

بهبودسازی احتمالاتی سیستم نگهداری بر مبنای آنالیز ریسک کمی مطالعه‌ی موردی: تونل سد شهریار

ساسان قربانی^{۱*}؛ فرهاد صمیمی‌نمین^۲؛ سید احمد لاجوردی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

۲- استادیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

۳- استادیار؛ گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۴/۲۸؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۸/۲۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2017.844

واژگان کلیدی	چکیده
سیستم نگهداری عدم قطعیت آنالیز قابلیت اعتماد 3DEC ریسک تاگوچی	از مهم‌ترین عوامل موثر در توجیه ایمنی و اقتصادی سازه‌های زیرزمینی، سیستم نگهداری مناسب است. ارائه‌ی روشی برای مقابله با خطاهای مهندسی و تجربه‌ی طراحان در طراحی سیستم نگهداری از چالش‌های اصلی است. حفاری‌های زیرزمینی در محیطی با عدم قطعیت بالا اجرا شده و همواره دارای ریسک بالایی هستند. هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی و مدیریت ریسک سیستم نگهداری تونل انحراف آب سد شهریار با رویکرد احتمالاتی است. در این پژوهش، روش‌های عددی المان مجزا (3DEC) و آنالیز قابلیت اعتماد برای برآورد هزینه‌های مورد انتظار از شکست تونل و از روش تاگوچی با هدف آنالیز حساسیت فاکتورهای دارای عدم قطعیت بر ضرایب ایمنی سیستم نگهداری حاصل از 3DEC استفاده شده است. طبق نتایج حاصل، سیستم نگهداری بهینه شامل پیچ‌سنگ‌های تزریقی به طول ۴ متر به فواصل ۱٫۵ × ۱٫۵ متر همراه ۱۲۰ میلی‌متر شاتکریت با اندیس قابلیت اطمینان، احتمال شکست و ریسک به ترتیب معادل ۲٫۱۱۲٪، ۱٫۷۳۳٪ و ۷۰۸۸۰٫۳۲ دلار در سطح اطمینان ۹۵٪ پیشنهاد می‌شود. همچنین بر اساس آنالیز حساسیت تاگوچی، کاهش و افزایش کیفیت توده‌سنگ بر اساس طبقه‌بندی توده‌سنگ RMR، به ترتیب، باعث افزایش تاثیر پارامترهای فاصله‌داری ناپیوستگی و مدول تغییر شکل‌پذیری بر پایداری تونل خواهند شد.

۱- پیش‌گفتار

در دو دهه‌ی اخیر، افزایش قابل ملاحظه‌ای در تعداد پروژه‌های تونل‌سازی در جهان وجود داشته است. انتخاب سیستم نگهداری بهینه یک گام کلیدی در اجرای موفق پروژه‌های تونل‌سازی و پایدارسازی توده‌سنگ اطراف تونل است (Tajvidi, et al., 2015). در واقع مهم‌ترین عامل موثر بر هزینه و ایمنی حفاری‌های زیرزمینی، سیستم نگهداری است (Kanik, et al., 2015). طبیعت ناهمگن توده‌سنگ و اطلاعات محدود موردنیاز

از آزمایش‌های صحرائی و یا تست‌های آزمایشگاهی باعث می‌شود که اطلاعات طراحی همراه با عدم قطعیت باشند (Isaksson, 2002). بطور خاص پروژه‌های تونل‌سازی در معرض سطح بالایی از عدم قطعیت ناشی از شرایط ژئوتکنیکی زمین‌شناسی می‌باشند (Zhang, et al., 2012). لذا در مهندسی فضاهای زیرزمینی، منابع و حوادث ریسک عموماً ناشی از عدم قطعیت ژئوتکنیکی (epistemic or aleatory) یا خطا (intrinsic or implementary) خواهند بود (Li, et al., 2015). در نتیجه، طراحی نامناسب سیستم‌های نگهداری باعث وقوع ریسک‌های غیرمنتظره‌ای همچون کاهش

نویسندگان در این مقاله به منظور برآورد هزینه‌های ساخت و ساز و شکست تونل، از اطلاعات مربوط به هزینه‌های سیستم‌های نگهداری تونل‌های مشابه قبلی استفاده نموده‌اند که این خود می‌تواند باعث ایجاد خطا در محاسبات مربوط به ریسک گردد. همچنین توزیع‌های مربوط به پارامترهای دارای عدم قطعیت بدون برآوردهای واقعی و تحلیل‌های آمار و احتمالاتی نرمال فرض شده‌اند و میانگین و انحراف معیار واقعی پروژه‌ی مربوطه در دسترس نیستند. در نهایت به منظور تعیین هزینه‌های مورد انتظار از شکست از تابع چگالی احتمال توزیع نرمال استفاده شده که در عمل کاربردی ندارد (You et al., 2005). همچنین مطالعه‌ای در همین چهارچوب توسط لانگ فورد (Langford) و همکاران بوده که در آن یک روش ریسک کمی بر اساس قابلیت اطمینان برای بهینه کردن سیستم نگهداری یک مقطع از تونل ارائه شده است (Connor Langford, et al., 2016). به دلیل اهمیت طراحی مناسب سیستم‌های نگهداری، در این پژوهش یک سیستم نگهداری بهینه با توجه به عدم قطعیت‌های موثر در انتخاب آن برای تونل انحراف آب سد شهریار با استفاده از روش آنالیز ریسک کمی بر مبنای احتمالاتی ارائه شده است که در نهایت بتوان یک سیستم نگهداری ارائه کرد که هم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد و هم جنبه‌های فنی و ایمنی لازم را تامین کند. بر این اساس پارامترهای ناپیوستگی‌ها در دو تحقیق ذکر شده در نظر گرفته نشده‌اند. لذا در این پژوهش علاوه بر پارامترهای توده سنگ، خواص ناپیوستگی شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ناپیوستگی بر اساس تاثیرپذیری از دو پارامتر ضریب ناهمواری درزه‌ها و مقاومت فشاری دیواره‌ی درزه‌ها نیز در تحلیل کمی ریسک با فرآیند بسط داده شده‌ی این پژوهش در نظر گرفته شده‌اند.

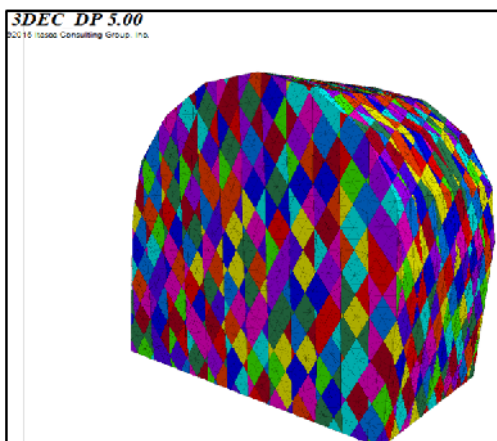
۲- ویژگی‌های سنجی منطقه‌ی مورد مطالعه

سد شهریار بر روی رودخانه‌ی قزل‌اوزن واقع در ۴۰ کیلومتری پایین‌دست شهرستان میانه، در ناحیه‌ی شمال باختری ایران احداث شده است. تونل انحراف آبی در جناح چپ ساختگاه سد به منظور حفاظت ساختگاه سد در برابر سیل، با مقطع D شکل و به قطر ۱۴/۷۰ متر و طول ۵۱۴ متر احداث شده است. مقطع حفاری تونل در شکل ۱ نمایش داده شده است.

پایداری تونل خواهند شد. برای جلوگیری از چنین مشکلاتی، مدیران موظف به اجرای برنامه‌های مدیریت ریسک ایمنی (شناسایی، کنترل و ارزیابی ریسک) در پروژه‌های زیرزمینی هستند (Fouladgar, et al., 2012). بر این اساس، مدیریت ریسک ژئوتکنیکی به عنوان یک موضوع مهم در زمین‌شناسی مهندسی با توجه به افزایش پیچیدگی و مقیاس پروژه‌های ژئوتکنیکی در سال‌های اخیر در حال گسترش است (Connor Langford, et al., 2016).

روش‌های آنالیز مبتنی بر ریسک، سهم قابل توجهی در مدیریت ریسک پروژه‌های مهندسی پیچیده دارند (Qian & Lin, 2016). بر اساس روش‌های کمی، ریسک می‌تواند به عنوان یک مقدار در نظر گرفته شده و بر اساس روابط ریاضی تخمین زده شده و بیان شود (Marhavidas, et al., 2011). بنابراین آنالیز ریسک احتمالاتی، شاید عمده‌ترین روش مورد استفاده در مهندسی سنگ و به طور کلی مهندسی ژئوتکنیک است (Brown, 2012). بنابراین با توجه به این که معیارهای زیادی در انتخاب سیستم نگهداری مناسب هم از نظر فنی و هم از نظر اقتصادی موثر هستند و از طرف دیگر روش‌هایی که برای طراحی نگهداری مورد استفاده قرار می‌گیرند عموماً بر اساس قضاوت‌های مهندسی و تجربه‌ی طراحان انجام می‌گیرد، لذا امکان طراحی یک سیستم نگهداری با شرایط مناسب و بهینه وجود ندارد. بر همین اساس، با استفاده از یک رویکرد کمی ریسک برای پروژه‌های طراحی زیرزمینی، درک بهتری از احتمال نسبی خطرات مختلف که در طول ساخت و ساز با آن مواجه خواهد شد را می‌توان به دست آورد و سیستم نگهداری را از هر دو منظر ایمنی و هزینه بهینه کرد.

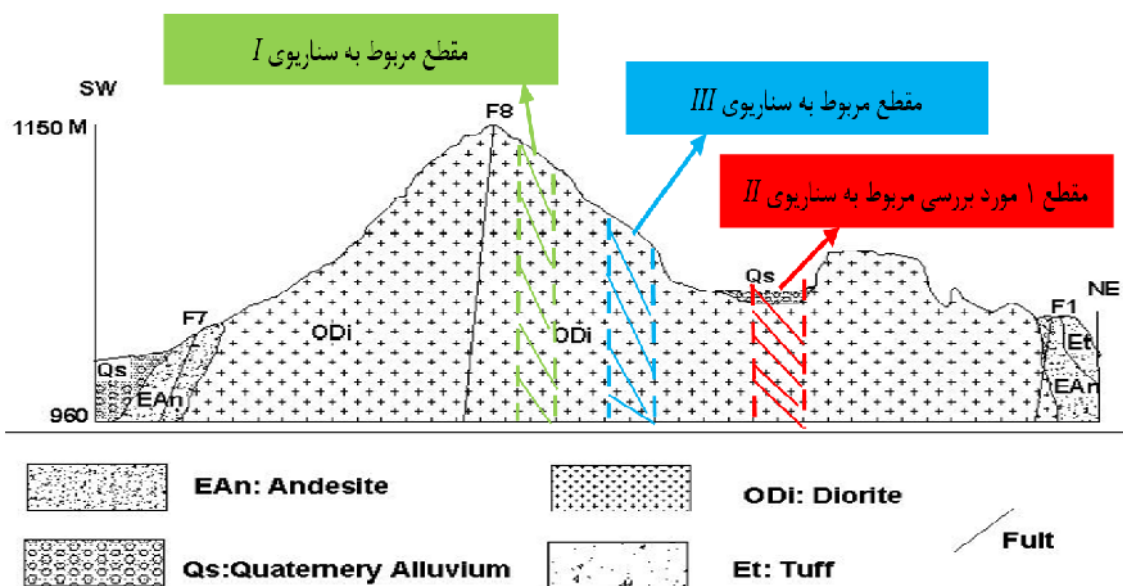
تحقیقات متعددی در زمینه‌ی طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های نگهداری تونل‌ها با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله روش‌های عددی، روش‌های تصمیم‌گیری بر مبنای روش‌های فازی و غیره انجام شده اما مفاهیم بهینه‌سازی سیستم نگهداری تونل، صرفاً بر اساس استفاده از روش آنالیز ریسک کمی کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این زمینه می‌توان به مطالعه‌ی یو (You) و همکاران اشاره کرد که در آن راه‌کاری برای تعیین الگوی بهینه‌ی نگهداری برای طراحی یک تونل بر اساس آنالیز ریسک کمی با تاکید بر اندیس قابلیت اطمینان مناسب معرفی شده است.



شکل ۱- مقطع حفاری تونل انحراف آب سد شهریار

دیوریتی این توده به رنگ سبز تا خاکستری و دارای بافت پورفیری تمام بلورین می‌باشند. مجموعاً کمتر از ۶۰ متر طول تونل در ورودی و خروجی آن در این محدوده قرار گرفته‌اند. بقیه‌ی تونل در توده‌سنگ دیوریتی حفر شده است. در شکل ۲ پروفیل زمین‌شناسی در طول مسیر تونل نشان داده شده است (Mahab Ghodss Consulting Enginners, 2004).

ساختمان سد شهریار از سنگ‌های آتشفشانی سازند کرج به سن ائوسن و توده‌ی دیوریتی و رسوبات کواترنری تشکیل شده است. اجزاء تشکیل دهنده‌ی سازند کرج در محل شامل توف، آگلومرا و آندزیت است. توده‌ی دیوریتی که احتمالاً در دوره‌ی الیگوسن به داخل سازند کرج نفوذ کرده است بخش عمده‌ی طول تونل انحراف را در برمی‌گیرد. سنگ‌های



شکل ۲- پروفیل زمین‌شناسی در طول محور تونل و مقاطع ریسک‌پذیر (Mahab Ghodss Consulting Enginners, 2004)

سطوح درزه (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) نسبت به آن‌ها، تاثیر JRC و JCS ، و در نتیجه C_f و ϕ_f نیز در تعیین سیستم نگهداری تونل سد شهریار مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پارامترهای قطعی توده-سنگ و دسته درزه‌ها در مقطع ۱ در جدول ۱ لیست شده‌اند.

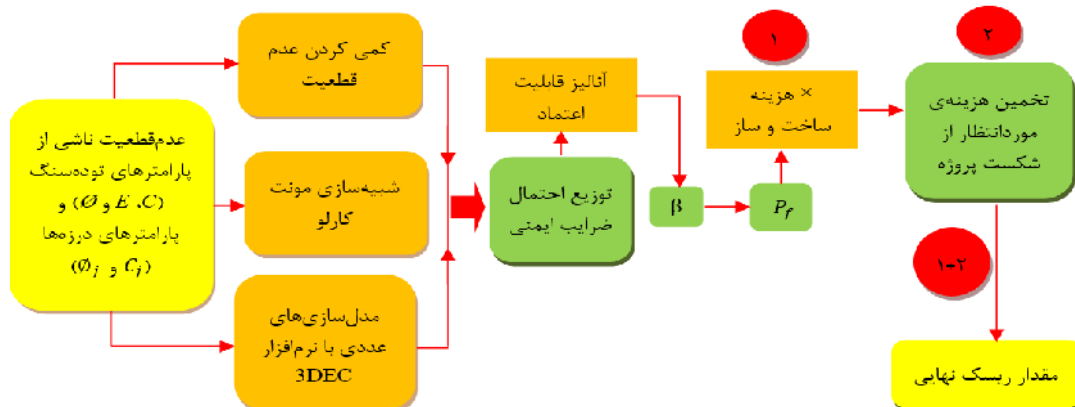
۳- روش‌شناسی پژوهش

به منظور اجرای آنالیز ریسک کمی در این پژوهش، یک رویکرد احتمالاتی بر اساس روش آنالیز قابلیت اعتماد بر مبنای تخمین احتمال شکست به منظور یافتن هزینه‌های موردانتظار از شکست استفاده شده است (شکل ۳). در میان انواع روش‌های قابلیت اعتماد، روش مونت‌کارلو با توجه به سهولت در کاربری و دقت در جواب‌های به دست آمده بیش از سایر روش‌ها استفاده شده است. این روش به دلیل کاربرد ساده‌تر نسبت به روش‌های تحلیل احتمالاتی دیگر، برای تحلیل احتمالاتی و بررسی قابلیت اعتماد مناسب‌تر است (Rabiee vaziri, et al., 2015).

مقطع شماره ۱ در لایه‌ای از توده‌سنگ دیوریت با کلاس طبقه‌بندی III مطابق با سیستم RMR قرار گرفته است که شرایط متوسط زمین را بیان می‌کند. بنابراین سه نوع سناریو (سیستم نگهداری) برای آن مطرح شده‌اند (شکل ۲). به منظور تعیین پارامترهای توده‌سنگ اغلب رفتار قاطعی را نمی‌توان متصور شد، بنابراین عدم قطعیت قابل توجهی برای هر یک از پارامترها وجود خواهد داشت. به همین خاطر، باید این عدم قطعیت‌ها به منظور درک کامل رفتار زمین در برابر توده‌سنگ در نظر گرفته شوند. در تونل سد شهریار در مقطع ۱ در مورد سه خصوصیت اصلی زمین، چسبندگی (C)، مدول تغییر شکل‌پذیری (E) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) عدم قطعیت‌هایی وجود دارد که این خصوصیات برای تخمین هزینه‌ها و به دنبال آن بهینه‌سازی سیستم نگهداری به حساب آورده می‌شوند. همچنین ساختگاه سد شهریار در مقطع ۱ مورد بررسی دارای سه دسته درزه است که در مورد دو مشخصه‌ی درزه-های برداشت شده در محل شامل ضریب زبری درزه (JRC) و مقاومت فشاری درزه (JCS) نیز عدم قطعیت‌هایی وجود دارد. با توجه به عدم قطعیت‌های این دو پارامتر و حساسیت پارامترهای مقاومت برشی

جدول ۱- پارامترهای قطعی توده‌سنگ و دسته درزه‌ها در مسیر مقطع ۱ (Mahab Ghodss Consulting Enginners, 2004)

مقدار	واحد	خصوصیات ناپیوستگی	مقدار	واحد	خصوصیات توده سنگ
۶۰	cm	فاصله‌داری ناپیوستگی	۲۸۰۰	Kg/m^3	وزن مخصوص
<۱	mm	ضخامت پرشدگی	۰٫۲۲	-	ضریب پواسون
کلسیت	-	نوع پرشدگی	۰٫۸	-	ضریب اغتشاش
جهت شیب ۲۴۵	شیب ۶۸	دسته درزه ۱	۱۲۰	MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۱۲۶	۸۵	دسته درزه ۲	۶۰	-	RQD
۳۵	۶۳	دسته درزه ۳	۶۵-۷۰	-	GSI



شکل ۳- فرآیند کلی اجرای آنالیز ریسک کمی

۳-۱- آنالیز قابلیت اعتماد

پارامتری که عموماً برای توصیف قابلیت اعتماد سازه‌ها مورد قبول واقع شده ضریب اطمینان است، که از نسبت مقاومت به بارگذاری به دست می‌آید. ولی با توجه به تغییرات اساسی در مشخصات مصالح، حداقل ضریب اطمینان مقیاس دقیقی نیست. بنابراین پارامتر بهتر، شاخص قابلیت اطمینان می‌باشد که تصادفی بودن ضریب اطمینان را لحاظ می‌کند. برای فاکتور اطمینان بحرانی F_c با تابع چگالی نرمال، میانگین (μ_F) و انحراف معیار (σ_F) ، اندیس قابلیت اطمینان (β) به صورت گزاره‌ی (۱) معرفی می‌شود (Abramson et al., 2002)

$$\beta = \frac{F_c - \mu_F}{\sigma_F} \quad (1)$$

مشکل اساسی آنالیزهای قابلیت اعتماد، تعیین احتمال شکست (گزاره‌ی (۲)) که برابر انتگرال چندگانه‌ی احتمالاتی است، می‌باشد (Wang et al., 2016), (Piric, 2015), (Connor, Johari & Mehrabanilari, 2015), (Langford & Diederichs, 2012). ولی در حالت نرمال بودن تابع چگالی احتمال و خطی بودن تابع پایه، می‌توان با استفاده از P_f β را طبق گزاره‌ی (۳) محاسبه نمود (Peng, 2016), (Zeng, et al., 2016), (Low & Spyridis, 2013), (Goh & Zhang, 2012), (Einstein, 2013).

$$P_f = P(X \in \Omega_F) = \int_{\Omega_F} f_X(X) dX \quad (2)$$

$$\Omega_F = \{X: G(X) \leq 0\}$$

$$P_f = \varphi(-\beta) \rightarrow \beta = -\varphi^{-1}(P_f) \quad (3)$$

در روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد به روش ممان مرتبه‌ی اول، فاصله‌ی نقطه‌ی طراحی (نقطه‌ی با بیشترین احتمال وقوع خرابی) تا مبدا به عنوان شاخص قابلیت اطمینان (β) در نظر گرفته شده و لذا توسط گزاره‌ی (۳) امکان محاسبه‌ی احتمال خرابی سازه (P_f) فراهم می‌شود.

ریسک نهایی محاسبه شده می‌تواند به وسیله‌ی جمع هزینه‌های موردانتظار از خسارت (اقتصادی و یا عوامل محیطی) طبق گزاره‌های (۴) و (۵) مترادف با فاکتور ایمنی و هزینه‌های ساختمان تونل ارزیابی گردد (You et al., 2005).

$$(4) \quad \text{هزینه مورد انتظار از شکست} + \text{هزینه ساختمان} = \text{ریسک}$$

$$(5) \quad \text{ارزش پتانسیل خسارت} \times [P \text{ کارآیی}] = \text{هزینه مورد انتظار شکست}$$

۳-۲- آنالیز حساسیت تاگوچی

در نهایت به منظور بررسی میزان تأثیر مهم‌ترین پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح مسیر تونل بر روی ضرایب ایمنی حاصل از مدل‌سازی‌های عددی، آنالیز حساسیتی با رویکرد طراحی آزمایش (DOE) بر مبنای روش تاگوچی اجرا گردید. در طراحی آزمایشات به روش تاگوچی با ایجاد تغییرات هدفمند و همزمان در فاکتورهای موثر بر یک سیستم و بررسی به وجود آمده در خروجی، درک وسیعی از چگونگی اثر این عوامل بر پاسخ به دست می‌آید. شناسایی فاکتور دارای نسبت (S/N) بالا، کاهنده‌ی اثرات فاکتورهای مخرب خواهد بود (Joshanghari, et al., 2015). نسبت‌های (S/N) برای پاسخ به عبارت "هرچه بزرگتر، بهتر" به صورت گزاره‌ی (۶)

محاسبه می‌شود (Simsec & Uygunoglu, 2016)

$$n_{ij} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{y_{ijk}^2} \right] \quad (6)$$

۳-۳- مدل سازی عددی

روش المان مجزا (DEM) بهتر از روش‌های المان محدود (FEM)، المان مرزی (BEM) و تفاضل محدود (FDM) به منظور آنالیز حفاری‌های زیرزمینی در توده‌سنگ‌های درزه‌دار می‌باشد (Kulatilake, et al, 2013). در این پژوهش از نرم‌افزار 3DEC (Itasca Consulting Group, 2013) که یک برنامه‌ی عددی سه بعدی بر اساس روش المان مجزا است، به منظور به دست آوردن ضرایب ایمنی تونل استفاده شده است. این نرم‌افزار می‌تواند پاسخ مکانیکی محیط‌های ناپیوسته که در معرض بارهای استاتیکی یا دینامیکی قرار دارند را شبیه‌سازی کند. نرم‌افزار 3DEC بر اساس محاسبات لاگرانژی استوار است که برای مدل‌سازی جابجایی‌های بزرگ و سیستم‌های بلوکی تغییرشکل‌پذیر مناسب است.

برای اجرای یک مدل توسط این نرم‌افزار، باید سه جزء اساسی از مساله تعیین شوند (Itasca Consulting Group, 2013): الف) مدل المان مجزایی که بر هندسه‌ی مساله

منطبق باشد ب) مدل رفتاری و خصوصیات مواد پ) شرایط مرزی و اولیه. مدل پلاستیسیته‌ی موهر-کولمب به عنوان مدل ساختاری بلوک‌ها و مدل لغزش کولمب برای بررسی رفتار بین بلوک‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین بیشترین چگالی منطقه‌بندی (مش‌بندی ریزتر و دقیق‌تر) در محدوده‌های گرادبان‌های تنش زیاد (در مجاورت حفاری‌ها) اعمال شده و با دور شدن از این مناطق تراکم مش کاهش می‌یابد. هندسه‌ی مدل‌های ساخته شده به ابعاد ۷۰ متر عرض، ۷۰ متر ارتفاع و ۱۰ متر طول در نظر گرفته شد و در ادامه ناپیوستگی‌ها شامل دسته درزه‌ها به آن‌ها اضافه شد. در این شرایط، همه‌ی مرزها ثابت و فقط مرز بالایی آزاد گذاشته می‌شود. پس از اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه، مدل ساخته شده برای رسیدن به تعادل اولیه حل گردید. روش حفر پیشنهادی برای تونل سد شهریار به صورت پلکانی است. ابتدا قسمت قوسی‌شکل (هدینگ) سقف تونل طی دو مرحله، سپس قسمت مستطیلی (بنچینگ) نیز در دو مرحله حفر می‌شود. در نهایت سیستم نگهداری مرکب شامل پیچ‌سنگ تزریقی و شاتکریت در تونل مدل‌سازی شدند. سناریوهای احتمالی سیستم نگهداری و خصوصیات آن‌ها به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده‌اند.

جدول ۲- سناریوهای تعریف شده سیستم نگهداری تونل سد شهریار

سناریو	I	II	III
ضخامت شاتکریت (mm)	۱۰۰	۱۲۰	۲۰۰
فاصله‌داری بولت تزریقی (m)	۲٫۵	۱٫۵	۱
طول بولت تزریقی (m)	۳	۴	۶

جدول ۳- خصوصیات سیستم‌های نگهداری تونل در مدل‌سازی‌های عددی

خصوصیات شاتکریت	واحد	مقدار	خصوصیات بولت تزریقی	واحد	مقدار
مدول الاستیسیته	GPa	۲۰	مدول الاستیسیته	GPa	۲۰۰
ضریب پواسون	-	۰٫۲	مساحت مقطع	mm ²	۸۰۴٫۳
چسبندگی	MPa	۷	مقاومت تسلیم	MPa	۴۰۰
چگالی	Kg/m ³	۲۳۵۰	ظرفیت کششی	MN	۰٫۳۲۲
زاویه‌ی اصطکاک داخلی	Deg	۴۵	دوغاب		
زاویه‌ی اتساع	Deg	۱۲	سختی دوغاب	GPa	۵۷٫۵۹
مقاومت کششی	MPa	۴	مقاومت دوغاب	MPa	۱

منظور بهینه‌سازی سیستم‌های نگهداری به صورت زیر به دست آمدند:

الف) تعیین C ، E و \emptyset با استفاده از نرم‌افزار RocLab

یکی از روش‌های متداول برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ نظیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، استفاده از معیار شکست هوک و براون است. هوک و براون معتقد هستند که یک معیار شکست وقتی دقیق و موفق است که سه شرط زیر در آن صدق کند: (۱) توصیف کاملی از عکس‌العمل سنگ در مقابل تمامی وضعیت تنش‌ها (۲) پیش‌بینی تأثیر و نفوذ یک و یا چند دسته شکستگی بر روی رفتار یک نمونه سنگ (۳) نشان دادن رفتار یک توده سنگی دارای چند سری دسته درزه در مقیاس کامل. بر این اساس، با استفاده از همه‌ی مقادیر واقعی ممکن پارامترهای مورد نیاز معیار موهر - کولمب که در جدول ۴ آورده شده است، به تعیین سه پارامتر پرداخته شده است.

همان‌طور که در جدول ۴ (Mahab Ghodss Consulting Enginners, 2004) پارامتر شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) دارای بازه‌ی مشخصی در هر سناریو است. بنابراین مقادیر متفاوتی از سه پارامتر C ، E و \emptyset به دست آمده‌اند. در جدول ۴ پارامترهای ورودی توده‌سنگ به نرم‌افزار RocLab ارائه شده است.

ب) مدول تغییرشکل‌پذیری با استفاده از روابط تجربی:

تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ تقریباً برای هرگونه تجزیه و تحلیلی در تونل‌ها، شیپ‌ها و کلا فضاهای زیرزمینی مورد نیاز است. تخمین برجای مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ پرهزینه و بسیار دشوار است. بنابراین معمولاً روش‌های تجربی جهت تخمین E_m مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از روابط تجربی، مقادیر مدول تغییرشکل‌پذیری برای مقاطع سه سناریوی تعریف شده محاسبه شده و در جدول ۵ ارائه شده است.

یک روش کلاسیک مورد استفاده در طراحی سازه‌های مهندسی برای محاسبه‌ی ضریب ایمنی، در نظر گرفتن مقاومت و تنش وارده یا توزیع نیرو در المان است. لذا ضریب ایمنی ساختار به صورت $FS = \frac{C}{D}$ تعریف شده و فرض می‌شود که شکست در کمتر از $FS = 1$ رخ می‌دهد (Kulatilake et al., 2013)، (Hoek & Kaiser, 1998). فرض بر این است که موادی که سیستم‌های نگهداری از آن ساخته شده‌اند، می‌توانند حداکثر تنش‌های فشاری و کششی (یا حداقل تنش‌های کششی و فشاری) را حفظ کنند. لذا ضریب ایمنی مواد در شکست برای فشار و کشش طبق گزاره‌ی (۷) محاسبه می‌شود (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

$$FOS = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{min}} \quad (7)$$

همچنین با توجه به جهت‌گیری تنش‌های بکر در منطقه، سقف تونل باید تحت تنش کششی قرار گیرد. طبق نتایج مدل‌سازی و با توجه به اینکه سقف تونل تحت تنش کششی بیشتری قرار گرفته‌اند، می‌توان بیان کرد که نتایج به دست آمده و روند مدل‌سازی‌های عددی از صحت مناسبی برخوردار است.

لازم به ذکر است که داده‌های مورد استفاده در این پژوهش بر اساس داده‌های برداشت شده از سایت پروژه و نیز بعضی از داده‌ها از فایل‌های اتوکد دریافتی از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی هستند.

۴- تجزیه و تحلیل‌های احتمالاتی

جهت انجام کلیه‌ی تحلیل‌های احتمالاتی در این پژوهش، از نرم‌افزار Minitab17 استفاده شده است. اولین گام برای تخمین سه پارامتر C ، E و \emptyset توده‌سنگ با استفاده از روش مونت‌کارلو، تعیین داده‌های ورودی برای تخمین‌های آماری و احتمالاتی و یافتن تابع توزیع مناسب است.

اطلاعات ورودی و دارای عدم قطعیت برای سه سناریوی مختلف تعریف شده برای مقاطع تونل به

جدول ۴ - پارامترهای ورودی توده‌سنگ‌های مقاطع سه گانه ریسک پذیر تونل به نرم‌افزار RocLab

پارامتر	$sigci$	GSI	m_i	D
سناریوی I	۱۴۰	۵۵-۶۵	۲۴	۰٫۸
سناریوی II	۱۲۵	۶۵-۷۰	۲۴	۰٫۸
سناریوی III	۱۰۰	۴۵-۵۰	۲۴	۰٫۸

جدول ۵- روابط تجربی پیشنهاد شده توسط محققین مختلف برای محاسبه‌ی مدول تغییر شکل پذیری

سناریوی I	سناریوی II	سناریوی III	منبع	رابطه (GPa)
$RMR = ۶۴$ $Q = ۵,۳۴$	$RMR = ۵۵$ $Q = ۲,۵$	$RMR = ۳۰$ $Q = ۰,۵۴$		
۲۸	۱۰	-	(Bieniawski, 1978)	$E_m = 2RMR - 100, RMR > 50$
-	-	۳,۱۷	(Serafim & Pereira, 1983)	$E_m = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)}, RMR \leq 50$
۱۵,۷۵	۱۶,۶۴	۲,۷	(Read et al., 1999)	$E_m = 0.1(RMR/10)^3$
۱۸,۹۷	۱۹	۶	(Hoek et al., 2002)	$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{\left(\frac{GSI-10i}{40}\right)}$
۲۰,۴۵	۱۴,۶۴	۸,۶۶	(Barton, 2002)	$E_m = 10 Q_c^{1/3}, Q_c = Q \left(\frac{\sigma_{cl}}{100}\right)$
۱۴,۸۱	۱۸,۲۴	۷,۰۳	(Hoek & Diederichs, 2006)	$E_m = E_i \left[0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{\left(\frac{60+15D-GSI}{11}\right)}}\right]$
۳۱	۱۳,۶۶	۶,۵	(Shen et al., 2012)	$E_m = E_i (10^{0.0186RQD-1.91})$

جریان مطالعه‌ها حذف کند. در این پژوهش، برای تعیین بهترین تابع توزیع آماری قابل برآزش بر داده‌های ورودی از آزمون اندرسون-دارلینگ استفاده شده است. به این ترتیب قابلیت برآزش توزیع‌های مختلف بر داده‌های ورودی توسط این آزمون آماری و با سطح اطمینان ۹۵٪ ارزیابی شد و نوع توزیع آماری پارامترهای مورد نظر با توجه به نتیجه‌ی این آزمون‌ها تعیین شد. در جدول ۶ نتایج آماری اولیه‌ی پارامترهای توده‌سنگ ارایه شده است.

بعد از محاسبات و تعیین داده‌های سه پارامتر E, C و θ با استفاده از نرم‌افزار RocLab و روابط تجربی، به دلیل بالا رفتن میزان دقت نتایج روی این سه پارامتر، اقدام به شبیه‌سازی مونت کارلو بر اساس محاسبات ذکر شده با ۱۰۰۰ نمونه شد.

مرحله‌ی بعدی، تعیین تابع توزیع آماری پارامترهای ورودی بر اساس یک سطح اطمینان مشخص است که به طراح کمک می‌کند تا مقادیر دور از واقعیت پارامترهای ورودی را از

جدول ۶- خصوصیات آماری اولیه‌ی شناسایی شده برای پارامترهای توده‌سنگ با هدف مدل‌سازی عددی

متغیر	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)
سناریو	نوع توزیع	نوع توزیع	نوع توزیع
	میانگین	میانگین	میانگین
	انحراف معیار	انحراف معیار	انحراف معیار
I	نرمال	نرمال	نرمال
	۰٫۹۲۴	۵۸٫۲۹۷	۲۵٫۳۹۶
	۰٫۱۳۰	۱٫۱۶۸	۸٫۲۱۳
II	نرمال	نرمال	نرمال
	۱٫۳۱۰	۶۰٫۰۵۲	۱۸٫۸۶۹
	۰٫۱۳۱	۲٫۰۲۸	۶٫۸۱۸
III	نرمال	نرمال	نرمال
	۰٫۵۸۶	۵۳٫۳۱۰	۷٫۲۶۸
	۰٫۰۳۳	۰٫۸۴۱	۴٫۷۴۵

(1998) در نظر گرفته شده است.

$$JRC_n = JRC_o \left(\frac{L_n}{L_o} \right)^{-0.02 JRC_o} \quad (8)$$

همچنین برای تعیین مقاومت فشاری درزه‌ها در محل ساختگاه تونل سد شهریار آزمایش چکش اشمیت بر روی سه دسته درزه‌ی مقطع مورد بررسی انجام شده است. بدین صورت که با استفاده از مقادیر سختی اشمیت اندازه‌گیری شده روی سطوح درزه‌ها، بر اساس گزاره‌ی ۹ مقادیر JCS درزه‌ها تعیین شد (Hoek & Kaiser, 1998).

$$JCS = 10^{(0.88 \gamma H_s + 1.01)} \quad (9)$$

به دلیل پایین بودن تعداد آزمایشات چکش اشمیت در محل پروژه و به منظور افزایش تعداد آزمایشات روی دسته درزه‌ها، اقدام به شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰ نمونه شد. بنابراین بر اساس تابع توزیع برازش‌یافته برای مقادیر سختی چکش اشمیت (H_s)، تابع توزیع احتمال JCS دسته درزه‌ها تعیین شدند.

بر این اساس، مراحل چهارگانه‌ی زیر برای تحلیل احتمالاتی و یافتن مقادیر مناسب JCS با استفاده از روش مونت کارلو اجرا گردید: الف) نمونه‌گیری از تابع توزیع احتمال سختی چکش اشمیت در هر سناریو (۱۰ نمونه) ب) تعیین مقدار JCS با استفاده از نمونه‌های تولید شده برای سختی چکش اشمیت درزه‌ها در مرحله‌ی قبل با استفاده از گزاره‌ی ۹ ج) تعیین تابع توزیع احتمال JCS درزه‌ها بر مبنای کل مقادیر JCS تعیین شده در مرحله‌ی ب. د) در نهایت تولید ۱۰۰۰ داده‌ی تصادفی برای وارد کردن دو پارامتر C_j و ϕ_j در مدل‌سازی‌های عددی. در جدول ۷ مقادیر واقعی و خصوصیات آماری اولیه‌ی تعیین شده از تحلیل‌های آماری صورت گرفته نشان داده شده است.

پس از تحلیل‌های صورت گرفته در بالا، اقدام به تولید ۱۰۰۰ داده‌ی تصادفی در هر سناریو برای هر دو پارامتر JRC و JCS شد. حال با در دست داشتن ۱۰۰۰ داده‌ی پارامتر JRC و ۱۰۰۰ داده‌ی مربوط به

در تونل انحراف آب سد شهریار، عدم قطعیت‌هایی نیز در خواص ناپیوستگی‌ها شامل پارامترهای مقاومت برشی (C_j و ϕ_j) وجود دارد. پارامترهای مقاومت برشی سطوح درزه‌های توده‌سنگ نقش اساسی در پایداری تکیه‌گاه‌های سد بتونی دارند. در تونل سد شهریار بر اساس مشخصات درزه‌های برداشت شده در محل شامل ضریب زبری درزه‌ها (JRC) و مقاومت فشاری دیواره‌ی درزه‌ها (JCS) و نتایج آزمایش برش مستقیم در حالت مقاومت باقیمانده، اقدام به محاسبه‌ی پارامترهای مقاومت برشی سطوح درزه (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی دسته درزه‌ها) برای سطح تنش معین شد.

کمی‌سازی عدم قطعیت‌های مربوط به C_j و ϕ_j بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو و معیار شکست بارتون به شرح زیر انجام شده است: الف) تعیین تابع توزیع احتمال پارامترهای JCS و JRC درزه‌ها بر اساس برداشت‌های انجام شده در تونل انحراف آب سد شهریار ب) تولید عددهای تصادفی بر اساس توزیع احتمال پارامترهای JCS و JRC درزه‌ها ج) تعیین مقادیر پارامترهای مقاومت برشی سطوح درزه‌ها با روش بارتون د) توزیع احتمال پارامترهای مقاومت برشی سطوح درزه‌ها ه) در نهایت تولید ۱۰۰۰ داده‌ی تصادفی برای وارد کردن دو پارامتر C_j و ϕ_j در مدل‌سازی‌های عددی. لذا ابتدا بر اساس مقادیر JRC تعیین شده در محل مقطع مورد بررسی پروژه (۱۰ آزمایش برای هر سناریو) (Mahab Ghodss Consulting Enginners, 2004) برآزش توابع مختلف بر این مقادیر در هر سناریو انجام شد و مناسب‌ترین تابع بر این مقادیر شناسایی گردید. به دلیل کم بودن تعداد آزمایشات تعیین JRC برای افزایش دقت در برآورد توزیع و پارامترهای احتمالاتی اقدام به اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰ نمونه شد. همچنین ذکر این نکته ضروری است که آزمایشات انجام شده در تونل انحراف آب سد شهریار برای ۱ متر از دسته درزه‌ها بوده و با توجه به طول ۵ متری دسته درزه‌های مقاطع اشاره شده در شکل ۲، اثر مقیاس با توجه به گزاره‌ی ۸ (Hoek & Kaiser,

لذا بر اساس دو رابطه‌ی بالا و با استفاده از داده‌های تصادفی تولید شده برای ضریب زبری و مقاومت دیواره‌ی درزه‌ها و همچنین ϕ_b معادل ۳۰ درجه اقدام به محاسبه‌ی ۱۰۰۰ داده شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی شد و بهترین تابع توزیع برازش‌یافته بر هر دو پارامتر C_j و ϕ_j در هر سناریو در شکل ۴ مشخص شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود در هر سه سناریو هر دو پارامتر C_j و ϕ_j دارای توزیع نرمال هستند.

پارامتر JCS به تعیین C_j و ϕ_j با استفاده از رابطه‌ی بارتن (گزاره‌ی ۱۰) و رابطه‌ی موهر-کولمب (گزاره‌ی ۱۱) در سطح تنش عمودی معین برای مقطع مورد بررسی ($\sigma_n = 2/1 \text{ MPa}$) پرداخته شده است.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + (JRC) \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (10)$$

$$\tau_p = \sigma_n \tan \phi + c \quad (11)$$

جدول ۷- خصوصیات آماری اولیه‌ی شناسایی شده برای پارامترهای JRC و JCS مقطع مورد بررسی به منظور مدل‌سازی عددی (Mahab Ghodss Consulting Enginners, 2004)

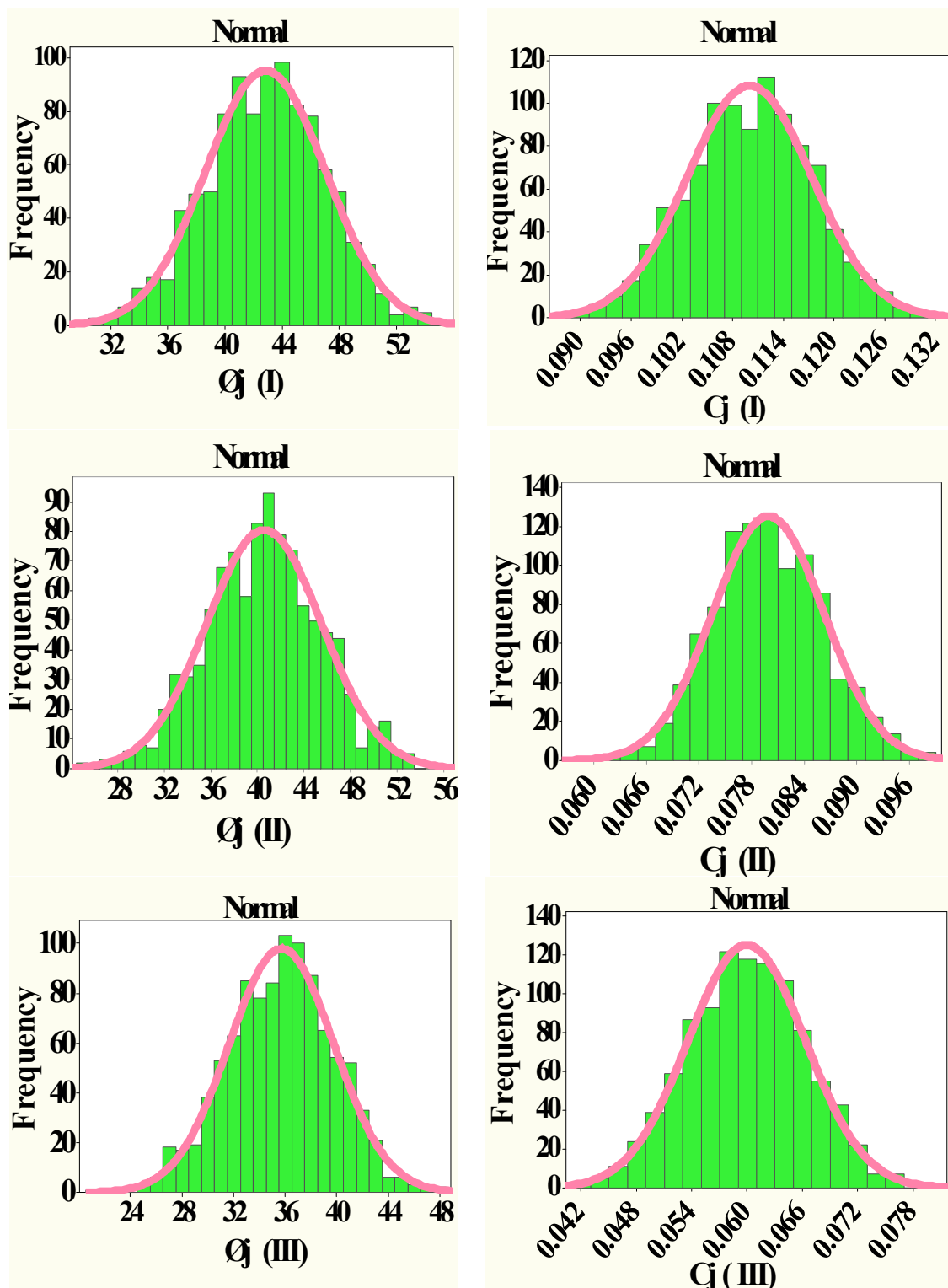
سناریو	I	II	III
داده‌های صحرایی برداشتی	۳-۴-۳-۶-۴-۴-۵-۲-۶-۷	۳-۵-۶-۴-۶-۵-۷-۸-۳	۷-۸-۶-۵-۸-۶-۹-۸-۷-۱۰
توزیع احتمال برازش یافته	نرمال	نرمال	نرمال
میانگین	۴,۴	۵,۲	۷,۴
انحراف معیار	۱,۵۸۷	۱,۶۱۹	۱,۵۰۶
داده‌های صحرایی برداشتی	۸۹,۷۰-۸۵-۹۱,۸۰-۹۲,۴۰-۹۳	۷۸-۸۱,۶-۸۲-۷۵,۸-۷۶	۶۵,۹-۵۹-۶۲,۹-۶۳,۴-۶۲,۸
توزیع احتمال برازش یافته	نرمال	نرمال	نرمال
میانگین	۹۰,۳۳	۷۸,۲۹	۶۲,۶۱
انحراف معیار	۳,۸۴۷	۳,۱۲۶	۳,۴۰۳

محاسبه شد (جدول ۸).

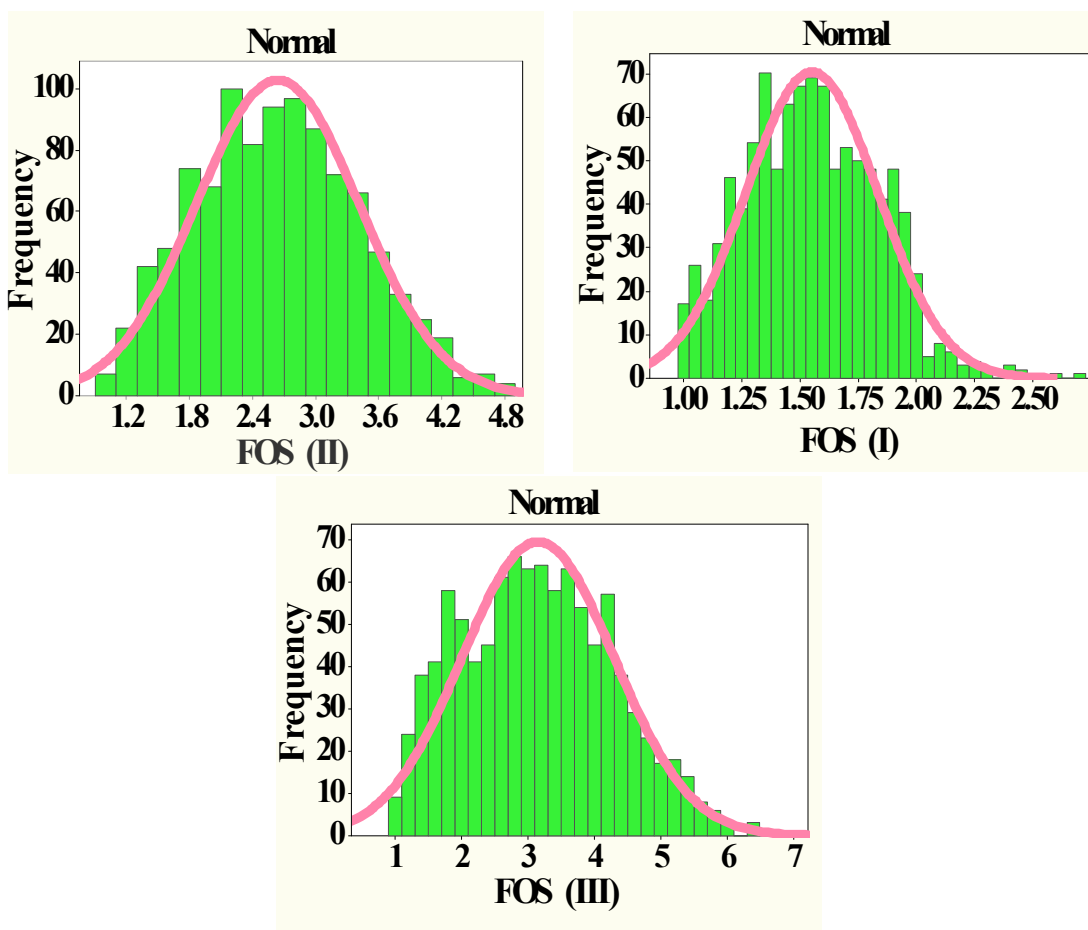
یک نمونه از محاسبه‌ی تنش وارد شده به سیستم نگهداری بر اساس نمونه‌ی تصادفی تولید شده در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که از این شکل مشخص است، در این نمونه مدل، بیشترین تنش کششی از طرف پیرامون تونل به سیستم نگهداری به سقف تونل وارد شده و بنابراین با تقسیم کردن مقاومت کششی سیستم نگهداری به ماکزیمم تنش حاصل شده از نرم‌افزار ضریب ایمنی به دست آمده است.

در گام بعدی پس از محاسبات احتمالاتی پنج پارامتر توده‌سنگ و دسته‌درزه‌ها، اقدام به تولید ۱۰۰۰ داده‌ی تصادفی از توابع توزیع شناسایی شده برای هر سناریو شد. بعد از تولید اعداد تصادفی از روی تابع توزیع آماری شناسایی شده، اقدام به مدل‌سازی‌های عددی و یافتن ضرایب ایمنی تونل با استفاده از مقادیر تصادفی تولید شده در مرحله‌ی قبل شد. هیستوگرام فراوانی ضرایب ایمنی حاصل از مدل‌سازی‌های عددی در شکل ۵ نشان داده شده است.

همچنین میانگین، انحراف معیار، میانه و ضریب تغییرات داده‌ها با توجه به ۱۰۰۰ ضریب ایمنی به دست آمده‌ی هر سناریو با سطح اطمینان ۹۵٪



شکل ۴- توزیع احتمال پارامترهای مقاومت برشی دسته درزه‌ها در هر سناریو



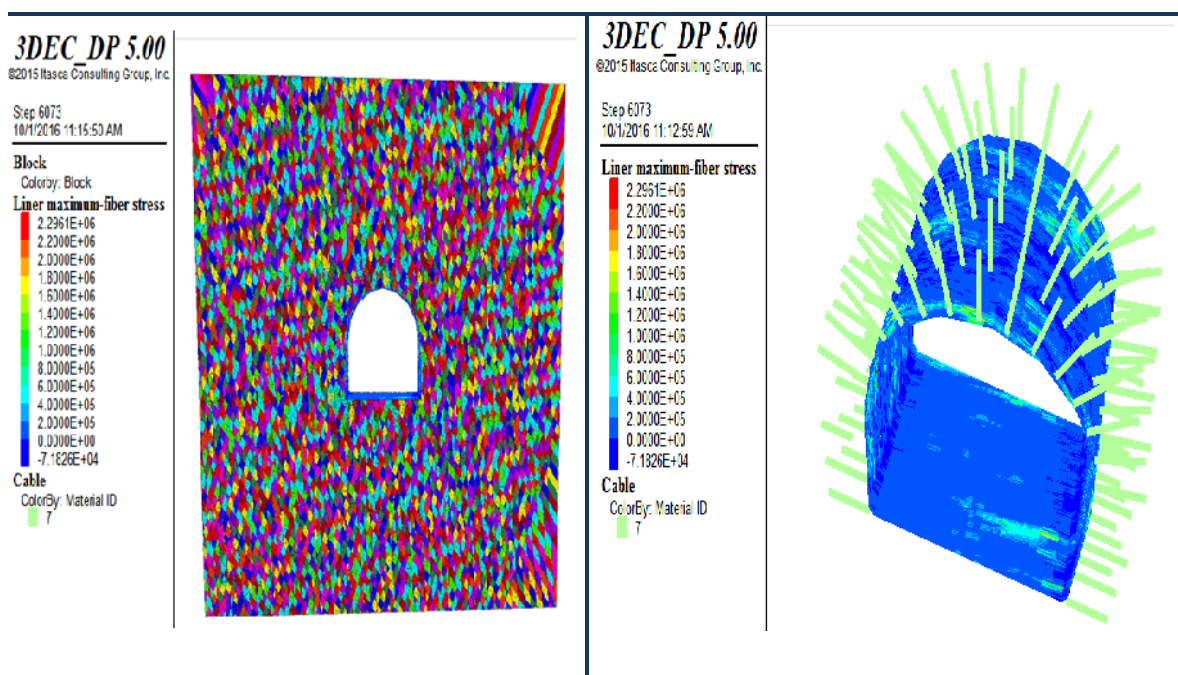
شکل ۵- توزیع احتمال ضرایب ایمنی هر سناریو

جدول ۸- اطلاعات آماری حاصل از ضرایب ایمنی محاسبه شده توسط مدل‌سازی‌های عددی

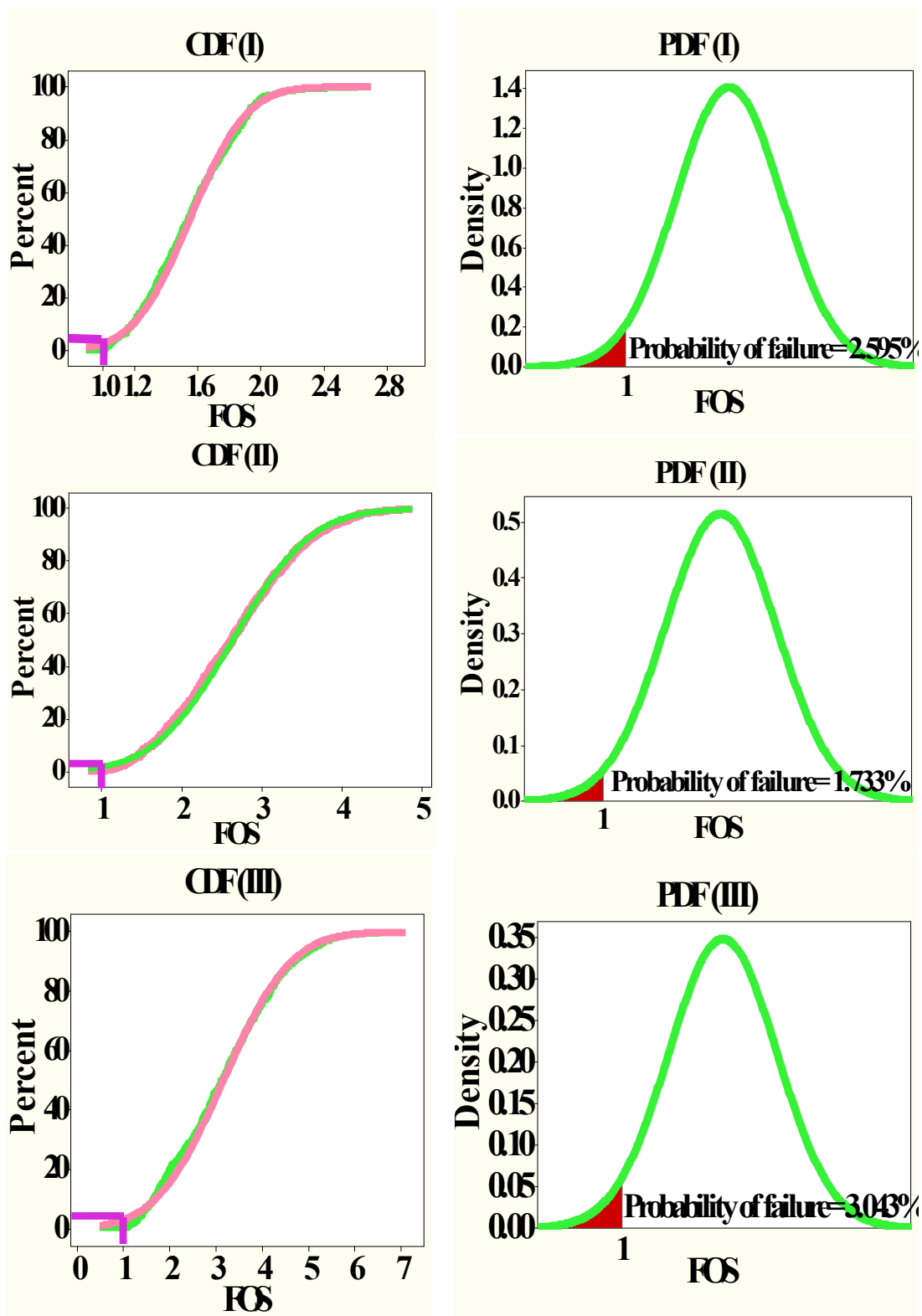
ضریب تغییرات	میانگین	انحراف معیار	نوع توزیع	ضرایب	
				ایمنی	سناریو
۰٫۲۲۴	۱٫۵۴۰	۰٫۲۸۴	نرمال	I	
۰٫۳۱۱	۲٫۶۲۵	۰٫۷۷۵	نرمال	II	
۰٫۴۴۰	۳٫۱۲۲	۱٫۱۴۸	نرمال	III	

صورت نسبت انحراف معیار به میانگین داده‌ها تعریف می‌شود، نشان‌دهنده‌ی میزان پراکندگی و تغییرات در مقادیر پارامتر مورد نظر است. از توابع توزیع بدست آمده‌ی فاکتورهای ایمنی برای تونل، β به وسیله‌ی گزاره‌ی (۱) محاسبه می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن شرایط اقتصادی پروژه، ضریب ایمنی بحرانی ۱ در نظر گرفته شده است و اندیس قابلیت اطمینان سناریوهای تعریف شده محاسبه شد. در ادامه با رسم نمودارهای توابع چگالی احتمال (*Probability Distribution Function (PDF) (PDF)*) و نیز توابع توزیع تجمعی (*Cumulative Distribution Function (CDF) (CDF)*) ضرایب ایمنی (شکل ۷) اقدام به محاسبه‌ی احتمال شکست هر سناریو شد.

یکی از دلایل اصلی تحلیل احتمالاتی پارامترهای توده‌سنگ، تعیین مقادیری با سطح اطمینان مشخص برای این پارامترها است. همانطور که بیان شد طراحان در هنگام استفاده از این مقادیر در محاسبات مربوط به طراحی با عدم قطعیت‌هایی در تعیین مقادیر عددی لازم روبرو هستند. در نتیجه تعیین مقادیر این پارامترها با سطح اطمینان مشخص می‌تواند در انجام طراحی مفید باشد (*Idris, 2011*). بر همین اساس، در این پژوهش کلیه‌ی تجزیه و تحلیل‌های احتمالاتی بر اساس سطح اطمینان ۹۵٪ تعیین شده است. برای دستیابی به مشخصات تابع توزیع فراوانی داده‌ها همیشه لازم نیست که تمام اطلاعات مربوط به تابع را به طور دقیق دانست. تعریف پارامترهایی مثل میانگین، انحراف معیار، میانه و ضریب تغییرات، می‌تواند تا حد زیادی کافی باشد. ضریب تغییرات که به



شکل ۶- نمونه‌ای از مدل‌سازی عددی و محاسبه‌ی ماکزیمم تنش کششی وارد شده به سیستم‌های نگهداری



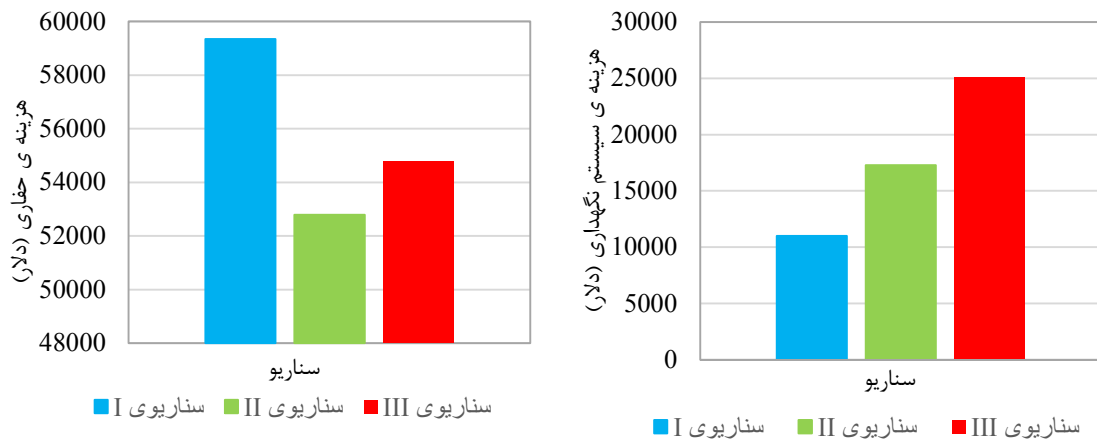
شکل ۷- توابع چگالی احتمال و توابع توزیع تجمعی مربوط به هر سناریو

۵- نتایج آنالیز ریسک اجرا شده

به منظور تحلیل ریسک نهایی از گزاره‌های ۴ و ۵ استفاده شده است. هزینه‌ی ۱۰ متر ساخت و ساز تونل با اعمال الگوهای نگهداری مختلف، از جمع دو هزینه‌ی حفاری و سیستم نگهداری تونل (Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2004) به دست آمد.

پس از محاسبه‌ی هزینه‌ی هر الگوی نگهداری و منظور نمودن احتمال شکست هر الگوی نگهداری، هزینه‌ی مورد انتظار از خسارت به ازای هر الگوی نگهداری به دست آمد. همانگونه که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود بیشترین میزان هزینه‌ی ساختمان مربوط به سناریوی III بوده که به دلیل وجود سیستم نگهداری سنگین و هزینه‌های حفاری بالا می‌باشد. همچنین دلیل نزدیکی میزان هزینه‌های ساخت و ساز سناریوهای I و II تونل با وجود سیستم نگهداری سنگین‌تر سناریوی II نسبت به سناریوی I، هزینه‌های حفاری بالای ناشی از مقاومت بالای سنگ و هزینه‌های ناشی

از برداشتن روباره و سنگ‌های هوازده در سناریوی II (پروفیل طولی تونل در شکل ۲ نشان داده شده است) می‌باشد. در نهایت ریسک از جمع هزینه‌های موردانتظار از خسارت و هزینه‌های ساخت و ساز تونل به دست آمد و از میان سناریوهای مختلف بررسی شده، سناریویی که دارای ریسک پایین‌تری بود به عنوان سیستم نگهداری بهینه‌ی پیشنهادی معرفی شد. نتایج مربوط به محاسبات اندیس قابلیت اطمینان، احتمال شکست و ریسک محاسبه شده‌ی هر سناریو برای مقطع ۱ در جدول ۹ آورده شده است. با توجه به نتایج جدول ۹، بهینه‌ترین سناریوی پیشنهادی با توجه به حداقل ریسک مبنی بر حداکثر قابلیت اطمینان، حداقل احتمال شکست و حداقل هزینه‌ها برای مقطع ۱، سناریوی II و به عبارتی سیستم نگهداری مرکب شامل پیچ سنگ‌های تزریقی به طول ۴ متر و به فواصل ۱٫۵ × ۱٫۵ متر همراه با ۱۲۰ میلی‌متر شاتکریت خواهد بود.



شکل ۸- میزان هزینه‌های حفاری و هزینه‌های سیستم‌های نگهداری سناریوهای مختلف تونل (Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2004)

جدول ۹- نتایج آنالیز ریسک برای مقطع ۱ تونل

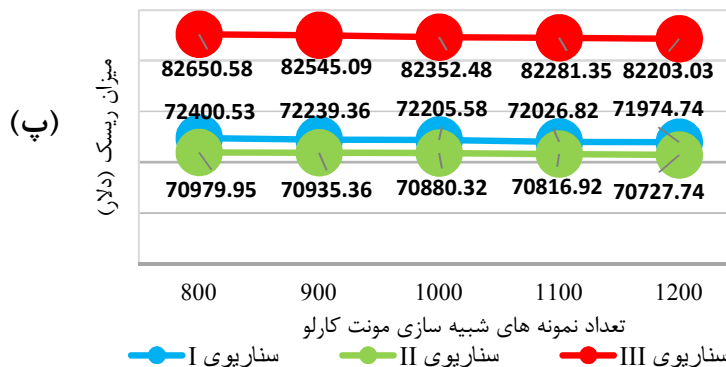
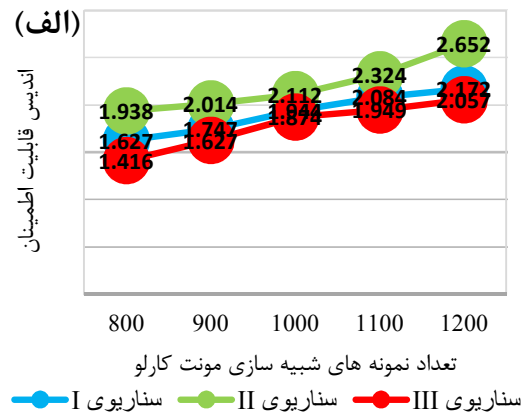
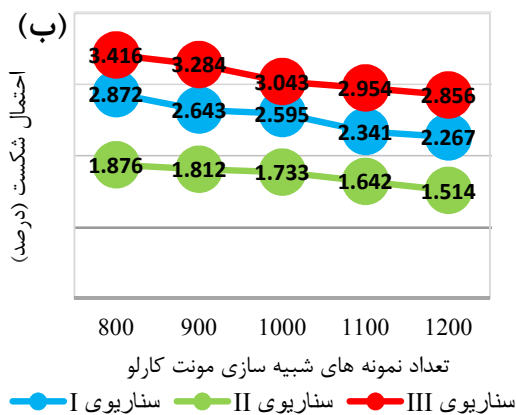
ریسک (دلار)	هزینه‌ی موردانتظار از شکست پروژه	هزینه‌ی ساخت و ساز پروژه (دلار)	P_f	β	سناریو
۷۲۲۰۵٫۵۸	۱۸۲۶٫۳۴۲	۷۰۳۷۹٫۲۴	۲٫۵۹۵	۱٫۹۴۴	I
۷۰۸۸۰٫۳۲	۱۲۰۷٫۴۳۲	۶۹۶۷۲٫۸۹	۱٫۷۳۳	۲٫۱۱۲	II
۸۲۳۵۲٫۴۸	۲۴۳۱٫۹۸	۷۹۹۲۰٫۵۰	۳٫۰۴۳	۱٫۸۷۴	III

کوچکی افزایش و میزان احتمال شکست با شیب بسیار کوچکی کاهش می‌یابد ولی تأثیری در انتخاب بهترین سناریوی سیستم نگهداری نخواهند داشت. به این دلیل که میزان افزایش در مقدار ریسک هر سناریو با افزایش تعداد داده‌ها بسیار ناچیز بوده و بر طبق شکل ۹- پ با هر تعداد تحلیل و مدل‌سازی عددی، نمودار شیب ثابتی دارد. در نهایت بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته با تعداد ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ مدل‌سازی صورت گرفته، بهترین سناریوی سیستم نگهداری در تونل انحراف آب سد شهریار سناریوی II خواهد بود. در نتیجه می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش تعداد نمونه‌ها در شبیه‌سازی مونت کارلوی اجرا شده در این پژوهش، میزان دقت در نتایج خروجی بالاتر رفته ولی در انتخاب بهترین سناریوی سیستم نگهداری تغییری ایجاد نشده است.

۶- آنالیز حساسیت

۶-۱- تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی مونت کارلو

حال در این قسمت این سوال مطرح می‌شود که دلیل استفاده از ۱۰۰۰ داده به منظور اجرای آنالیز ریسک چه بوده است؟ همواره یکی از چالش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو در تجزیه و تحلیل‌های احتمالاتی، تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی شده است. در این پژوهش، تحلیل حساسیتی بر اساس ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ تعداد داده شامل (C, E, \emptyset, G_j) و انجام گرفت. هدف اصلی تحلیل حساسیت، برآورد میزان تأثیر هر تعدادی از داده‌ها بر نتایج اندیس قابلیت اطمینان، احتمال شکست و میزان ریسک هر سناریو است. بر اساس نتایج تحلیل و شکل ۹، برآورد افزایش تعداد داده‌ها، میزان اندیس قابلیت اطمینان در هر سناریو با یک شیب بسیار



شکل ۹- آنالیز حساسیت (الف) اندیس قابلیت اطمینان (ب) احتمال شکست (پ) میزان ریسک در هر سناریو

۶-۲- آنالیز حساسیت تاگوچی پارامترهای ورودی

در این پژوهش چهار پارامتر E ، C و \emptyset و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (*Spacing of discontinuities*) به عنوان فاکتورهای مؤثر بر ضرایب ایمنی تونل در طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای کاربرد روش طراحی آزمایش بر اساس روش تاگوچی پنج سطح برای فاکتورهای آزمایش در هر سناریو انتخاب شدند (جدول ۱۰). در روش تاگوچی از جدول‌های خاصی تحت عنوان آرایه‌های متعامد استفاده می‌شود. بدین منظور برای بررسی اثرات فاکتورهای آزمایش باید آرایه‌ی متعامد مناسب در نظر گرفته شود. در این جدول ستون آخر مربوط به شاخص آزمایش انتخاب شده است. هنگام استفاده از روش طراحی آزمایش و زمانی که مقادیر مربوط به آزمایشات در دسترس هستند یک متغیر تحت عنوان شاخص آزمایش می‌تواند به منظور کمک به انجام یک قضاوت صحیح مورد استفاده قرار گیرد. یک شاخص آزمایش مناسب باید اولاً نسبت به پارامترهای ورودی حساسیت داشته باشد و ثانیاً قابل اندازه‌گیری باشد (Taguchi, 1987). در این پژوهش شاخص آزمایش به صورت گزاره‌ی ۸ تعریف شده است:

$$TI = \frac{\sigma_{tmax}}{\sigma_t} \quad (12)$$

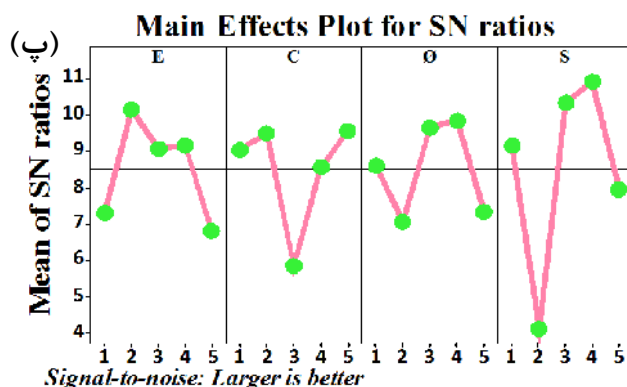
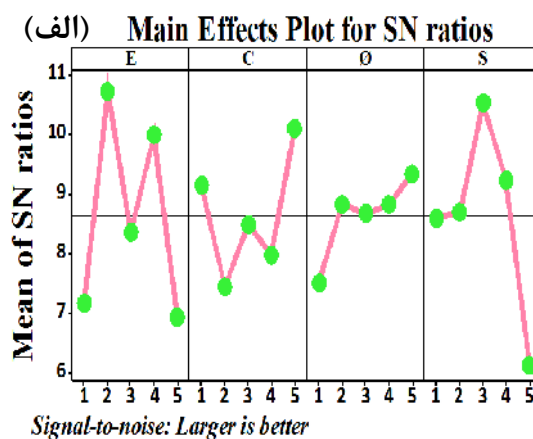
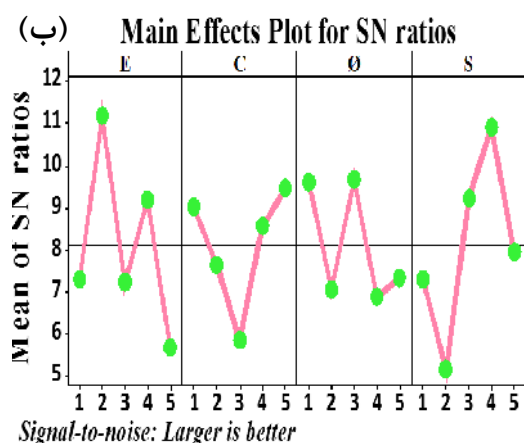
که σ_{tmax} ماکزیمم تنش کششی به دست آمده از نرم‌افزار 3DEC می‌باشد. همانگونه که اشاره شد یکی از مزایای استفاده از روش طراحی آزمایش این است که با تغییراتی آگاهانه در متغیرهای ورودی (پارامترهای ژئوتکنیکی)، می‌توان تغییرات خروجی (ضرایب ایمنی تونل) را مشاهده کرد. عوامل مختلفی بر طراحی و اجرای حفاریات زیرزمینی از قبیل تونل‌ها تأثیرگذار هستند. در این میان درزه‌ها و ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ، بیشترین تأثیر بر رفتار سازه‌ها را دربرداشته است. به منظور طراحی و مدل‌سازی این سازه‌های زیرزمینی، لازم است رفتار کلی توده‌سنگ‌های دربرگیرنده مورد توجه ویژه قرار گیرند (Jing & Stephansson, 2007). در این بین، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها وقتی که ساختار توده‌سنگ تحلیل می‌گردد بسیار مهم است. حضور درزه‌ها مقاومت سنگ را کاهش می‌دهد و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها میزان این کاهش را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Singh and Goel, 1999).

عملیات طراحی سازه‌های زیرزمینی معمولاً با آگاهی تقریبی از پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ (E ، C و \emptyset) انجام می‌شود و این در حالی است که آگاهی دقیق از این پارامترها جهت تعیین روش‌های حفاری و نیز طراحی سیستم‌های نگهداری و در نهایت تحلیل وضعیت پایداری سازه ضروری است. در بین این سه پارامتر مدول تغییر شکل-پذیری شاخص‌ترین پارامتر نشان‌دهنده‌ی رفتار مکانیکی توده سنگ‌ها است که در پروژه‌های مهندسی سنگ به منظور تحلیل جابجایی و توزیع تنش و به عبارت کلی توصیف رفتار توده‌سنگ مورد نیاز است (Jiayi Shen et al., 2012). بر این اساس، می‌توان حدس زد که دو پارامتر E و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها تأثیر عمده‌ای بر پایداری و رفتار توده‌سنگ خواهند داشت.

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت تاگوچی در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در سناریوی I پارامتر مدول تغییر شکل‌پذیری، در سناریوی II پارامترهای فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و مدول تغییر شکل‌پذیری و در سناریوی III پارامتر فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بیشترین تأثیر را بر ضرایب ایمنی تونل خواهند گذاشت. بنابراین همانگونه که پیش‌بینی می‌شد، دو پارامتر مدول تغییر شکل‌پذیری و فاصله‌داری ناپیوستگی به عنوان عوامل مؤثر بر ضرایب ایمنی تونل یا به عبارتی پایداری تونل انحراف آب سد شهریار معرفی می‌شوند. تفاوت اثرگذاری این دو پارامتر بر پایداری در سناریوهای مختلف، متفاوت می‌باشد. بدین حالت که وقتی کیفیت توده‌سنگ بر اساس طبقه‌بندی RMR پایین بوده، تأثیر فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بر پایداری تونل بیشتر از تأثیر مدول تغییر شکل‌پذیری و در توده‌سنگ‌های با کیفیت خوب، پارامتر مدول تغییر شکل‌پذیری تأثیر عمده‌ای بر پایداری تونل خواهد گذاشت. به عبارتی می‌توان گفت که در تونل انحراف آب سد شهریار، رابطه‌ی مستقیمی بین اثرگذاری فاکتور مدول تغییر شکل‌پذیری و پایداری و نیز رابطه‌ی معکوسی بین اثرگذاری فاکتور فاصله‌داری ناپیوستگی و پایداری وجود خواهد داشت.

جدول ۱۰- سطوح تعیین شده برای فاکتورهای آزمایش تاگوچی

سناریو	مدول یانگ (GPa)	چسبندگی (MPa)	فاصله‌داری ناپیوستگی (cm)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (Deg)
I	۲۵٫۲	۰٫۹۸۸	۹۵٫۱۷	۵۸٫۹
	۲۸٫۹	۰٫۸۲۴	۹۷٫۲	۵۹٫۱
	۲۰٫۰	۰٫۸۵۴	۹۳٫۴۵	۵۹٫۰
	۳۰٫۳	۰٫۸۷۷	۹۵٫۸۸	۵۹٫۲
	۳۲٫۷	۰٫۷۹۵	۹۱٫۵۱	۵۷٫۷
II	۱۳٫۳	۱٫۳۹۴	۵۹٫۱۳	۵۹٫۸
	۲۵٫۵	۱٫۲۹۵	۶۴٫۴۳	۵۹٫۴
	۱۴٫۳	۱٫۲۹۷	۶۳٫۰۵	۵۸٫۸
	۱۶٫۶	۱٫۳۵۱	۵۸٫۰۱	۶۱٫۶
	۲۴٫۵	۱٫۳۴۱	۶۱٫۱۴	۶۱٫۷
III	۱۰٫۰	۰٫۵۶۳	۳۴٫۲۷	۵۴٫۱
	۶٫۳	۰٫۶۱۷	۳۳٫۳۴	۵۳٫۳
	۱۱٫۰	۰٫۵۵۴	۲۶٫۸۶	۵۳٫۴
	۹٫۳	۰٫۵۹۸	۳۲٫۶۱	۵۲٫۸
	۴٫۷	۰٫۵۵۹	۳۰٫۶	۵۳٫۴



شکل ۱۰- تاثیر پارامترهای دارای عدم قطعیت بر ضرایب ایمنی تونل: (الف) سناریوی I (ب) سناریوی II (پ) سناریوی III

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روشی بر اساس یک رویکرد احتمالاتی ریسک طبق مفهوم قابلیت اعتماد، برای انتخاب الگوی بهینه‌ی نگهداری تونل‌ها با تمرکز ویژه بر تونل انحراف آب سد شهریار به عنوان مطالعه‌ی موردی معرفی گردید. انتخاب این عامل تاثیر زیادی در هزینه و ایمنی پروژه‌های تونل‌سازی دارد. با توجه به این نکته که پارامتر پذیرفته شده برای توصیف قابلیت اعتماد سازه‌ها در مسائل مهندسی، ضریب اطمینان بوده و نیز وجود سطح بالایی از عدم قطعیت‌ها در اکثر پدیده‌های مکانیک سنگ و خاک، روش‌های تحلیل ریسک احتمالاتی با کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها و بهره‌گیری از رویکرد قابلیت اعتماد که تصادفی بودن ضریب اطمینان را لحاظ می‌کند، می‌تواند مشکل عدم قطعیت موجود در پارامترهای مورد نیاز برای طراحی سازه‌های سنگی مانند تونل را با اعمال بیشترین اندیس قابلیت اطمینان تا حد زیادی مرتفع نمایند. تجزیه و تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که:

بر اساس تاثیرگذاری خیلی زیاد سیستم نگهداری بر هزینه و ایمنی حفاری‌های زیرزمینی و با توجه به ماهیت تصادفی بودن پارامترهای C ، E و θ ، G_j و ϕ_j نگرش ویژه بر عدم قطعیت این پارامترها به خصوص پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی درزه‌ها در محیط‌های درزه‌دار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

سیستم‌های نگهداری سنگین‌تر، گزینه‌ای ایده‌آل از حیث پایداری هستند ولی لزوماً از دیدگاه اقتصادی ایده‌آل طراحان نیستند. لذا با اعمال عدم قطعیت‌های پارامترهای مصالح مسیر پروژه و دخیل کردن آن‌ها در هزینه‌های ساخت و ساز پروژه، علاوه بر بحث پایداری، مبنای اقتصادی پروژه نیز مطمئن‌تر خواهد شد. با اعمال عدم قطعیت‌های داده‌های مورد استفاده در مطالعات امکان‌سنجی تونل انحراف آب سد شهریار به منظور برآورد هزینه‌های مورد انتظار از شکست و اعمال هزینه‌های ساخت و ساز، سیستم نگهداری بهینه شامل پیچ سنگ‌های تزریقی به طول ۴ متر به فواصل 1.5×1.5 متر همراه ۱۲۰ میلی‌متر شاتکریت بر اساس ماکزیمم β برابر ۲،۱۱۲، مینیمم P_f معادل ۱،۷۳۳٪ و مینیمم ریسک به میزان ۷۰۸۸۰،۳۲ دلار به دست آمد.

بررسی حساسیت‌پذیری تعداد نمونه‌های موردنیاز

برای مدل‌سازی‌های عددی در ارزیابی روش مونت‌کارلو برای یافتن توزیع احتمال مناسب فاکتورهای ایمنی هر سناریو نشان داد که تغییری در نتایج محاسبه‌ی اندیس قابلیت اطمینان، احتمال شکست و در نهایت ریسک ایجاد نشد لذا از ۱۰۰۰ داده به منظور اجرای آنالیز ریسک در این پژوهش استفاده شد.

آنالیز حساسیت همزمان چهار پارامتر C ، E و θ و S بر رفتار توده‌سنگ‌های مسیر تونل با استفاده از روش تاگوچی نشان داد که در سناریوی I مدول تغییر شکل‌پذیری، در سناریوی II مدول تغییر شکل‌پذیری و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها به میزان تقریباً برابر و در سناریوی III فاصله‌داری ناپیوستگی بیشترین تاثیر را بر ضرایب ایمنی تونل دارند.

مطابق با آنالیز حساسیت تاگوچی، با کاهش کیفیت توده‌سنگ بر اساس طبقه‌بندی توده‌سنگ RMR ، تاثیر پارامتر S بر پایداری تونل افزایش و با افزایش کیفیت توده‌سنگ، تاثیر پارامتر E بر پایداری تونل افزایش خواهد یافت.

با توجه به روش ارائه شده در این پژوهش، استفاده از شاخص قابلیت اطمینان به جای ضریب اطمینان برای توصیف قابلیت اعتماد سازه‌ها، خصوصاً سازه‌های ژئوتکنیکی توصیه می‌شود.

در نهایت می‌توان گفت که استفاده از آنالیز ریسک احتمالاتی با رویکرد قابلیت اعتماد می‌تواند در به کارگیری دامنه‌ی وسیعی از مقادیر ممکن از پارامترهای مورد نیاز در طراحی که به دلایل مختلف مانند محدودیت تعداد بررسی‌ها یا خطاهای معمول لحاظ نشده‌اند مفید باشد و دید بهتری را نسبت به اطلاعات موجود در اختیار طراحان قرار دهد. افزایش اطمینان طراحان به پارامترهای موردنیاز در طراحی از طریق لحاظ کردن تمامی مقادیر ممکن برای پارامترهای موردنظر، منجر به کاهش خطر شکست (ریسک‌پذیری) طراحی و به دنبال آن کاهش هزینه‌های پروژه به دلیل عدم اطمینان موجود در پارامترهای طراحی، می‌شود.

۸- سیاهه‌ی نمادها

در جدول ۱۱ سیاهه‌ی نمادها آورده شده است.

جدول ۱۱- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
F_c	-	فاکتور اطمینان بحرانی
μ_F	-	میانگین فاکتور اطمینان
σ_F	-	انحراف معیار فاکتور اطمینان
Ω_F	-	منطقه‌ی شکست
P	-	اندازه‌ی احتمال
X	-	بصورت $X=\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ بوده و شامل مجموعه‌ی
$f_X(X)$	-	تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی X
$G(x)$	-	تابع عملکرد (در تئوری قابلیت اعتماد، تابع هدف یا
$\varphi(x)$	-	مقادیر تابع توزیع تجمعی برای یک متغیر نرمال
n_{ij}	-	نسبت سیگنال به نویز آزمایش i ام
y_{ijk}	-	میزان ضریب ایمنی آزمایش i ام
n	-	تعداد تکرار آزمایش‌ها
σ_{tmax}	MPa	ماکزیمم تنش کششی بدست آمده از نرم‌افزار 3DEC
σ_t	MPa	مقاومت کششی سیستم نگهداری
σ_c	MPa	مقاومت فشاری سیستم نگهداری
σ_{max}	MPa	ماکزیمم تنش فشاری یا کششی حاصل از نرم‌افزار
JRC_n	-	ضریب ناهمواری دسته درزه‌ها به طول n
JRC_0	-	ضریب ناهمواری دسته درزه‌ها به طول o
C_j	MPa	چسبندگی درزه
\emptyset_j	Deg	زاویه اصطکاک داخلی
L_n	m	درزه به طول n
L_0	m	درزه به طول o
\emptyset_b	Deg	زاویه اصطکاک پایه
PDF	-	تابع توزیع احتمال
CDF	-	تابع توزیع تجمعی
S	m	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها
TI	-	شاخص آزمایش تاگوچی

۹- مراجع

- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., & Boyce, G.M. (2002). *Slop Stability and Stabilization Methods, 2nd Edition*. New York.: John wiley & Sons Inc.
- Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 185-216.
- Bieniawski, Z.T. (1978). Determining rock mass deformability: experience from case histories. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 15, 237-247.
- Brown, E. (2012). Risk assessment and management in underground rock engineering—an overview. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4, 193-204. doi:10.3724/SP.J.1235.2012.00193
- Carranza-Torres, C., & Diederichs, M. (2009). Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, 506-530. doi:10.1016/j.tust.2009.02.001
- Connor Langford, J., & Diederichs, M.S. (2012). Reliability based approach to tunnel lining design using a modified point estimate method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 60, 263-276. doi:10.1016/j.ijrmms.2012.12.034
- Connor Langford, J., Vlachopoulos, N., & Diederichs, M.S. (2015). Revisiting support optimization at the Driskos tunnel using a quantitative risk approach. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 1-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.003>
- Fouladgar, M.M., Yazdani-Chamzini, A., & Zavadskas, E.K. (2012). Risk evaluation of tunneling projects. *ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING*, 12, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2012.03.008>
- Goh, A.T.C., Zhang, W. (2012). Reliability assessment of stability of underground rock caverns. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 55, 157-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.012>
- Goodman. R.E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. New York: John wiley & Sons Inc.
- Hoek, E., and Diederichs, M.S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 203-215.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1998). *Support of Underground Excavations In Hard Rock*. Rotterdam: Balkema.
- Idris, M., Saiang, D., & Nordlund, E. (2011). Numerical Analyses of the Effects of Rock Mass Property Variability on Open Stope Stability. *American Rock Mechanics Association*.
- Isaksson. (2002). *Model for estimation of time and cost based on risk evaluation applied on tunnel projects. Doctoral Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics Royal*. Stockholm: Institute of Technology
- Itasca Consulting Group. (2013). Itasca Consulting Group, Inc., 3DEC (3 Dimensional Distinct Element Code Manual) Version 5. users Manual.

- Jiayi Shen, J., Karakus, M., & Xu, C. (2012). A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 245-250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2012.07.004>
- Jing, L., & Stephansson, O. (2007). Constitutive models of rock fractures and rock masses the basics. *Developments in Geotechnical Engineering*, 85, 47-109.
- Johari & Mehrabanilari. (2015). System reliability analysis of rock wedge stability considering correlated failure modes using sequential compounding method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 82, 61-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.002>
- Joshaghani, A., Ramezani-pour, A.A., Ataei, O., & Golroo, A. (2015). Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 101, 317-325. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.094>
- Kanik, M., Gurocak, Z., & Alemdag, S. (2015). A comparison of support systems obtained from the RMR₈₉ and RMR₁₄ by numerical analyses: Macka Tunnel project, NE Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 109, 224-238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafears.2015.05.025>
- Kulatilake P.H.S.W., Qiong, W., Zhengxing, Y., & Fuxing, J. (2013). Investigation of stability of a tunnel in a deep coal mine in China. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23, 579-589. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.07.018>
- Li, S.C., Zhou, Z.Q., Li, L.P., Lin, P., Xu, Z.H., & Shi, S.S. (2015). A new quantitative method for risk assessment of geological disasters in underground engineering: Attribute Interval Evaluation Theory (AIET). *Tunnelling and Underground Space*, 53, 128-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2015.12.014>
- Low, B.K., & Einstein, H.H. (2013). Reliability analysis of roof wedges and rockbolt forces in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 1-10.
- Mahab Ghodss Consulting Enginners. (2004). *Diversion Tunnel Engineering Geological Mapping*. Tehran: East Azarbaijan & Ardabil Regional Water Corporation.
- Marhavilas, P.K., Koulouriotis, D., & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. *Journal of Loss Prevention in the process Industries*, 24, 1-47. [doi:10.1016/j.jlp.2011.03.004](http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.004)
- Peng Zeng, P., Jimenez, R., & Li, T. (2016). An efficient quasi-Newton approximation-based SORM to estimate the reliability of geotechnical problems. *Computers and Geotechnics*, 76, 33-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.02.003>
- Piric, K. (2015). Reliability analysis method based on determination of the performance function's PDF using the univariate dimension reduction method. *Structural Safety*, 57, 18-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2015.07.005>
- Qian, Q., & Lin, P. (2016). Safety risk management of underground engineering in China: Progress, challenges and strategies. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 423-442. [doi: 10.1016/j.jrmge.2016.04.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.04.001)
- Rabiee vaziri, M., kariminasab, S., & Mohammadi, H. R. (2015). Estimating rock mass shear strength

- parameters using Monte Carlo simulation. *Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)*, 10, 69-80.
- Read, S.A.L., Richards, L.R., and Perrin, N.D. (1999). Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. *Proceeding 9th International Society for Rock Mechanics Congress. Paris*.
- Serafim, J. L. and Pereira, J. P. (1983). Considerations of the geomechanics classification of Bieniawsk. *Proceeding International Symposium on Engineering Geological and Underground Construction*. Lisbon.
- Shen, J., Karakus, M., and Xu, C. (2012). A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 245-250.
- Simsek, B., & Uygunoglu, T. (2016). Multi-response optimization of polymer blended concrete: A TOPSIS based Taguchi application. *Construction and Building Materials*, 117, 251-262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.027>
- Singh and Goel. (1999). *Rock Mass Classification. A Practical Approach in Civil Engineering*,.
- Singh, B., & Goel, R. K. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks*. (J. A. Hudson, Ed.) Amsterdam: Elsevier B.V.
- Spyridis. P. (2013). Adjustment of tunnel lining service life through appropriate safety factors. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 324-332.
- Taguchi. (1987). *Systems of experimental design. New York: Uni. Pub*.
- Tajvidi Asr, et al. Tajvidi Asr, E., Hayaty, M., Rafiee, R., Ataie, M., & Jalali, S.E. (2015). Selection of Optimum Tunnel Support System Using Aggregated Ranking of SAW, TOPSIS and LA Methods. *International Journal of Applied Operational Research*, 5, 49-63.
- Wang, Q., Fang, H., & Shen, L. (2016). Reliability analysis of tunnels using a metamodeling technique based on augmented radial basis functions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 45-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.007>
- You, K., Park, Y., & Lee, J.S. (2005). Risk analysis for determination of a tunnel support pattern. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 479-486.
- Zhang, J., Tang, W.H., Zhang, L.M., & Huang, H.W. (2012). Characterising geotechnical model uncertainty by hybrid Markov Chain Monte Carlo simulation. *Computers and Geotechnics*, 43, 26-36. doi:10.1016/j.compgeo.2012.02.002