Malkawi A.I.Husein , Hassan W.F., Abdulla F.A. 2000. “Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability” , Structural Safety; 22 : 161-187.

Marinos, P. G., Novack, M., Benissi, M., Panteliadou, M., Papouli, D., Stoumpos, G., Marinos, V., and Korkaris, K., 2008. Ground Information and Selection of TBM for the Thessaloniki Metro, Greece. Environmental & Engineering Geoscience, Vol. XIV (1), pp. 17–30.

Marinos, P. G., Novack, M., Benissi, M., Stoumpos, G., Papouli, D., Panteliadou, M Marinos, V., Boronkay, K., Korkaris, K., 2009. Assessment of ground conditions with respect to mechanized tunnelling for the construction of extension of the Athens Metro to the city of Piraeus. Bull. Eng. Geol. Environ., Vol. 68, pp. 17-26.

Martinotto A., Langmaack L., 2007. Toulouse Metro Lot 2: soil conditioning in difficult ground conditions. ITA-AITES 2007 World Tunnel Congress (WTC), Prague. May.

Matthews M., Lloyd B.J. 1998. The river test catchment surveillance project. South Water Utilities Final Research Report. Department of Civil Engineering, University of Surrey, UK, 101 p.

Mavroulidou M., Hughes S.J., Hellowell E.E. 2004. A qualitative tool combining an interaction matrix and a GIS, to map vulnerability to traffic induced air pollution. Journal of Environmental Management 70(4):283-289.

Mavroulidou M., Hughes S.J., Hellowell E.E. 2005. The development of a GIS-based tool for urban air quality assessment. In: Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes, Greece, 6 p.

Mavroulidou M., Hughes S.J., Hellawell E.E. 2007. Developing the interaction matrix technique as a tool assessing the impact of traffic on air quality. *Journal of Environmental Management* 84:513-522.

Mazzoccola D.F., Hudson J.A. 1996. A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 29:37-56.

Nelson, P.P., O' Rourke, T.D., 1983. Tunnel boring machine performance in sedimentary rocks, Report to Goldberg-Zoino Associates of New York, P.C., by School of Civil and Environmental of Civil Engineering. Cornell University, Ithaca, NY, p. 438.

Nilsen, B., Dahl, F., Holzhaeuser, J., Raleigh, P., 2007. New Test Methodology for Estimating the Abrasiveness of Soils for TBM Tunneling. Rapid excavation and tunneling conference (RETC), In: Traylor, M.T., Townsend, J.W. (Ed.), Toronto, Canada, pp 104-116.

Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., Raleigh, P., 2006. Abrasivity of soils in TBM tunneling. *Tunnels & Tunneling International*, March 2006, 36–38.

Normalisation Française P18-579. 1990. Granulats: Essai d'abrasivité et de broyabilité. Paris: AFNOR Association française de normalisation.

Ozdemir, L., 1977. Development of theoretical equations for predicting tunnel borability. Ph.D. Thesis, T-1969, Colorado School of Mines, Golden, CO, USA.

Plinninger, R.J., Restner, U., 2008. Abrasiveness Testing, Quo Vadis? – A Commented Overview of Abrasiveness Testing Methods. *Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 1(1), pp. 61-70.

Rapoport A. 1968. General system theory- essential concept and application. Abacus Press, Cambridge.

---

Rostami, J., Ozdemir L., 1993. A new model for performance prediction of hard rock TBM. In: Bowerman, L.D. et al. (Eds.), Proceedings of RETC, Boston, MA, pp. 793-809.

Rostami, J. 2010. Lecture on Mechanical Mining and Excavation Workshop, Lecture # 20, Utilization, Iran.

Rozos D, Tsagaratos P, Markantonis K, Skias S 2006. An application of rock engineering system (RES) method for ranking the instability potential of natural slopes in Achaia County, Greece. In: Proceedings of the XIth International Congress of the Society for Mathematical Geology, University of Liege, Belgium, S08-10

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* 63:49-63.

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.

Sass, I., Burbaum, U., 2009. A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines. *Bull Eng Geol Environ*, Vol. 64 (1), pp. 27-64.

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):375-387.

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* 37:839-853.

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 46:1072-1087.

Skagius K., Wiborgh M., Strom A., Moren 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 176:155-162.

Smith G.J. 1994. The engineering geological assessment of shallow mine workings with particular reference to chalk. PhD Dissertation, University of London.

Tarigh Azali, S., Ghafoori, M., Lashkaripour, Gh, R., Hassanpour, J. 2013. "Engineering geological investigations of mechanized tunneling in soft ground: A case study, East–West lot of line 7, Tehran Metro, Iran". Engineering Geology, Article in press.

Tarkoy, P.J., 1975. Rock hardness index properties and geotechnical parameters for predicting tunnel boring machine performance. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, p. 326.

Thewes, M., 1999. Adhasion von Tonboden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden. Berichte aus Grundbau und Bodenmechanik der Bergischen Universität Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich Bauingenieurwesen, Band 21, Wuppertal, Shaker Verlag Aachen.

Thewes, M., Burger, W., 2004. Clogging risks for TBM drives in clay. Tunnels & Tunnelling International, June, pp 28–31.

Thuro, K., Käsling, H., 2009. Classification of the abrasiveness of soil and rock. Geomechanics and Tunnelling 2(2), pp 179-188.

Thuro, K., Plinninger, R. J., 2003. Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavatability. In: Handley, M., Stacey, D. (Eds): Proc. 10th ISRM Int. Congr., pp. 1227-1234. Johannesburg.

---

Thuro, K., Singer, J., Käsling, H. & Bauer, M., 2006. Soil abrasiveness assessment using the LCPC testing device. *Felsbau*, Vol. 24, pp. 37–45.

Thuro, K., Singer, J., Käsling, H. & Bauer, M., 2007. Determining abrasiveness with the LCPC Test. *Proceedings of the 1st Canada– U.S. Rock Mechanics Symposium*, Vancouver B.C.

Van Dorp F., Egan M., Kessler J.H., Nilsson S., Pinedo P., Smith G., Torres, C. 1999. Biosphere modeling for the assessment of radioactive waste repositories; the development of a common basis by the BIOMOVs II reference biospheres working group. *Environmental Radioactivity* 42:225-236.

Wassmer, L., Treceno, O., Andreossi, E., Re, S., 2001. *Tunnel Boring Machine (TBM) Applications in Soft Ground Conditions*.

WG “Research”. 2007. *ITA/AITES Report 2006 on Settlements induced by tunneling in Soft Ground, Tunnelling and Underground Space Technology* 22 : 119–149.

Wittke, W. 2007. “Stability analysis and design for mechanized tunnelling”. WBI Co., Aachen: Germany, 563 p.

Yagız, S. 2006. TBM performance prediction based on rock properties. In: Cotthem et al. (Eds.), *EUROCK’ 06–Multiphysics Coupling and Long Term Behavior in Rock Mechanics*, pp. 663-670.

Yagız, 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 . Ph.D thesis, Department of Mining and Earth Systems Engineering, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, p. 289 (unpublished).

Yang Y., Rosenbaum M.S. 2001. Artificial neural networks linked to GIS for determining sedimentology in harbours. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 29:213-220.

---

Yang Y., Zhang Q. 1998. The application of artificial neural networks to rock engineering system (RES). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 35(6):727-745.

Zare Naghadehi, M., Jimenz, R., Khalokakaie, R., and Jalali, S.M.E., 2011: A probabilistic systems methodology to analyze the importance of factors affecting the stability of rock slopes, *Engineering Geology* 118, 82-92.

Zhang L.Q., Yang Z.F., Liao Q.L., Chen J. 2004. An application of the rock engineering systems (RES) methodology in rockfall hazard assessment on the Chengdu-Lhasa highway, China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(3):833-838.

## **Abstract**

Due to the population growth and the urban transport problems, the need for the use of rail transport is growing rapidly. Today, underground structures, particularly tunnels play an important role in the development of urban transport. Tunnel boring machines (TBMs) are widely utilized in urban areas that are usually composed of alluvial lands. The efficiency of TBM is one of the most important factors in feasibility studies of tunneling projects. TBM utilization factor is defined as the percentage of time that the system spends for drilling. There are issues affecting the soft ground tunneling operation including geotechnical parameters, design parameters etc. The current paper mainly discusses the TBM utilization in soft ground tunneling with a case study in East-West part of Tehran Metro Line 7. The rock engineering systems (RES) approach is utilized in this study to interpret the interactions between the pairs of parameters influencing the whole system. In order to do this, a probabilistic coding method (PESQ) is employed and finally a utilization index is developed to calculate the utilization along the tunnel path of studied tunnel. The results were compared with real utilization values of the project, which showed a good logarithmic correlation with coefficient of 0.724.

**Keywords:** TBM utilization; Soft ground; Rock engineering systems (RES); Interaction matrix; Tehran metro line 7.



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

**Estimation of TBM Utilization in Soft Ground Using Rock  
Engineering Systems Approach**

**Emad Khorasani**

Supervisors:

**Dr. Seyed-Mohammad Esmail Jalali**  
**Dr. Shokrollah Zare**

Advisors:

**Dr. Masoud Zare**  
**Dr. Sadegh Tarigh Azali**

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Science (M.Sc.)  
in  
Rock Mechanics**

**September 2013**