

مقاله علمی-پژوهشی

## کاربرد نرم افزار قابلیت اعتماد RT در تحلیل پایداری تونل نگهداری شده با پیچ سنگ

هادی فتاحی<sup>۱\*</sup>، فرشاد ملک محمودی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار دانشکده مهندسی علوم زمین دانشگاه صنعتی اراک h.fattahi@arakut.ac.ir

۲- دانشجو، دانشکده مهندسی علوم زمین دانشگاه صنعتی اراک farshad.malekmahmoodi@gmail.com

(تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۱۱/۲۴ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴)

### چکیده

به هنگام بررسی پایداری تونل‌ها، از مدل‌ها و روابطی کمک گرفته می‌شود که دارای متغیرهایی هستند که نمی‌توان آن‌ها را قطعی فرض کرد. یکی از راه‌های در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای سنگ و خاک، استفاده از روش‌ها و توزیع‌های آماری متغیرها است. در حال حاضر برای مقابله با عدم قطعیت، از روش‌های احتمالاتی و قابلیت اعتماد استفاده می‌شود. در این پژوهش سعی شده است با بهره‌گیری از روابط فرم بسته ریاضی، برای تحلیل پایداری تونل از سه تابع حالت حدی که عبارت است از: کشش پیچ‌سنگ، ناحیه پلاستیک شدگی تونل و همگرایی تونل استفاده شود. همچنین برای به‌دست آوردن احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد از سه روش قابلیت اعتماد مرتبه اول، قابلیت اعتماد مرتبه دوم و شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده که مجموعه‌ی این تحلیل‌ها در نرم‌افزار RT انجام شده است. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که روش‌های قابلیت اعتماد دارای قابلیت بالایی در تحلیل احتمالاتی مسائل مربوط به تحلیل پایداری تونل را دارند و این روش می‌تواند برای تحلیل احتمالاتی سایر مسائل صنعت تونل‌سازی نیز به‌کار گرفته شود.

### کلمات کلیدی

تحلیل پایداری تونل، نرم افزار RT، روش قابلیت اعتماد مرتبه اول، روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم، شبیه‌سازی مونت‌کارلو

## ۱-مقدمه

تونل با توجه به وسعت کاربردش در کارهای عمرانی و معدنی از دیر باز نقش مهمی در تسهیل فعالیت‌های بشر داشته است. وسعت کاربرد تونل در زندگی امروزه بسیار زیاد شده است که معنای آن را از واژه‌هایی که عوام تحت عنوان تونل به معنای راه اتباطی است که از دل کوه می‌گذرد بسیار فراتر رفته است. از کاربردهای اصلی تونل‌سازی در زندگی امروزه می‌توان به تونل‌های معدنی، تونل‌های راه، تونل‌های انتقال انرژی و تونل‌های انحرافی آب رودخانه‌ها اشاره کرد. وجود عوارض ساختاری از قبیل ترک‌ها، درزه‌ها و گسل‌ها در توده سنگ باعث شده تا شناخت رفتار واقعی توده سنگ، دشوار و حتی در بعضی مواقع پرهزینه و غیرممکن شود. پس از حفاری تونل، توزیع تنش‌های اولیه در محدوده حفاری، به هم خورده و جابجایی‌هایی در محیط ایجاد می‌شود. با حرکت توده سنگ، محیط پس از مدت زمان مشخصی دوباره به تعادل می‌رسد. امروزه برای حل مشکل وجود عدم قطعیت در پارامترهای طراحی، از روش‌های قابلیت اعتماد استفاده می‌کنند. در طول سالین اخیر، مطالعاتی روی استفاده از روش‌های قابلیت اعتماد در تحلیل فضاهای زیرزمینی انجام شده که در این مقاله به مهم‌ترین آن‌ها اشاره خواهد شد. آقای لوو و همکاران یک روش عملی برای ارزیابی یک تونل سنگی براساس روش قابلیت اعتماد مرتبه اول و ارزیابی سطح پاسخ ارائه کردند [۱]. همچنین لوو با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و طراحی یکنواخت یک مدل جایگزین برای تقریب حالت حدی اندرکنش بین زمین و سیستم نگهداری ارائه داد [۲]. در تحقیقی دیگر، لی و لو با استفاده از روش سطح پاسخ و قابلیت اعتماد مرتبه دوم احتمال شکست را بر پایه حل معادلات فاما دانکن (برای معیار شکست موهر کلمب)، همچنین حل کارانزا توریس (برای معیار شکست هوک و براون) بدست آوردند. گو و ژانگ همچنین از شبکه عصبی مصنوعی برای تجزیه و تحلیل قابلیت اعتماد یک تونل با سطح مقطع نعل اسبی استفاده کردند [۳-۶]. لو و تانگ یک الگوریتم جدید برای روش قابلیت اعتماد مرتبه اول ارائه کردند، که در آن محدودیت‌های بهینه‌سازی مورد نیاز برای جستجوی نقطه طراحی بسیار کاهش یافته است [۷]. مولون و همکاران یک روش مبتنی بر قابلیت اعتماد برای تجزیه و تحلیل سه بعدی و پایداری جبهه کار تونل دایره‌ای شکل که

توسط یک سپر تحت فشار قرار گرفته ارائه دادند [۸]. هوک از شبیه‌سازی مونت کارلو برای آنالیز قابلیت اعتماد تونل‌های دایره‌ای شکل استفاده کرد [۹]. سانگ و همکاران روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول و دوم را در تحلیل فضاهای زیرزمینی استفاده کردند [۱۰]. لوو و همکاران ضخامت بهینه شاتکریت و موقعیت نصب آن‌ها در سیستم نگهداری برای تونل دایره‌ای شکل با استفاده از روش قابلیت اعتماد مرتبه اول و روش سطح پاسخ (با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مشخصات سنگ و پارامترهای سیستم نگهداری) را ارزیابی کردند [۱۱]. چن و همکاران احتمال شکست دو تونل را با در نظر گرفتن فاصله دو تونل نسبت به هم، عمق تونل زنی، قطر تونل و خواص مقاومتی زمین را ارائه کردند [۱۲]. لو و لُو تجزیه و تحلیل حفاری‌های سنگی زیرزمینی با استفاده از روش پاسخ سطحی و روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم را ارائه کردند [۱۳]. لیو و همکاران احتمال پایداری تونل را در زیر رودخانه با استفاده از روش بیژین محاسبه کردند [۱۴]. لو و همکاران قابلیت اعتماد را با استفاده از روش کمترین مربعات و طراحی یکنواخت برای تونل‌های دایره‌ای و غیر دایره‌ای محاسبه کردند [۱۵]. لو و همکاران قابلیت اعتماد بر پایه بهینه‌سازی طراحی برای سیستم نگهداری تونل با حالت‌های شکست چندگانه با روش سطح پاسخ را ارائه کردند [۱۶]. تیائزنگ و یانگ با استفاده از روش سطح پاسخ بهبود یافته، قابلیت اعتماد را در جبهه کار تونل در سنگ‌های نرم ارزیابی کردند [۱۷]. پنگ و همکاران چگونگی روش‌های مختلف قابلیت اطمینان، فرضیات مختلف در انواع توزیع‌ها و ساختار همبستگی متغیرهای تصادفی، اندازه‌های مختلف تونل و فشارهای نگهداری را بر نتایج قابلیت اطمینان، تجزیه و تحلیل کردند [۱۸]. یانگ و همکاران یک مدل دولایه برای ریزش بلوکی در تونل مستطیل شکل که تحت فشار نشت آب قرار دارد را با استفاده از روش‌های قابلیت اعتماد پیشنهاد کردند [۱۹].

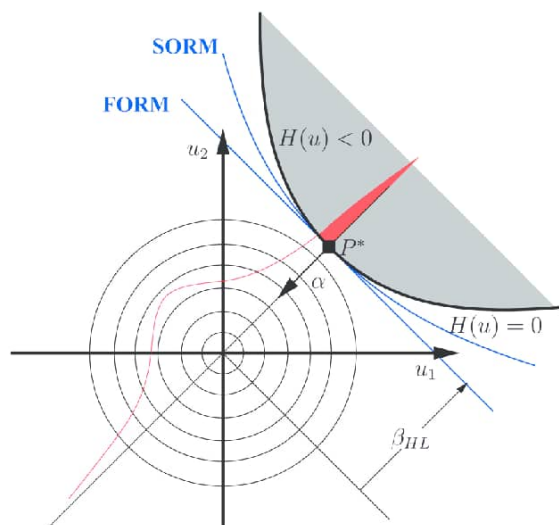
در این پژوهش با استفاده از اطلاعات موجود و روش‌های قابلیت اعتماد در نرم افزار RT (روش قابلیت اعتماد مرتبه اول، روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم و شبیه‌سازی مونت کارلو) روی سه تابع حالت حدی یعنی؛ کشش پیچ سنگ، شعاع ناحیه پلاستیک شدگی و همگرایی در تونل (بر پایه روابط فرم بسته ریاضی) پایداری تونل ارزیابی می‌شود.

## ۲- مفهوم عدم قطعیت در تونلسازی

ساده‌ترین شکل ممکن می‌توان برای هر دو متغیر تصادفی ظرفیت  $R$  و تقاضا  $S$  به صورت زیر تعریف کرد:

$$G(X) = R - S \quad (1)$$

با توجه به رابطه ۱ چنانچه  $G(X) > 0$  باشد، سازه در ناحیه ایمن قرار دارد و عملکرد مطلوب است و چنانچه  $G(X) < 0$  باشد، سازه در ناحیه گسیختگی قرار داشته و عملکرد نامطلوب است و در نهایت زمانی که  $G(X) = 0$  باشد، تابع حالت حدی مرز بین ناحیه ایمنی و ناحیه گسیختگی را نشان می‌دهد. شکل ۱ رویه‌ی حالت حدی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایش جدایش مناطق ایمن و غیرایمن توسط تابع حالت حدی [۲۰]

با توجه به توضیحات ارائه شده، احتمال گسیختگی یا شکست به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_f = (g(X) \leq 0) = \int_{g(X) \leq 0} f(X) dx \quad (2)$$

حل انتگرال رابطه ۲ بسته به تعداد متغیرهای تصادفی، تابع چگالی آن‌ها، و شکل تابع حدی، ممکن است بسیار پیچیده و وقت‌گیر باشد. بنابراین روش‌های مختلفی ارائه شده است که با استفاده از آن‌ها می‌توان حل انتگرال متناظر با احتمال گسیختگی را ساده‌سازی و تسهیل کرد. بنابراین، به جای محاسبه محاسبه انتگرال احتمال خرابی، از پارامتر دیگری به نام شاخص قابلیت اعتماد  $(\beta)$  استفاده می‌شود تا حجم محاسبات و زمان مورد نیاز کاهش یابد. در این صورت احتمال شکست برابر است با مقدار تابع تجمعی احتمال استاندارد نرمال به ازای  $(-\beta)$  که به صورت زیر نوشته می‌شود:

مهندسان در تحلیل و طراحی سازه‌های سنگی همواره با یک سری عدم قطعیت مواجه هستند که ناشی از ماهیت ذاتی سنگ‌ها و روابط توسعه داده شده برای تعیین پارامترهای مورد نیاز در تحلیل طراحی است. عدم قطعیت موجود از منابع مختلفی شامل کمبود دانش بشری، عدم آگاهی کافی از منشأ زمین‌شناسی و ویژگی‌های مواد زیرسطحی و نیز نحوه حفاری در این مناطق هستند. اگرچه درجات و انواع گوناگونی از عدم قطعیت وجود دارد اما پایه و مفهوم عدم قطعیت بر نبود اطلاعات کافی پیرامون تمام یا بخشی از پدیده مورد بررسی، مبتنی است. خاک و سنگ از جمله محیط‌های غیر همگن و ناهمسانگرد هستند که پارامترهای ژئومکانیکی، خواص هیدرولیکی، خواص فیزیکی و اندیسی برای شناسایی ساختگاهی (که قرار است در آن خاک و سنگ تونل زده شود) در نقاط مختلف آن مقادیر متفاوتی را نشان می‌دهد. بنابراین تعریف خواص سنگ‌ها به‌طور دقیق ممکن نیست، مگر با اندازه‌گیری در هر نقطه که در عمل به‌علت زمان و هزینه بالا امکان‌پذیر نیست. در هنگام تونل‌زنی با پارامترهایی مانند چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، سختی برشی و نرمال درزه‌ها در توده سنگ روبه‌رو هستیم که هر کدام دارای عدم قطعیت هستند یعنی همان‌طور که گفته شد در نقاط مختلف هرچند نزدیک به هم مقادیر متفاوتی دارند و از طرفی باید تمام خواص منطقه در تحلیل‌ها وارد شوند. در این مقاله با در نظر گرفتن عدم قطعیت داده‌های ورودی، از روش‌های قابلیت اعتماد برای محاسبه احتمال شکست تونل استفاده شده است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

## ۳- تئوری قابلیت اعتماد در تونلسازی

احتمال گسیختگی تونل یکی از موضوعات اصلی در طراحی تونل‌ها است. این موضوع می‌تواند به وسیله تئوری قابلیت اعتماد بررسی شود. عملکرد هر تونل می‌تواند توسط تابعی از متغیرهای تصادفی اصلی، به نام تابع حالت حدی یا تابع پایه که آن را با  $G(X)$  نشان می‌دهند بیان شود.  $(X)$  مجموعه متغیرهای تصادفی است که به‌عنوان ورودی تابع، بر شکست یا ایمنی تأثیرگذار است. تابع حالت حدی را در

می‌توان آن را مشخص‌کننده ویژگی‌های آماری دانست. با استفاده از چنین چرخه‌ی شبیه‌سازی، ویژگی‌های آماری محل ساختگاه به‌دست می‌آید. در ادامه به معرفی نرم‌افزار RT پرداخته می‌شود که روش‌های بیان‌شده برای مسئله مدنظر توسط این نرم‌افزار اجرا می‌شوند.

#### ۴- معرفی نرم‌افزار RT

برنامه کامپیوتری RT یک نرم‌افزار احتمالاتی و قابلیت اعتمادی است که توسط دکتر وکاس استاد دانشگاه بریتیش کلمبیا و دکتر مجتبی محصولی استاد دانشگاه صنعتی شریف در دوره دکترا ارائه شده است [۲۱]. در این برنامه کامپیوتری از توابع توزیع احتمالاتی مختلفی همچون توزیع نرمال، گامبل، بتا، نمایی، لاگ نرمال، رایلی، لاپلاس، گاما و یونیفرم استفاده می‌شود. همچنین از این برنامه کامپیوتری می‌توان برای روش‌های سطح پاسخ و متغیرهای تصمیم‌گیری استفاده کرد. یکی از خصوصیات بارز این برنامه کامپیوتری قابلیت لینک شدن با نرم‌افزارهایی همچون متلب، انسیس و آباکوس است. انجام تحلیل‌های روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول و دوم و روش شبیه‌سازی مونت کارلو از دیگر قابلیت‌های این برنامه است. برای انجام این آنالیزها می‌توان مشخص کرد که برای تابع حالت حدی به‌دست آمده از یک سری متغیر تصادفی به ازای چه مقداری از آن‌ها کمترین احتمال شکست (نقطه طراحی) سازه‌هایی مثل فضاها، زیرزمینی وجود دارد. همچنین به کمک بردارهای اهمیت پارامتر مهم در ایمنی یا ریزش فضای زیرزمینی را شناسایی کرده و به کمک آن می‌توان احتمال شکست را کمتر و قابلیت اعتماد را به کمک شاخص قابلیت اعتماد بالا برد. این برنامه کامپیوتری مجهز به واسطه گرافیکی کاربر بوده و به صورت رایگان از وب سایت [inrisk.ubc.ca/software/rt](http://inrisk.ubc.ca/software/rt) قابل دانلود است.

#### ۵- مبانی نظری و روابط فرم بسته در تجزیه و تحلیل

##### تونل

این پژوهش براساس روابط فرم بسته و فرمول‌های ریاضی در تونل‌های نگهداری شده با شعاع ۳ متر و با پیچ‌سنگ به طول ۳ متر در زمین همگن، همسانگرد و الاستیک و تحت فشار هیدرواستاتیک و ضریب پواسون ۰/۲ تحت تنش بر جای زمین ۱ مگاپاسکال و معیار شکست موهر کولمب ارائه می‌شود.

$$P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (3)$$

در صورتی که تابع حالت حدی به شکل رابطه‌ی ۳ باشد، شاخص قابلیت اعتماد بدین گونه بیان می‌شود:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (4)$$

در رابطه ۴ مقدار  $\mu_g$  میانگین تابع حالت بوده، و  $\sigma_g$  انحراف معیار تابع حالت حدی را نشان می‌دهد. مقدار  $\beta$  که یک فرآیند بی‌بعد است، که به‌عنوان معیاری برای نشان دادن فاصله بین حاشیه میانگین اطمینان تا رویه گسیختگی استفاده می‌شود؛ به‌طوری که هر فاصله آن بیشتر باشد مساحت کوچکتری از تابع چگالی احتمال در قسمت منفی و گسیختگی قرار می‌گیرد و در نتیجه احتمال گسیختگی و شکست کمتر می‌شود. به عبارت دیگر هر چقدر مقدار انحراف معیار کمتر و میانگین بیشتر باشد مقدار شاخص قابلیت اعتماد بیشتر شده و احتمال شکست و گسیختگی کمتر می‌شود. برای اندازه‌گیری قابلیت اعتماد، روش‌های مختلفی همچون روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول، قابلیت اعتماد مرتبه دوم و روش شبیه‌سازی مونت کارلو وجود دارد که با استفاده از آن‌ها می‌توان فرآیند حل انتگرال را ساده‌تر کرد. در روش قابلیت اعتماد مرتبه اول با در نظر گرفتن بسط مرتبه اول سری تیلور برای تابع حالت حدی محاسبه احتمال شکست را ساده می‌کند. در این روش از اطلاعات ممان‌های اول و دوم (میانگین و واریانس) استفاده می‌شود. نسل اول این روش صرفاً با در نظر گرفتن ممان‌های آماری و بدون توجه به توزیع‌های متغیرها تنها از توزیع نرمال برای هر متغیر استفاده می‌شود و توسط بسط سری تیلور در اطراف نقطه هدف به صورت خطی تقریب زده خواهد شد. زمانی که تابع حالت حدی انحنای زیادی داشته باشد، استفاده از روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم تکنیک مناسبی برای نزدیک شدن به یک جواب صحیح است. این روش در واقع تکامل یافته روش قابلیت اعتماد مرتبه اول است و به جای استفاده از تقریب خطی، با استفاده از تقریب درجه دوم بسط تیلور تابع حالت حدی را با یک سهمی یا ابر سهمی تخمین می‌زند. اما شبیه‌سازی مونت کارلو از هر متغیر تصادفی چندین بار نمونه‌گیری می‌کند تا توزیع واقعی آن مطابق با ویژگی‌های آماری به‌دست آید. برای این کار، در هر بار نمونه‌گیری یک سری اعداد به‌صورت شانس تولید خواهد شد که تا حدودی

$$N\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (13)$$

$$C_1 = \sigma_0 + \frac{P_0 r_0}{2(1-\nu)\rho} \quad (14)$$

$$C_2 = \left\{ \frac{N_c}{N_\phi + 1} + \frac{N_\phi - 1}{N_\phi + 1} \left[ \sigma_0 + \frac{P_0 r_0}{2(1-\nu)\rho} \right] \right\} r_p^2 \quad (15)$$

$$\left( \frac{r_p}{r_0} \right)^{N_\phi - 1} = \frac{N_\phi - 1}{[(N_\phi - 1)(\sigma_i + p_0) + N_c](N_\phi + 1)} \left[ 2\sigma_0 + \frac{P_0 r_0}{2(1-\nu)\rho} - N_c + \frac{N_\phi - 1}{N_\phi + 1} N_c \right] \quad (16)$$

در این روابط،  $\sigma_0$  تنش بر جای زمین،  $\sigma_1$  فشار نگهدارنده داخلی،  $r_0$  شعاع تونل،  $\nu$  ضریب پواسون هستند. در این مقاله، متغیرهای تصادفی،  $C$  چسبندگی،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی و  $E$  مدول الاستیسیته هستند که دارای توزیع لاگ نرمال با میانگین و انحراف معیار مشخص می‌باشند که در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱- متغیرهای تصادفی با توزیع لاگ نرمال [۲۳]

انحراف معیار	میانگین	پارامتر
۰/۰۱	۰/۱	C (MPa)
۱۰۰	۵۰۰	E (MPa)
۴	۳۰	$\phi^\circ$

همچنین توابع حالت حدی مورد مطالعه در این پژوهش یعنی کشش پیچسنگ، همگرایی تونل و شعاع منطقه پلاستیک‌شدگی به صورت زیر معرفی شده‌اند:

$$G_1(x) = T_{limiting} - T \quad (17)$$

$$G_2(x) = \varepsilon_{Limiting} - \frac{U}{r_0} \quad (18)$$

$$G_3(x) = L_{Limiting} - \frac{r_p}{r_0} \quad (19)$$

در این روابط  $T_{limiting}$  حد نهایی کشش پیچسنگ و  $\varepsilon_{limiting}$  حد نهایی همگرایی تونل و  $L_{limiting}$  حد نهایی شعاع پلاستیک‌شدگی است؛ که به ترتیب مقادیر ۱۷۰ کیلو نیوتن، ۰/۵٪ و ۲ متر می‌باشند [۲۲]. به عبارت دیگر تجاوز از این حد باعث خرابی تونل می‌شود و شکست در نقاطی اتفاق می‌افتد که مقدار تابع حالت حدی به ازای آن‌ها، یک مقدار

در روابط فرم بسته کشش پیچسنگ به صورت رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$T = \frac{E_b A_b}{\rho - r_0} \left[ \left( U_r \Big|_{r=\rho}^{final} - U_r \Big|_{r=\rho}^{initial} \right) - \left( U_r \Big|_{r=r_0}^{final} - U_r \Big|_{r=r_0}^{initial} \right) \right] \quad (5)$$

در رابطه‌ی فوق:  $E_b$ ، مدول یانگ پیچسنگ،  $A_b$ ، مساحت پیچسنگ،  $\rho$ ، طول پیچسنگ به علاوه‌ی شعاع تونل،  $r_0$ ، شعاع تونل،  $U_r \Big|_{r=\rho}^{final} - U_r \Big|_{r=\rho}^{initial}$ ، محاسبات مربوط به جابه‌جایی انتهای پیچسنگ و  $U_r \Big|_{r=r_0}^{final} - U_r \Big|_{r=r_0}^{initial}$  محاسبات مربوط به ابتدای پیچسنگ است.

در این رابطه مقدار  $U_r \Big|_{r=r_0}^{initial}$  و  $U_r \Big|_{r=\rho}^{initial}$  از طریق روابط فاما دانکن [۴] و مقدار  $U_r \Big|_{r=r_0}^{final}$  و  $U_r \Big|_{r=\rho}^{final}$  به ترتیب از طریق روابط (۶) و (۷) به دست می‌آید [۲۲].

$$U_r = -Ar^{-N_\psi} - Br^{N_\phi} - Cr \quad (6)$$

$$(7)$$

$$U_r = -\frac{1+\nu}{E} \left[ (1-2\nu)C_1 r + \frac{C_2}{r} - (1-2\nu)\sigma_0 r \right]$$

پارامترهای رابطه‌ی (۶) و (۷) نیز از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$(8)$$

$$A = \frac{1+\nu}{E} \left[ (1-2\nu)C_1 r_p + \frac{C_2}{r_p} - (1-2\nu)\sigma_0 r_p \right] r_p^{N_\psi} \quad (9)$$

$$B = \frac{1+\nu}{E} \left( \sigma_i + p_0 + \frac{N_c}{N_\phi - 1} \right) \frac{1 + N_\psi N_\phi - \nu(1 + N_\psi)(1 + N_\phi)}{N_\phi N_\psi} \left( \frac{1}{r_0} \right)^{N_\phi - 1}$$

$$C = -\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E} \left( \sigma_0 + \frac{N_c}{N_\phi - 1} \right) \quad (10)$$

$$N_\phi = \tan^2 \beta = \tan \psi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (11)$$

$$N_c = \sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (12)$$

فاصله نشان‌دهنده شاخص قابلیت اعتماد است و خط آبی رنگ یعنی فاصله نقطه فعلی تا نقطه قبل که با پیشروی گام این فاصله به صفر میل می‌کند.

یک بار دیگر این تحلیل را با استفاده از نرم‌افزار RT و با روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم انجام شده است که خروجی آن طبق شکل ۴ ارائه شده است.

در این روش نیز گام‌های جستجو پیش می‌روند و شروط همگرایی بررسی می‌شوند تا نقطه طراحی و بردار اهمیت گاما بدست آید. تا این مرحله خروجی‌ها تقریباً شبیه به روش قبل بوده است. پس از بردار اهمیت مقدار کاپا یا انحنای اصلی اول مشخص شده است. در این روش احتمال شکست با تقریب درجه دوم از رویه حالت حدی بدست می‌آید و دقت آن نسبت به روش قبل بهتر است. مقدار شاخص قابلیت اعتماد در این حالت ۲/۱۷ و احتمال شکست ۱/۴٪ می‌باشد.

حال تحلیل دیگری را با استفاده از نرم‌افزار RT و این بار با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شده است و خروجی آن طبق شکل (۵) بدست می‌آید. در این روش به تعداد ۱۰۰۰۰ عدد تصادفی تولید می‌شود و احتمال شکست در این روش برابر با ۱/۲٪ می‌باشد.

منفی شود. بنابراین هدف، محاسبه احتمال شکست با استفاده از این توابع است که در ادامه نتایج مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار RT آمده است.

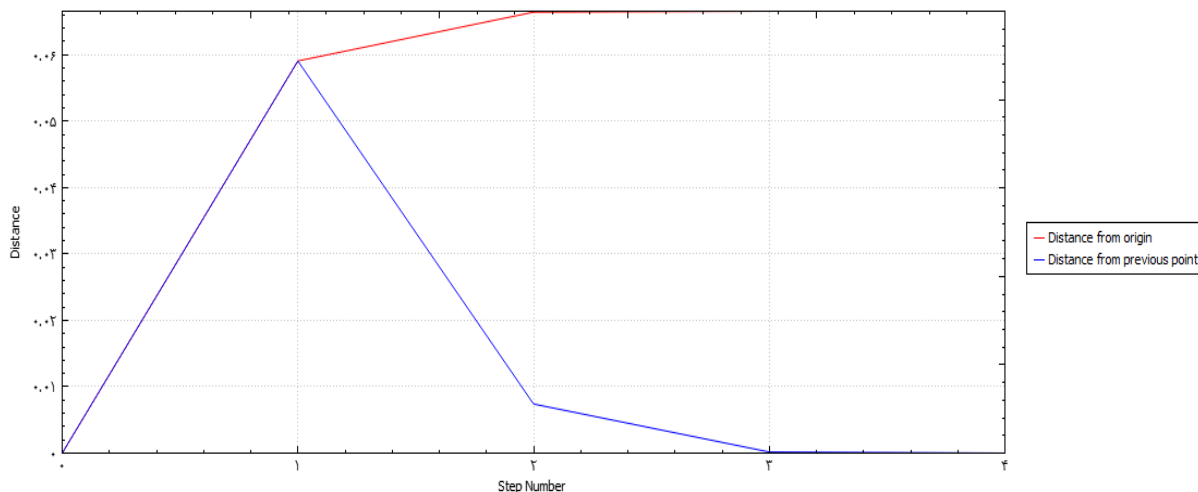
## ۶- مدل‌سازی و تحلیل نتایج

با استفاده از نرم‌افزار RT، اولین تحلیل با روش قابلیت اعتماد مرتبه اول روی تابع حالت حدی اول  $G_1(x)$  و  $p_i = 0$  انجام شد که خروجی تحلیل توسط نرم‌افزار در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به خروجی به‌دست آمده از نرم‌افزار RT، با چک کردن شروط همگرایی، شاخص قابلیت اعتماد و به‌دنبال آن احتمال شکست به‌دست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بردار اهمیت آلفا و گاما مشخص است. در شرایطی که متغیرها همبستگی داشته باشند از بردار اهمیت گاما استفاده می‌شود، که این بردار اهمیت متغیرهای همبسته را نشان می‌دهد. در اینجا مقادیر بردار اهمیت گاما مثبت به‌دست آمده، که این نشان‌دهنده آن است که با افزایش متغیرهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، احتمال شکست کاهش می‌یابد. در این تحلیل مقدار  $\beta = 1.33$  و  $P_f = 9\%$  است. این مقدار برای احتمال شکست در زمینه مهندسی تونل نسبتاً مناسب است. به‌علاوه شکل ۳، نموداری را نشان می‌دهد که گام‌های جستجو نقطه طراحی در محور افقی و فاصله در محور عمودی مشخص شده است که به دو صورت این فاصله نمایش داده می‌شود. خط قرمز رنگ یعنی فاصله نقطه فعلی تا مبدأ که در آخر این

Output			
Random variable sensitivities:			
RandomVariableObjectName	AlphaImportanceMeasure	GammaImportanceMeasure	Del
C	-0.92759558152384	1.4501923969909	-1.1
E	-2.3732747738528e-5	2.488933377081e-5	-4.1
Phi	-0.37358591592057	0.42594458234836	-0.1
The reliability index:			
Beta = 1.33845			
The probability of failure:			
pf = 0.0903756			
##### FORM ANALYSIS DONE IN 44.546 SECONDS.			

شکل ۲- خروجی نرم‌افزار RT برای  $G_1(x)$  با روش قابلیت اعتماد مرتبه اول



شکل ۳- خروجی نرم افزار RT برای  $G_1(x)$  با روش قابلیت اعتماد مرتبه اول

```

Output
The probability of failure:
pf = 0.0802775

The last two trial points in the search for the design point in FORM are employed to
The first principal curvature:
kappa = 15.1995

Corrected probability of failure according to Breitung's improved formula:
pf = 0.0148505

Corresponding reliability index:
Beta = 2.17406

##### FORM ANALYSIS DONE IN 24.334 SECONDS.
    
```

شکل ۴- خروجی نرم افزار RT برای  $G_1(x)$  با روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم

```

Output
Sampling analysis results for the function "gx" :
The reliability index:
Beta = 2.23836

The probability of failure:
pf = 0.0125987

The coefficient of variation of sampling
CoV = 0.0885241

The total number of samples = 10001

##### SAMPLING ANALYSIS DONE IN 80.088 SECONDS.
    
```

شکل ۵- خروجی نرم افزار RT برای  $G_1(x)$  با روش شبیه‌سازی مونت کارلو

اول به دست می‌آید. لازم به ذکر است برای تابع حالت حدی دوم، معادله  $\frac{U}{\sigma}$  از رابطه زیر گرفته شده است

همین روال برای تابع حالت حدی دوم یعنی همگرایی تونل انجام می‌شود که نتایج زیر با روش قابلیت اعتماد مرتبه

برجای زمین،  $r_p$  شعاع ناحیه پلاستیک شدگی،  $P_{cr}$  تنش بحرانی و  $P_i$  فشار نگهدارنده داخلی تونل می‌باشند.

$$\frac{U}{r_0} = \left[ \frac{1+\nu}{E} \right] \left[ 2(1-\nu)(p_0 - p_{cr}) \left( \frac{r_p}{r_0} \right)^2 - (1-2\nu)(p_0 - p_i) \right] \quad (20)$$

که در آن:  $U$ ، جابه‌جایی تونل،  $r_0$  شعاع تونل،  $\nu$  ضریب پواسون توده‌سنگ،  $E$ ، مدول یانگ توده‌سنگ،  $P_0$  تنش

```

Output
| -0.940596 |
| -0.0284116 |

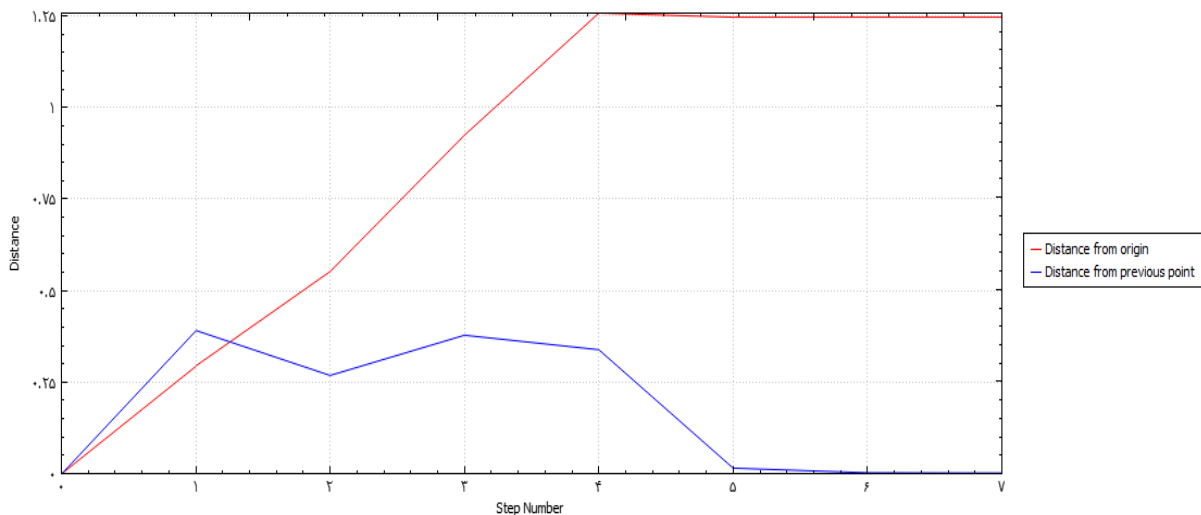
Computing the random variable sensitivities...
Random variable sensitivities are computed successfully.

The reliability index:
Beta = 1.2463

The probability of failure:
pF = 0.106328

##### FORM ANALYSIS DONE IN 0.265 SECONDS.
    
```

شکل ۶- خروجی نرم افزار RT برای  $G_2(x)$  با روش قابلیت اعتماد مرتبه اول



شکل ۷: خروجی نرم افزار RT برای  $G_2(x)$  با روش قابلیت اعتماد مرتبه اول



```

Output
pf = 0.106328

The last two trial points in the search for the design point in FORM are employed to
The first principal curvature:
kappa = 0.29887

Corrected probability of failure according to Breitung's improved formula:
pf = 0.0863633

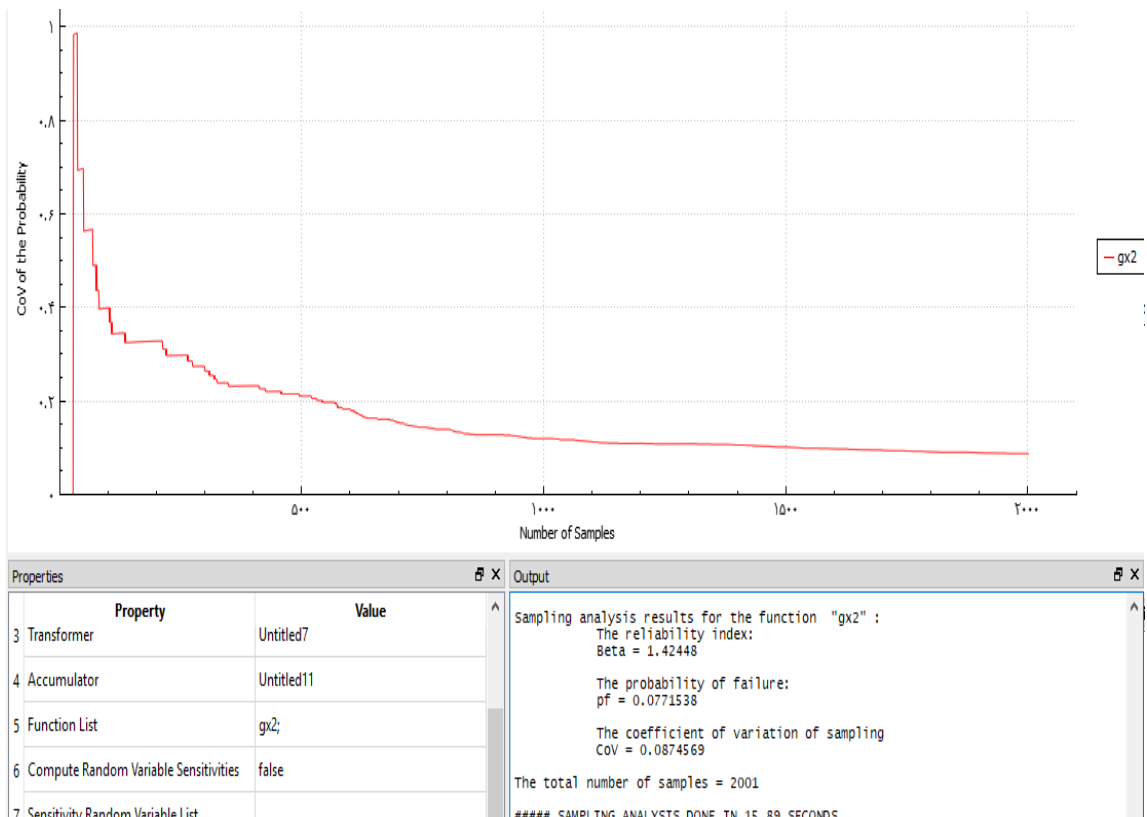
Corresponding reliability index:
Beta = 1.3635

##### FORM ANALYSIS DONE IN 0.297 SECONDS.
    
```

شکل ۸: خروجی نرم افزار RT برای  $G_2(x)$  با روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم

شکست به ترتیب  $1/36$  و  $8\%$  به دست می‌آید (شکل ۸). به-علاوه این که کاپا یا شاخص انحنای برابر با  $0/29$  است. همچنین در شکل ۹، تابع حالت حدی دوم با استفاده از روش مونت کارلو برای  $2000$  داده‌ی تصادفی محاسبه شده که در نهایت احتمال شکست با استفاده از این روش  $7\%$  به-دست آمد.

برای تابع حالت حدی دوم مقدار شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست، به ترتیب برابر  $1/24$  و  $10\%$  به دست آمد که این مقدار برای مهندسی تونل مناسب است. همچنین با استفاده از روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم و برای تابع حالت حدی دوم، شاخص قابلیت اعتماد و احتمال



شکل ۹: خروجی نرم افزار RT برای  $G_2(x)$  با روش شبیه‌سازی مونت کارلو

شاخص قابلیت اعتماد  $2/87$  به‌دست آمد (شکل ۱۰). احتمال شکست به‌دست آمده برای مهندسی تونل مناسب است.

همچنین نتایج برای تابع حالت حدی سوم و با استفاده از روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه دوم و شبیه‌سازی مونت کارلو به‌ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

علاوه بر این، خلاصه نتایج برای سه تابع حالت حدی کشش پیچ‌سنگ، همگرایی تونل و ناحیه پلاستیک شدگی با استفاده از سه روش قابلیت اعتماد شبیه‌سازی مونت کارلو، روش قابلیت اعتماد مرتبه اول و روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم در جدول ۲ آمده است. بنابراین دستورالعمل ارائه شده می‌تواند برای تحلیل احتمالاتی سایر مسائل پیرامون تونل-سازی نیز به‌کار گرفته شود.

به‌همین ترتیب، برای تابع حالت حدی سوم یعنی شعاع پلاستیک شدگی، نتایج زیر به‌دست آمده است. ضمن این‌که رابطه شعاع پلاستیک شدگی  $\frac{r_p}{r_0}$  مطابق با رابطه‌ی زیر است:

$$\frac{r_p}{r_0} = \left[ \frac{\tau(p_1+s)}{(k+1)(p_1+s)} \right]^{1/(k-1)} \quad (21)$$

که در آن:  $r_p$  شعاع ناحیه پلاستیک‌شدگی و مقادیر  $S$  و  $k$  از روابط زیر به‌دست می‌آیند.

$$S = \frac{\sigma_c}{k-1} \quad (22)$$

$$k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (23)$$

برای تابع حالت حدی سوم و با استفاده از روش قابلیت اعتماد مرتبه اول احتمال شکست برابر است با  $0.2\%$  و

```
Output
| -0.828792 |
| -0.559557 |

Computing the random variable sensitivities...
Random variable sensitivities are computed successfully.

The reliability index:
Beta = 2.87072

The probability of failure:
pf = 0.00204772

##### FORM ANALYSIS DONE IN 0.235 SECONDS.
```

شکل ۱۰: خروجی نرم افزار RT برای  $G_3(x)$  با روش قابلیت اعتماد مرتبه اول

```
Output
pf = 0.00204772

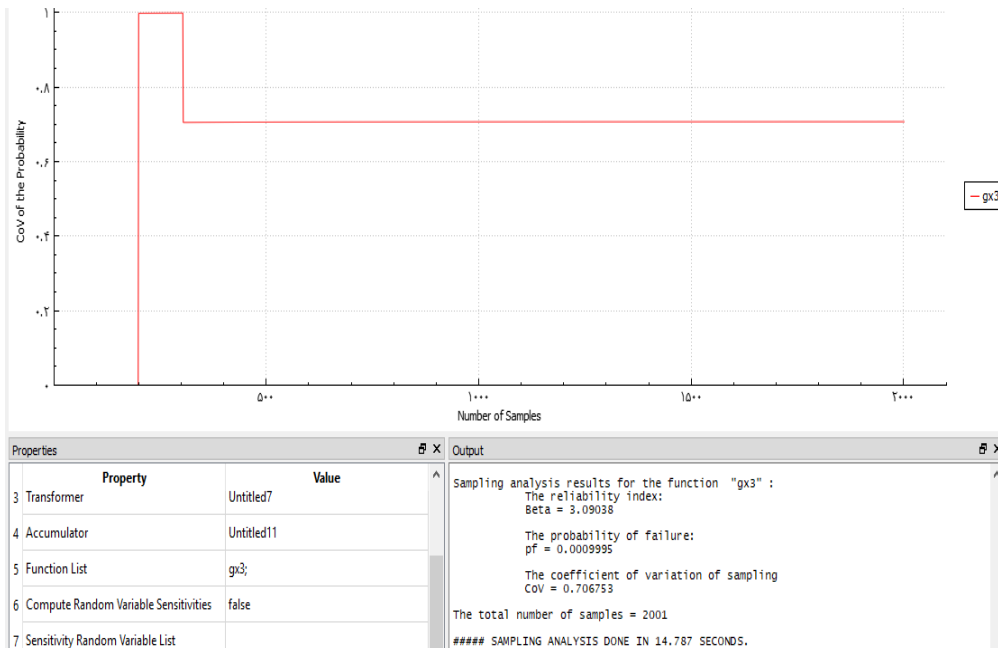
The last two trial points in the search for the design point in FORM are employed to
The first principal curvature:
kappa = -0.71688

Corrected probability of failure according to Breitung's improved formula:
pf = 0.00204772

Corresponding reliability index:
Beta = 2.87072

##### FORM ANALYSIS DONE IN 0.25 SECONDS.
```

شکل ۱۱: خروجی نرم افزار RT برای  $G_3(x)$  با روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم



شکل ۱۲: خروجی نرم افزار RT برای  $G_3(x)$  با روش شبیه‌سازی مونت کارلو

جدول ۲- نتایج کلی احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد برای سه تابع حالت حدی

شاخص قابلیت اعتماد			احتمال شکست			روش
$G_3(x)$	$G_2(x)$	$G_1(x)$	$G_3(x)$	$G_2(x)$	$G_1(x)$	
۲/۸۷۰۷۲	۱/۲۴۶۳	۱/۳۳۸۴۵	۰/۰۰۲۰۴۷۷۲	۰/۰۱۰۶۳۲۸	۰/۰۹۰۳۷۵۶	روش قابلیت اعتماد مرتبه اول
۲/۸۷۰۷۲	۱/۳۶۳۵	۲/۱۷۴۰۶	۰/۰۰۲۰۴۷۷۲	۰/۰۸۶۳۶۳۳	۰/۴۸۵۰۵/۰۱	روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم
۳/۰۹۰۳۸	۱/۴۲۴۴۸	۲/۲۳۸۳۶	۰/۰۰۰۹۹۹۵	۰/۰۷۷۱۵۳۸	۰/۰۱۲۵۹۸۷	روش شبیه‌سازی مونت کارلو

## ۷- نتیجه‌گیری

- به‌منظور کاربرد روش‌های قابلیت اعتماد (روش‌های مرتبه اول قابلیت اعتماد، روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم و روش شبیه‌سازی مونت کارلو) از برنامه کامپیوتری RT استفاده شد. تحلیل‌ها نشان داد روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم نسبت به روش قابلیت اعتماد مرتبه اول دقت بیشتری دارد. البته روش شبیه‌سازی مونت کارلو با توجه به داده‌سازی زیادی که در دامنه پارامترها انجام می‌دهد، می‌تواند نسبت به روش‌های دیگر خطای کمتری داشته باشد.
- با کمک این برنامه و بردارهای اهمیت، پارامترهای مهم در ایمنی یا ریزش فضای زیرزمینی را شناسایی کرده که بعد از آن می‌توان احتمال شکست را کمتر و قابلیت اعتماد را به کمک شاخص قابلیت اعتماد بالا برد.
- با افزایش تعداد تکرارهای روش شبیه‌سازی مونت کارلو مشخص می‌شود که در تکرارهای زیاد مقدار انحراف معیار

در مسئله تحلیل پایداری تونل، نامعینی و تغییرپذیری ذاتی در پارامترهای مقاومتی خاک و سنگ به شکل محسوس دیده می‌شود. علاوه بر این سایر خطاها نظیر خطاهای اندازه‌گیری و تقریب در مدل، باعث ایجاد خطای غیرقابل اجتناب و سبب می‌شود که بحث تحلیل احتمالاتی مفهوم پیدا کند. در این مقاله مقادیر احتمال شکست برای سه تابع حالت حدی کشش پیچ‌سنگ، همگرایی تونل و ناحیه پلاستیک‌شدگی با استفاده از سه روش قابلیت اعتماد شبیه‌سازی مونت کارلو، روش قابلیت اعتماد مرتبه اول، روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم تجزیه و تحلیل شد.

به‌طور خلاصه نتایج این مقاله به شرح زیر است:

elastic-strain-softening rock mass. *Tunn Undergr Sp Tech* 60:66-79

[11]. Liu H, Low BK (2017) System reliability analysis of tunnels reinforced by rockbolts. *Tunnelling and Underground Space Technology* 65:155-166

[12]. Chen F, Wang L, Zhang W (2019) Reliability assessment on stability of tunnelling perpendicularly beneath an existing tunnel considering spatial variabilities of rock mass properties. *Tunn Undergr Sp Tech* 88:276-289

[13]. Lü Q, Low BK (2011) Probabilistic analysis of underground rock excavations using response surface method and SORM. *Comput Geotech* 38 (8):1008-1021

[14]. Liu W, Luo X, Huang J, Hu L, Fu M (2018) Probabilistic analysis of tunnel face stability below river using Bayesian framework. *Mathematical Problems in Engineering* 2018

[15]. Lü Q, Xiao Z-P, Ji J, Zheng J, Shang Y-Q (2017) Moving least squares method for reliability assessment of rock tunnel excavation considering ground-support interaction. *Comput Geotech* 84:88-100

[16]. Lü Q, Xiao Z-P, Ji J, Zheng J (2017) Reliability based design optimization for a rock tunnel support system with multiple failure modes using response surface method. *Tunnelling and Underground Space Technology* 70:1-10

[17]. Saboya Jr F, da Glória Alves M, Pinto WD (2006) "Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic". *Eng Geol* 86 (4):211-224

[18]. Liu H, Small JC, Carter JP (2008) Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region. *Tunn Undergr Sp Tech* 23 (4):399-420

[19]. Liu H, Li P, Liu J (2011) Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction. *Tunn Undergr Sp Tech* 26 (2):276-283

[20]. Haldar A, Mahadevan S (2000) Probability, reliability, and statistical methods in engineering design. John Wiley,

[21]. Mahsuli M (2012) Probabilistic models, methods, and software for evaluating risk to civil infrastructure. Ph. D. dissertation.

[22]. Low BK, Einstein H (2013) Reliability analysis of roof wedges and rockbolt forces in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 38:1-10

[23]. Bobet A, Einstein H (2011) Tunnel reinforcement with rockbolts. *Tunn Undergr Sp Tech* 26 (1):100-123

کاهش می‌یابد. به عبارتی دیگر از پراکندگی جواب‌ها کاسته شده و سبب می‌شود که نتایج قابل اعتمادتری به دست آید.

• نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش‌های قابلیت اعتماد به کار گرفته شده در برنامه کامپیوتری RT می‌تواند به عنوان یک دست‌ور العمل قوی در تحلیل مسائل فضاهای زیرزمینی به کار گرفته شود.

## مراجع

[1]. Lü Q, Chan CL, Low BK (2013) System reliability assessment for a rock tunnel with multiple failure modes. *Rock mechanics and rock engineering* 46 (4):821-833

[2]. Park K-H (2005) Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays. *Tunn Undergr Sp Tech* 20 (3):249-261

[3]. Li H-Z, Low BK (2010) Reliability analysis of circular tunnel under hydrostatic stress field. *Comput Geotech* 37 (1-2):50-58

[4]. FAMA MED (1993) Numerical modeling of yield zones in weak rock. In: *Analysis and design methods*. Elsevier, pp 49-75

[5]. Carranza-Torres C (2004) Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41 (SUPPL. 1):1-11

[6]. Fattahi H, Shojaee S, Ebrahimi Farsangi MA, Farshidianfar A, Soheili S, Cheng W, Liu F, Li L, Rahami H, Kaveh A optimal design of truss bridges using teaching-learning-based optimization algorithm.

[7]. Low B, Tang WH (2007) Efficient spreadsheet algorithm for first-order reliability method. *Journal of engineering mechanics* 133 (12):1378-1387

[8]. Mollon G, Dias D, Soubra A-H (2009) Probabilistic analysis and design of circular tunnels against face stability. *International Journal of Geomechanics* 9 (6):237-249

[9]. Hoek E (1998) Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 35 (1):63-68

[10]. Song L, Li H-Z, Chan CL, Low BK (2016) Reliability analysis of underground excavation in