تعیین ضخامت شاتکریت بر اساس آنالیز ریسک احتمال پایه عدم قطعیت­های ژئوتکنیکی (مطالعه موردی: تونل راه‌آهن دورود - خرم‌آباد)

علی رازانی1، فرهاد صمیمی نمین2، آرش رفاهی3

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه زنجان، پست الکترونيکی ali.razani9595@gmail.com

2- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان، پست الکترونيکی f.samiminamin@znu.ac.ir

3- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان، پست الکترونيکیrefahi.arash@znu.ac.ir

به علت طبیعت ناهمگون مصالح زمین و فقدان اطلاعات اولیه کامل طراحی، پروژه­های‌ تونل‌سازی با ریسک‌ ناپایداری یا هزینه اضافی نگهداری سنگین­تر مواجه می­باشند. هدف از این تحقیق، تعیین ضخامت سیستم نگهداری شاتکریت، بر اساس عدم قطعیت موجود در داده­های اطلاعاتی طبقه­بندی مهندسی سنگ، مدول یانگ، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، فاصله‌داری درزه و شیب درزه می باشد. مورد مطالعاتی تونل راه‌آهن دورود - خرم‌آباد در نظر گرفته شده است. با این هدف، سناریوهای مختلفی با پاشش شاتکریت به ضخامت­های 60، 70، 80، 90، 100، 110، 120میلیمتری در نظر گرفته و برای هر یک فاکتور ایمنی محاسبه شد. اساس انتخاب سناریوها بازدید محلی و طبقه بندی مهندسی توده سنگ در کلاس IV بوده است. ملاک انتخاب سناریو مناسب، تحلیل قابلیت اطمینان و بکارگیری تلفیق روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و المان مجزا می باشد. در این روش هزینه‌های مورد نیاز برای نصب سیستم نگهداری و هزینه‌های مورد انتظار ناشی از خسارت و احتمال شکست هر سناریو تعیین می­شود. در نهایت ریسک هر سناریو از مجموع هزینه‌های مورد انتظار خسارت و هزینه‌ پیمانکاری احداث تونل محاسبه و سناریو با کمترین ریسک به عنوان سناریو مناسب انتخاب می گردد. پس از اجرای مدل اعمال عدم قطعیت در مقطعی از تونل با اعمال عدم قطعیت­های ژئومکانیکی، ضخامت 80 میلیمتری شاتکریت با سطح اطمینان %95 به عنوان سناریو مناسب معرفی گردید. سپس عدم قطعیت مربوط به پارامترهای هندسی درزه بررسی گردید که منجر به انتخاب مجدد ضخامت 80 میلیمتری شاتکریت گردید، که طبیعتا افزایش تعداد پارامترهای همراه با عدم قطعیت باعث انتخابی با ریسک کمتر شده است.

***واژه‌هاي کليدي:*** ضخامت شاتکریت، آنالیز ریسک، عدم قطعیت ژئومکانیکی، تونل راه‌آهن دورود- خرم‌آباد

# مقدمه

ناهمگونی توده‌سنگ و اطلاعات محدود حاصل از آزمایش‌های صحرایی و یا تست‌های آزمایشگاهی باعث می‌شود که اطلاعات طراحی همراه با عدم قطعیت باشند. پروژه‌های تونل‌زنی بخاطر شرایط ویژه‌ی زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی که دارند سطحی از عدم قطعیت را دارا می‌باشند. در مهندسی فضاهای زیرزمینی، منابع و حوادث ریسک عموما ناشی از عدم قطعیت ژئوتکنیکی یا خطاها می باشند. اگر سیستم نگهداری مناسب طراحی نشود باعث وقوع مخاطرات غیرمنتظره‌ای مانند زیان اقتصادی در اثر نگهداری بیش از حد یا کاهش پایداری تونل می‌شود. مدیریت ریسک فرآیند سامان‌یافته شناسایی، تجزیه و تحلیل ریسک و پاسخ به ریسک‌های پروژه به منظور بیشینه‌سازی نتایج و وقایع مثبت و حداقل کردن احتمال وقوع یا اثر پیامدهای منفی بر اهداف پروژه است. فرآیند مدیریت ریسک شامل شش مرحله برنامه‌ریزی مدیریت ریسک، شناسایی ریسک، تجزیه تحلیل کیفی ریسک، تجزیه تحلیل کمی ریسک، برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک و کنترل و بازبینی ریسک می باشد]1[. ارزیابی ریسک به روش‌های احتمالاتی به علت سادگی و پاسخ سریع به مقدار زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مسائل پایداری اساس روش‌های تحلیل احتمالاتی، تحلیل آماری داده‌های ژئوتکنیکی، تعیین پارامترهای اولیه آماری (میانگین و انحراف از معیار) و ترسیم تابع چگالی احتمال بر روی داده ها است. با توجه به تابع چگالی احتمال پارامترهای متغیر ژئوتکنیکی در تحلیل پایداری، می‌توان این متغیرها را به صورت تصادفی نیز ایجاد کرد. تابع چگالی احتمال نشان‌گر بهترین تخمین بر داده‌های تصادفی است و انحراف معیار یا ضریب تغییرات تابع چگالی عدم قطعیت را نشان می‌دهد]2[.

در پژوهشی که توسط ژو و همکارانش انجام شد، روشی برای بررسی عدم قطعیت پایداری سقف در تونل‌های مستطیلی شکل پیشنهاد شده است که در آن اعتبار سنجی نتایج به کمک روش مونت‌کارلو انجام می شود]3[. یانگ و همکاران روش تجزیه و تحلیل پایداری مبتنی بر قابلیت اطمینان برای پایداری سقف تونل های عمیق در سنگ لایه‌ای ارائه دادند. در این مدل با توجه به تنش و فشار وارد سیستم نگهداری و با فرض تصادفی بودن پارامترهای ژئوتکنیکی، شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی برای ارزیابی پایداری سقف تونل استفاده می شود]4[. همرونی و همکارانش به منظور محاسبه شاخص قابلیت اطمینان یک تونل مدور حفر شده در زمین نرم، از قابلیت اطمینان استفاده و برای بهینه‌سازی شاخص اطمینان از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند]5[.

ارزیابی ریسک یکی از پایه­های مدیریت ریسک می­باشد که با توجه به ماهیت نامطمئن در داده­های پروژه‌های تونل‌سازی و لزوم صرف بهینه‌ی منابع، از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف از ارزیابی ریسک، اندازه‌گیری ریسک‌ها بر اساس شاخص‌های مختلفی است که نشانگر عدم قطعیت از جمله تاثیر و احتمال وقوع مخاطرات می باشد. فاکتور ایمنی برای توصیف قابلیت اعتماد در سازه‌ها مورد استفاده قرار می گیرد و می‌تواند پاسخگوی عدم قطعیت موجود در پارامترهای مورد نیاز برای سازه‌های ژئوتکنیکی مانند تونل را با اعمال بیشترین اندیس قابلیت اطمینان تا حد زیادی باشد. انتخاب سیستم نگهداری مناسب یک گام اساسی در موفقیت پروژه تونل‌زنی است. سیستم‌های نگهداری سنگین اگرچه از پایداری بالایی برخوردار هستند اما رویکرد اقتصادی پروژه را با مشکل روبه‌رو می‌کند. بنابراین، سیستم نگهداری علاوه بر این‌که باید از پایداری مناسب برخوردار باشد باید از لحاظ اقتصادی نیز شرایط مناسبی داشته باشد. هدف اصلی این مقاله ارائه الگوی آنالیز ریسک احتمال پایه عدم قطعیت پارامترهای طبقه بندی توده سنگ RMR، مدول یانگ، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، فاصله‌داری درزه و شیب درزه در تعیین ضخامت شاتکریت می باشد. در ادامه مقاله ابتدا مشخصات مورد مطالعاتی ارائه و پس از ارائه مدل، نتایج و یافته­ها تشریح خواهد شد.

# تونل راه‌آهن دورود- خرم‌آباد

مسیر راه‌آهن دورود- خرم‌آباد از حاشیه زون زاگرس مرتفع و سنندج - سیرجان شروع شده و با عبور از میان زاگرس مرتفع در بخش انتهایی مسیر وارد زاگرس چین‌خورده می‌شود. مورد مطالعاتی یکی از تونل­های را‌ه‌آهن درود – خرم آباد واقع در در استان لرستان می­باشد. این تونل با نام تونل 81 شناخته شده و در ناحیه‌ی کوهستانی واقع شده است. بخش عمده مسیر که شامل تونل مورد مطالعه نیز می‌شود، درون زون زاگرس مرتفع قرار دارد. محور راه‌آهن در حدود کیلومتر 83 وارد این تونل که دارای امتداد شمال غربی- جنوب شرقی است، می‌شود. طول تونل مورد مطالعه یک کیلومتر می­باشد. علی­الرغم کوهستانی بودن منطقه، ورودی و خروجی تونل در محدوده هایی با شیب توپوگرافی نسبتا ملایمی قرار گرفته است]6[. تونل از نظر تقسیمات زمین‌ساختی در ناحیه‌ زاگرس مرتفع، واقع شده است. موقعیت ساختگاه تونل و نقشه وضعیت واحدهای زمین‌شناسی محدوده ساختگاه تونل در شکل 1 نشان داده شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| 4 | 2 |
| ب) نقشه وضعیت واحدهای زمین‌شناسی محدوده ساختگاه تونل | الف) موقعیت ساختگاه تونل |

شکل (1): موقعیت و مشخصات ساختگاهی تونل 81 راه­آهن خرم آباد – درود ]6[

شکل سطح مقطع این تونل نعل اسبی شکل می­باشد. مقطع با ارتفاع روباره 127 متر به عنوان مقطع بحرانی برای مورد مطالعاتی انتخاب شد. لیتولوژی غالب در تونل مورد مطالعه شیل مارنی الوان و گاها کنگلومرا و در اکثر مقاطع یکسان می­باشد. بر اساس چک لیست هزینه‌های اجرایی حفر هر متر تونل 000/000/200 ریال و هزینه‌ی هر سانتی‌متر شاتکریت به ازای هر متر تونل 000/000/230 ریال می­باشد.

# مواد و روش­ها

برای تعیین ضخامت مناسب شاتکریت از خصوصیات طبقه بندی مهندسی سنگ RMR، مدول یانگ (E)، چسبندگی(C)، زاویه اصطکاک داخلی(Ø) به عنوان ورودی اولیه و تولید اعداد تصادفی استفاده می شود. خروجی مدل نیز ضریب ایمنی در نظر گرفته شده است. در بخش ابتدایی این تحقیق صرفا عدم قطعیت‌های این چهار پارامتر در نظر گرفته شده و عملیات ساخت مدل و محاسبه‌ی فاکتور ایمنی بر اساس این پارامترها و خصوصیات واقعی درزه‌ها (که به صورت قطعی در نظر گرفته شده) انجام می‌شود و در سپس در بخش دوم تحقیق عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای هندسی درزه‌ها نیز در نظر گرفته شده و مدلسازی احتمال پایه همانند قسمت قبل انجام می گیرد. مدل احتمال پایه آنالیز ریسک‌ به منظور تعیین ضخامت شاتکریت در اشکال 2 و 3 ارائه شده است.

|  |
| --- |
| 1 |
| شکل (2): فرآیند آنالیز ریسک عدم قطعیت پارامترهای ژئومکانیکی در انتخاب ضخامت شاتکریت |
| 2 |
| شکل (3): فرآیند آنالیز ریسک عدم قطعیت مشخصات دسته درزه ها در تعیین ضخامت شاتکریت |

برای اجرای این مدل نیاز به نرم افزار Minitab16 و محیط المان مجزا UDEC2D می باشد. در این مدل هزینه ساخت و ساز از چک لیست هزینه های پیمانکاری بدست میاید. ریسک نهایی هر سناریو از مجموع هزینه مورد انتظار ناشی از شکست (خسارت) با هزینه احداث بدست می­آید. برای محاسبه هزینه مورد انتظار ناشی از شکست، از رابطه امید ریاضی (رابطه 1) استفاده می­شود. قابلیت اطمینان در این رابطه برای سناریوها با در نظر گرفتن سطح اطمینان 5/1 محاسبه شده است.

(1)

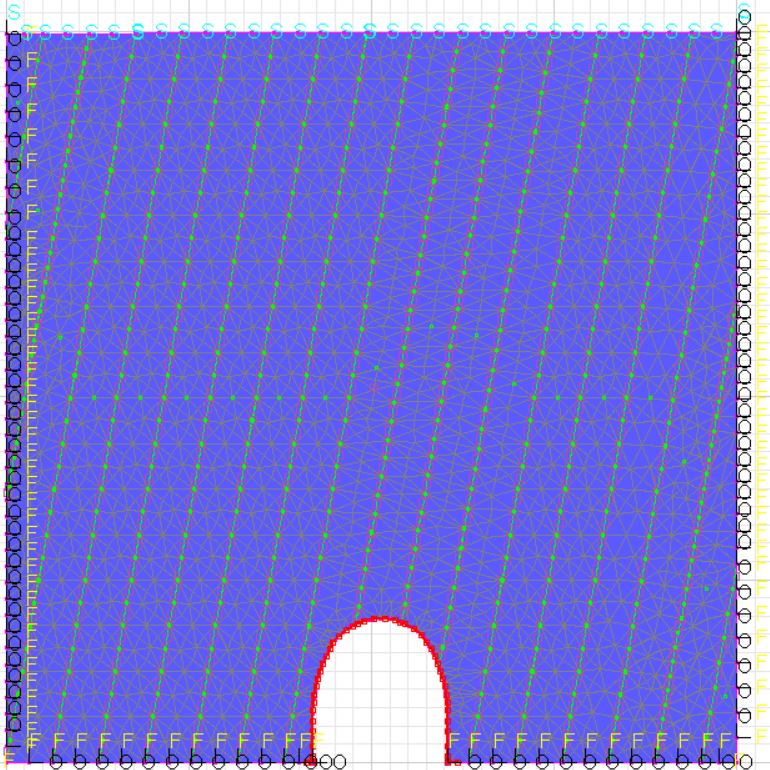
*=* هزینه ی مورد انتظار از شکست

# انتخاب ضخامت شاتکریت تونل درود – خرم آباد

به علت ماهیت همراه با عدم قطعیت پارامترهای زمین مانند RMR، مدول یانگ(E)، چسبندگی(C)، زاویه‌ی اصطکاک داخلی(Ø) و همچنین خصوصیات هندسی درزه یعنی فاصله‌داری و شیب طراحی تونل با ریسک همراه است، که در بخش قبل مدلی برای اعمال این عدم قطعیت­ها ارائه شد. برای اجرای این مدل ابتدا هفت سناریو با ضخامت شاتکریت متفاوت، به ترتیب 60، 70، 80، 90، 100، 110، 120میلیمتری، با توجه به اینکه توده‌سنگ‌ها در RMR کلاس IV قرار داشتند در نظر گرفته می شود. در انتهای اجرای مدل سناریویی که کمترین ریسک را داشته باشد به عنوان ضخامت پیشنهادی شاتکریت معرفی خواهد شد. در قدم اول اطلاعات مشخصات ژئومکانیکی مقطع مورد مطالعه برداشت و با مطالعه آن تابع توزیع شناسایی شد. اطلاعات توزیع جامعه آماری RMR، چسبندگی، مدول یانگ و زاویه اصطکاک داخلی در جدول 1 ارائه شده است. در مرحله‌ی بعدی با توجه به نتایج توزیع‌های آماری پارامترها و با در دست داشتن میانگین و انحراف معیار در نرم افزار Minitab16 برای هر سناریو اقدام به تولید 30 داده‌ی تصادفی شد. سپس با توجه به این 30 داده تصادفی در مورد هر یک از سناریوها در نرم‌افزار UDEC/2D اقدام به شبیه سازی عددی تونل با ضخامت شاتکریت سناریو شده و پس از هر بار اجرای نرم افزار فاکتور ایمنی هر مدل بدست می­آید. در شکل 4 نمونه‌ای از مدل عددی ساخته شده در محیط UDEC/2D نشان داده شده است. در این قسمت مشخصات درزه ها به صورت قطعی و بدون اعمال عدم قطعیت آن محاسبه می شود.

جدول (1): توزیع آماری پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | RMR | | مدول یانگ (GPa) | | زاویه اصطکاک داخلی (درجه) | | چسبندگی (MPa) | |
| نوع توزیع | پارامترهای توزیع | | پارامترهای توزیع | | پارامترهای توزیع | | پارامترهای توزیع | |
| میانگین | انحراف معیار | میانگین | انحراف معیار | میانگین | انحراف معیار | میانگین | انحراف معیار |
| نرمال | 17/33 | 68/3 | 88/3 | 89/0 | 96/20 | 76/3 | 16/0 | 037/0 |



شکل (4): شبیه سازی عددی انجام شده برای سناریوی شاتکریت ضخامت 100 میلیمتر و داده ژئومکانیکی تصادفی شماره 25

در مرحله بعد توزیع آماری ضریب ایمنی­های محاسبه شده بررسی و میانگین و انحراف معیار آن محاسبه می شود. توزیع آماری فاکتور ایمنی سناریوهای تعریف شده در جدول 2 ارائه شده است. نتیجه نهایی آنالیز ریسک با در نظر گرفتن عدم قطعیت بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی به غیر از مشخصات درزه­ها در جدول 3 ارائه شده است. بهترین گزینه در این مرحله سناریوی III با ضخامت 8 سانتی‌متری شاتکریت می‌باشد، چرا که مقدار ریسک و هم هزینه اجرای آن کم می‌باشد.

در مرحله دوم مدل نشان داده در شکل 3 به منظور اعمال عدم قطعیت­های خصوصیات هندسی درزه‌ها یعنی فاصله‌داری و شیب اجرا می­شود. اطلاعات آماری مشخصات هندسی درزه ها و همچنین توزیع آماری ضریب ایمنی های محاسبه شده پس از اجرای نرم افزار UDEC مشابه مرحله قبل در جداول 4 و 5 و نتیجه نهایی آنالیز ریسک در جدول 6 ارائه شده است. با توجه به اینکه در مورد ضخامت‌های V، VI و VII، احتمال شکست به قدری کوچک است که قابل اغماض می باشد، لذا هزینه مورد انتظار از شکست آن­ها را صفر در نظر گرفته و از ارائه آن‌ در جدول 6 صرف نظر شده است. با بررسی نتایج مجددا سناریوی III با ضخامت 8 سانتی‌متری شاتکریت، به عنوان گزینه مناسب معرفی گردید.

جدول (2): توزیع آماری فاکتور ایمنی سناریوهای تعریف شده اعمال عدم قطعیت ژئومکانیکی توده سنگ

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| شماره سناریو | نوع توزیع | میانگین | انحراف معیار | میانه | ضریب تغییرات |
| I | نرمال | 52/0 | 26/0 | 53/0 | 50/0 |
| II | نرمال | 33/1 | 28/0 | 38/1 | 21/0 |
| III | نرمال | 32/2 | 44/0 | 28/2 | 19/0 |
| IV | نرمال | 42/3 | 61/0 | 52/3 | 178/0 |
| V | نرمال | 38/4 | 77/0 | 51/4 | 18/0 |
| VI | نرمال | 33/5 | 91/0 | 56/5 | 18/0 |
| VII | نرمال | 52/6 | 11/1 | 53/6 | 18/0 |

جدول (3) نتایج حاصل از آنالیز ریسک در تونل با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت ژئومکانیکی

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| سناریو | β | Pf (%) | هزینه‌ی ساخت  (1000000\*ریال) | هزینه‌ی مورد انتظار از شکست  (1000000\*ریال) | هزینه ریسک  (1000000\*ریال) |
| I | 60/0 | 891/99 | 6/43383 | 829/16972 | 429/60356 |
| II | 92/0 | 9886/71 | 2/50614 | 481/13923 | 681/64537 |
| III | 66/3 | 07/3 | 8/57844 | 91708/665 | 717/58510 |
| IV | 17/10 | 000812/0 | 4/65075 | 521/19 | 921/65094 |
| V | 27/13 | 000107/0 | 72306 | 824/2 | 824/72308 |
| VI | 99/13 | 0000265674/0 | 6/79536 | 7695/0 | 364/79537 |
| VII | 46/22 | 0000030772/0 | 2/86762 | 0957/0 | 29/86762 |

جدول (4): جدول (1): توزیع آماری پارامترهای هندسی دسته درزه اصلی

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | فاصله‌داری (متر) | | شیب (درجه) | |
| نوع توزیع | پارامترهای توزیع | | پارامترهای توزیع | |
| میانگین | انحراف معیار | میانگین | انحراف معیار |
| نرمال | 4/3 | 1/1 | 4/77 | 5/3 |

جدول (5): توزیع آماری فاکتور ایمنی سناریوها با اعمال عدم قطعیت مشخصات هندسی دسته درزه اصلی

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| سناریو | نوع توزیع | میانگین | انحراف معیار | میانه | ضریب تغییرات |
| I | نرمال | 75/0 | 31/0 | 72/0 | 42/0 |
| II | نرمال | 50/1 | 61/0 | 60/1 | 24/0 |
| III | نرمال | 83/2 | 59/0 | 71/2 | 10/0 |
| IV | نرمال | 71/3 | 36/0 | 67/3 | 09/0 |
| V | نرمال | 75/4 | 40/0 | 80/4 | 18/0 |
| VI | نرمال | 83/5 | 30/0 | 81/5 | 05/0 |
| VII | نرمال | 91/6 | 32/0 | 94/6 | 04/0 |

جدول (6) نتایج حاصل از آنالیز ریسک در تونل با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت مشخصات هندسی دسته درزه اصلی

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| سناریو | β | Pf (%) | هزینه‌ی ساخت (1000000\*ریال) | هزینه‌ی مورد انتظار از شکست (1000000\*ریال) | ریسک نهایی (1000000\*ریال) |
| I | 38/2 | 16/99 | 6/43383 | 793/16848 | 393/60232 |
| II | 33/0 | 86/49 | 2/50614 | 601/9644 | 801/60258 |
| III | 09/2 | 26/1 | 8/57844 | 2407/274 | 041/58119 |
| IV | 12/6 | 04/0 | 4/65075 | 880847/9 | 281/65085 |

# بحث در نتایج

در مرحله اول آنالیز ریسک تعیین ضخامت شاتکریت، سناریو با ضخامت 8 سانتیمتر به دلیل ریسک پایینتر و هزینه اجرای کمتر معرفی شد. با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای هندسی دسته درزه اصلی، دامنه پراکندگی انحراف معیار از رنج 26/0 تا 1/1 به رنج 3/0 تا 61/0 محدودتر می شود. به عبارت دیگر، زمانی که عدم قطعیت پارامترهای هندسی درزه نیز در نظر گرفته می شود، دامنه پراکندگی فاکتورهای ایمنی کمتر می­شود. این امر برای قابلیت اطمینان نیز به علت وابستگی که به انحراف معیار دارد صدق می‌کند. یعنی با افزودن تعداد پارامترهایی که عدم قطعیت آن­ها در نظر گرفته می شود به پاسخ با سطح اطمینان بالاتر بدست می آید. در حالت الف احتمال شکست محاسبه شده حدودا سه برابر حالت ب است که این امر باعث می‌شود برای حالت ب با توجه به این‌که عدم قطعیت خصوصیات هندسی درزه در نظر گرفته شده مقدار ریسک محاسبه شده برای ضخامت شاتکریت کمتر از حالت الف باشد. با در نظر گرفتن عدم قطعیت شرایط درزه ­ها مجددا ضخامت 8 سانتیمتری به عنوان پاسخ نهایی انتخاب می شود. این امر نشان دهنده آن است که ضخامت 8 سانتی‌متری شاتکریت به اندازه­ای پایدار هست که اگر عدم قطعیت‌های خصوصیات هندسی درزه نیز اضافه شود، پایداری مورد نیاز تونل را فراهم نماید.

# نتیجه گیری

در این مقاله مدلی برای اعمال عدم قطعیت های پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ از جمله RMR، مدول یانگ(E)، چسبندگی(C)، زاویه‌ی اصطکاک داخلی(Ø) و همچنین پارامترهای هندسی دسته درزه­ها شامل فاصله‌داری و شیب درزه در طراحی ضخامت شاتکریت ارائه شد. اساس مدل تولید اعداد تصادفی بر اساس مشخصات آماری توزیع اطلاعات اولیه و شبیه سازی عددی در محیط UDEC و محاسبه‌ی فاکتور ایمنی در این نرم افزار می­باشد. در نهایت با رویکرد احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو ریسک هر سناریو محاسبه می­شود. با اجرای مدل در تونل راه­آهن درود خرم آباد بیشترین پایداری مربوط به سناریوی VII یعنی ضخامت 120 میلیمتری شاتکریت بدست آمد، لیکن به علت هزینه‌ای بالای آن صرفنظر گردید. ضخامت‌های 90، 100، 110 میلی‌متری نیز به علت هزینه‌‌ی‌ بالایی که دارند، استفاده از آن‌ها توصیه نشدند. نتیجه آنالیز ریسک با رویکرد احتمالاتی با توجه به هزینه‌ی ساخت و هزینه‌ی مورد انتظار از ریزش و گزینه‌ی مناسب ضخامت 80 میلی‌متری شاتکریت به دلیل ریسک پایین بوده و هزینه ساخت به صرفه‌ای انتخاب شد. با اعمال عدم قطعیت‌های مشخصات هندسی دسته درزه اصلی و محاسبه‌ی ریسک‌های مربوطه مجددا به ضخامت 80 میلی‌متری با مقدار ریسک هزینه‌ی کمتری بدست آمد. لذا این سناریو یک گزینه‌ی جذاب به عنوان سیستم نگهداری است، چرا که علاوه بر این‌که ریسک پایین و شرایط اقتصادی مناسبی دارد با اعمال شرایط درزه‌ها نیز همچنان ضریب ایمنی قابل قبولی خواهد داشت. از آن‌جا که لیتولوژی منطقه تقریبا در تمام طول تونل یکسان می باشد، ضخامت 80 میلیمتری شاتکریت را می‌تواند در کل تونل اعمال نمود.

# 6- مراجع

[1]- Li, S.C., Zhou, Z.Q., Li, L.P., Lin, P., Xu, Z.H. and Shi, S.S. A new quantitative method for risk assessment of geological disasters in underground engineering: Attribute Interval Evaluation Theory (AIET). Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 53, March 2016, Pages 128-139.

[2]- Baecher, G.B., Christian, J.T., 2003, Reliability and Statistics in geotechnical engineering, John Wiley & Sons, P. 605.

[3]- Zhou, X. P., Huang, X. C., Liu, P. F., & Li, T. F. A probabilistic method to analyze collapse failure of shallow rectangular tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018 82, 9-19.

[4]- Yang, X. L., Zhou, T., & Li, W. T. Reliability analysis of tunnel roof in layered Hoek-Brown rock masses. Computers and Geotechnics, 2018, 104, 302-309.

[5]- Hamrouni, A., Dias, D., & Sbartai, B. Probability analysis of shallow circular tunnels in homogeneous soil using the surface response methodology optimized by a genetic algorithm. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86, 22-33.

]6[- گزارش گروه مشاورین هرازراه، قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء(ص)، موسسه‌ی امید پارس، 1393، نقشه‌ی­های زمین‌شناسی مهندسی تونل راه‌آهن دورود-خرم‌آباد