

## (مقاله پژوهشی)

## جانمایی بهینه تونل‌های غیر هم‌سطح با استفاده از یک رویکرد جدید احتمالاتی

هادی فتاحی\*<sup>۱</sup>، حسین قانلی<sup>۱</sup>، فرشاد ملک محمودی<sup>۱</sup><sup>۱</sup>- گروه مهندسی ژئومکانیک، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، مرکزی، ایران

(دریافت: فروردین ۱۴۰۰، پذیرش: مهر ۱۴۰۰)

## چکیده

یکی از مباحث مهم در طراحی تونل‌های غیر هم‌سطح، تعیین جانمایی بهینه تونل‌ها نسبت به هم هست. این موضوع در مناطق متراکم شهری که اغلب به صورت تونل‌های غیرمسلح انجام می‌شود، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در این تحقیق به منظور جانمایی بهینه از دو عامل نشست سطح زمین و پایداری (ضریب ایمنی) تونل‌ها استفاده شده است. جانمایی بهینه تونل‌های غیر هم‌سطح در شرایط متنوع زمین‌شناسی بایستی از روش‌های احتمالاتی و قابلیت اعتماد استفاده کرد. از طرفی آگاهی از میزان تأثیر هر یک از پارامترهای طراحی در مقدار نشست سطح زمین و ضریب ایمنی می‌تواند منجر به کاهش صدمات سازه‌های سطحی شود. در این مقاله از نرم‌افزار المان محدود PLAXIS<sup>3D</sup> جهت مطالعه حالت‌های مختلف تونل‌های غیر هم‌سطح استفاده شده است. سپس به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی دو تابع حالت حدی به صورت جدا برای ضریب ایمنی و حداکثر نشست سطح زمین تخمین زده شده است. در ادامه با استفاده از دو تابع حالت حدی به دست آمده از مرحله‌ی قبل و روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول و شبیه‌سازی مونت کارلو در نرم‌افزار RT بهترین جانمایی برای حفر تونل جدید نسبت به تونل قبلی (موجود) بر مبنای داشتن بیشترین ضریب ایمنی و کمترین نشست سطح زمین پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که احتمال شکست تونل اول (موجود) تقریباً ۰/۳ درصد بوده و از نظر پایداری و عکس‌العمل نسبت به موقعیت بهینه تونل جدید شرایط ایده‌آلی خواهد داشت.

## کلمات کلیدی

تونل‌های غیر هم‌سطح، الگوریتم جستجوی هارمونی، شبیه‌سازی مونت کارلو، قابلیت اعتماد مرتبه اول، نرم‌افزار PLAXIS<sup>3D</sup>

\*عهده‌دار مکاتبات: h.fattahi@arakut.ac.ir

## ۱- مقدمه

در چند سال اخیر با افزایش دانش بشر در ساخت فضاهای زیرزمینی، پیشرفت فناوری و همچنین به دلایل مسائل سیاسی، امنیتی و اقتصادی توجه بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه به احداث سازه‌های زیرزمینی برای کاربردهای عمرانی، نظامی و معدنی معطوف شده است. یکی از این سازه‌ها که در چند دهه‌ی اخیر بسیار مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گرفته، تونل‌های شهری است که با گسترش شهرنشینی و افزایش جمعیت در شهرهای بزرگ، جهت تسهیل رفت‌وآمد شهروندان احداث شده و به دلیل دارا بودن فواید بسیاری همچون کوتاه شدن مسیرها، بهبود ترافیک و کاهش مشکلات زیست‌محیطی و استفاده‌ی عموم مردم روزبه‌روز بیشتر می‌شود. از طرفی با توجه به محدودیت فضا در محیط‌های متراکم شهری، احداث تونل‌ها در مجاورت یکدیگر و یا به صورت غیر هم‌سطح در عملیات مهندسی تونل جای می‌گیرند. با توجه به پیچیدگی‌های ذاتی تعامل بین ساختار زمین و تونل، ایمنی در ساخت تونل‌های جدید و همچنین تعاملات بین تونل‌های متقاطع، بسیار چالش‌برانگیز و حائز اهمیت است. در طول سالیان اخیر، مطالعاتی بر روی تونل‌های دوقلو با روش‌هایی از قبیل مدل‌سازی فیزیکی، مشاهدات محلی، روش‌های تجربی، تحلیلی و مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است که در این مقاله به مهم‌ترین آن‌ها اشاره خواهد شد. هویاکس و لادانی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۰ با استفاده از نتایج روش المان محدود، اظهار داشته‌اند که در صورتی که نسبت فاصله میان مراکز تونل‌ها به قطر تونل‌ها از ۲/۷ بیشتر باشد، می‌توان از اصل برهم‌نهی جهت پیش‌بینی نشست‌های سطح زمین در اثر ساخت تونل‌های دوقلو استفاده کرد [۱]. در تحقیقی دیگر قابوسی و رانکن<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۷ با استفاده از تحلیل‌های دوبعدی دریافته‌اند که در تونل‌های موازی و غیر هم‌سطح نزدیک به سطح با کاهش فاصله دو تونل از میزان نشست اضافی (در نتیجه اندرکنش تونل‌ها) کاسته می‌شود [۲]. کیم<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۶ جهت بررسی اندرکنش تونل‌های متقاطع غیر هم‌سطح، با ساخت یک مدل فیزیکی، نتایج به دست آمده را با مدل‌های عددی مقایسه کرد و با مقایسه مدل فیزیکی و مدل عددی به نتایج یکسانی دست یافت [۳]. چهادی و شاه‌ارور<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۸ با استفاده از مطالعات عددی به

این نتیجه رسیدند که بیشترین میزان نشست مربوط به تونل‌های روی هم و کمترین میزان نشست مربوط به تونل‌های کنار هم است و حفر تونل جدید در زیر تونل موجود نشست بیشتر را نسبت به حالت عکس ایجاد می‌کند [۴]. لی‌یو، اسمال و کارتر<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۸ با استفاده از روش‌های المان محدود و نرم‌افزارهای ABAQUS و TUNNEL<sup>3D</sup> به بررسی اندرکنش تونل‌های متقاطع پرداختند آن‌ها به این نتیجه رسیدند که حرکت تونل جدید به‌طور قابل‌توجهی بر سیستم نگهداری موجود تأثیر می‌گذارد علاوه بر این، سیستم نگهداری در کنار تونل موجود نزدیک به تونل جدید به‌طور قابل‌توجهی بر روی تونل جدید تأثیر دارد [۵]. توحیدی و صدقیانی<sup>۶</sup> در سال ۱۳۸۹ اولین محققان ایرانی بودند که به بررسی تونل‌های متقاطع غیر هم‌سطح پرداختند. آن‌ها سعی کردند به‌منظور بهترین جانمایی تونل تمامی عوامل مؤثر بر اندرکنش تونل‌های متقاطع غیر هم‌سطح را بررسی کنند. همچنین آن‌ها تأثیر جنس خاک، توالی ساخت، سختی محوری و خمشی، فاصله بین دو تونل، زاویه تقاطع، نوع حفاری و شکل مقطع تونل را بررسی کردند [۶]. چاکری<sup>۷</sup> و همکاران نیز در سال ۲۰۱۱ نتایج یک آنالیز تفاضل محدود سه‌بعدی را برای بررسی تغییرات توزیع تنش، جابه‌جایی و نشست زمین که از حفر تونل دوقلو توحید (در پایین تونل خط چهارم متروی تهران) ممکن است به وجود آید را بررسی کردند [۷]. لی‌یو<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ میزان بالآمدگی تونل موجود را در اثر حفاری تونل جدید در نانجینگ چین را به کمک نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> بررسی کردند و سپس به‌منظور صحت‌سنجی روش‌های عددی، از روش‌های اندازه‌گیری میدانی برای بررسی اثر بالآمدگی تونل موجود بر تونل جدید استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وقتی حجم حفاری اندک باشد، مقادیر بالآمدگی تونل‌های موجود با افزایش حجم حفاری در هر مرحله، به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد [۸]. لی و یوان<sup>۹</sup> در سال ۲۰۱۲ اندرکنش دو تونل متقاطع غیرمسطح را در شرایط زمین‌شناسی پیچیده، به کمک نرم‌افزار عددی المان محدود بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده در تونل موجود بسیار پایین‌تر از مقادیر مجاز از پیش تعریف شده بود و از نظر پایداری در شرایط بسیار مطلوبی قرار داشت [۹]. ساهو و کومار<sup>۱۰</sup> در سال ۲۰۱۳ بر اساس مدل موهر-کولمب و المان‌های سه

قطر کوچک فقط در نزدیکی میدان است اما اثر تونل با قطر بزرگ در نزدیکی میدان و نیز میدان دورتر است [۱۶]. فو<sup>۱۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی پایداری تونل جدید در زیر تونل موجود با استفاده از نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> با توجه به تأثیر شرایط مختلف سنگ در اطراف تونل و همچنین تعیین فاصله‌ی ایمنی برای ساخت تونل جدید پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که کمترین فاصله از تونل جدید ایمن است و بقیه فاصله‌ها به دلیل سنگ‌های شکسته اطراف آن نیاز به نگهداری دارد [۱۷].

همان‌طور که در مطالعات گذشته مشاهده شد، تحلیل اندرکنش‌ها، فاصله بهینه بین تونل‌ها، نشست سطح زمین و پایداری تونل‌ها با استفاده از پارامترهای قطعی صورت گرفته است. به این مفهوم که یک مقدار میانگین برای تمام پارامترهای مؤثر در نظر گرفته می‌شود و نتیجه تحلیل و مدل‌سازی حاصل از آن نیز به صورت یک مقدار مشخص و قطعی بیان می‌شود که بدیهی است با توجه به وجود عدم قطعیت ذاتی در پارامترهای طراحی، نتایج حاصله بیانگر رفتار کل منطقه مورد مطالعه نخواهد بود. لذا استفاده از یک مقدار مشخص و قطعی برای پارامترهای طراحی ممکن است انطباق نتایج تحلیل‌های انجام شده (به صورت قطعی) با واقعیت را با چالش مواجه کند. بر این اساس به منظور بررسی عدم قطعیت موجود در پروژه باید ابتدا مجموعه‌ای از داده‌ها ایجاد شود سپس هر یک از مقادیر اندازه‌گیری شده به عنوان متغیر شناخته می‌شود که به دلیل ماهیت تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی بودن پارامترها، با عنوان متغیرهای تصادفی معرفی می‌شوند. با این توضیحات، اخیراً پژوهشگران با استفاده از روش‌های قابلیت اعتماد در تحلیل فضاهای زیرزمینی مطالعاتی انجام داده‌اند که به مهم‌ترین آن‌ها اشاره خواهد شد. وانگ<sup>۱۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۰، تلفیقی از مدل تجربی و یک مدل تصحیح‌شده‌ی توزیع گوسی را برای پیش‌بینی شکل منحنی نشست و بیشینه نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل در زمین‌های نرم ارائه نمودند. سپس معادلات به دست آمده برای یک تونل را به دو تونل (دوقلو) تعمیم دادند. تصحیح مدل نشست توزیع گوسی، بر پایه‌ی تحلیل‌های نرم‌افزار FLAC صورت گرفته است [۱۸]. فانگ<sup>۱۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ به کمک روش‌های قابلیت اعتماد، اندرکنش بین تونل‌های متقاطع را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۹]. ژانگ<sup>۲۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ تابع حالت حدی را با استفاده از رگرسیون چند متغیره برای پیش‌بینی

گرهی مثلثی به بررسی پایداری تونل‌های دوقلو در شرایطی که محیط زهکشی شده و تراز آب پایین‌تر از کف تونل‌ها بود، پرداختند [۱۰]. دو<sup>۱۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ با مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup>، اثر حفاری تونل جدید به موازات و هم‌سطح تونل موجود را شبیه‌سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که با در نظر گرفتن تمام پارامترهای هندسی و فیزیکی تونل از نظر پایداری در شرایط مطلوبی قرار دارد [۱۱]. بونیارک<sup>۱۲</sup> در سال ۲۰۱۴ عوامل مؤثر بر اندرکنش تونل‌ها، ناشی از حفر تونل جدید را با استفاده از روش‌های اجزا محدود مورد بررسی قرار داد آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نسبت قطر به عمق یکی از پارامترهای اساسی در پایداری و تعامل میان دو تونل است که در این مطالعه این نسبت بیش از حد مجاز بوده و تونل نیاز به سیستم نگهداری دارد [۱۲]. شری‌زاده و دهقان<sup>۱۳</sup> در سال ۱۳۹۵ به بررسی و تعیین بهترین توالی حفر در محدوده تقاطع تونل‌های خط ۶ و ۷ مترو تهران پرداختند. آن‌ها برای صحت و تأیید کار خود داده‌های ورودی نرم‌افزار المان محدود را با داده‌های ابزار دقیق مقایسه کردند. مطابق تحقیق انجام شده، بهترین توالی حفر در این تقاطع، حفر تونل کم‌عمقی به فاصله حداقل ۱۰D قبل از حفاری تونل عمیق است [۱۳]. شیرین‌آبادی و موسوی<sup>۱۴</sup> در سال ۲۰۱۶ به پایداری تونل دوقلوی مترو شیراز به کمک روش اجزا محدود پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تونل‌های دوقلو در زیر بارهای استاتیک و دینامیک کاملاً ناپایدار هستند و نیاز به سیستم نگهداری دارند [۱۴]. لیانگ<sup>۱۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ از یک روش تحلیلی برای مطالعه اثرات عبور تونل جدید متقاطع از بالای تونل موجود استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تحلیل انجام شده به کمک روش تحلیلی با روش مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده نتیجه یکسان دارد [۱۵]. سینگ<sup>۱۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ به نقش فاصله بین تونل دوقلو و قطر تونل در پایداری آن به روش المان محدود پرداختند. در این مطالعه، به‌طور کلی نود شبیه‌سازی برای بررسی فاصله بحرانی تونل دوقلو در توده سنگ گرانیتی انجام شد. قطر تونل دوقلو از ۲ متر تا ۱۰ متر متغیر در نظر گرفته شد و همچنین فاصله آن‌ها از ۰/۲ تا ۲ برابر قطر متغیر در نظر گرفته شد. نتیجه این تحقیق نشان داد که حداقل فاصله دو تونل نسبت به هم باید ۰/۸ برابر قطر تونل باشد. همچنین مشخص شد که اثرات تونل با

به‌وسیله تئوری قابلیت اعتماد موردبررسی قرار گیرد و به‌عنوان جایگزین مناسبی برای روش کلاسیک طراحی بهینه تونل‌ها مطرح شود. در این روش، عملکرد هر تونل می‌تواند توسط تابعی از متغیرهای تصادفی اصلی از تونل، به نام تابع حالت حدی بیان شود. به‌طوری‌که مقدار مثبت تابع حالت حدی بیانگر ایمنی تونل و مقدار منفی تابع حالت حدی بیانگر گسیختگی تونل است. ارزیابی احتمال شکست، مسئله‌ای اساسی و مهم در تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌های است. احتمال شکست می‌تواند به‌صورت زیر فرمول‌بندی شود:

$$P_f = P(G(X) \leq 0) = \int_{G(X) \leq 0} f(X) dx \quad (1)$$

به‌طوری‌که  $X$  برداری از متغیرهای تصادفی مسئله قابلیت اعتماد را بیان می‌کند،  $f(X)$  بیانگر تابع چگالی احتمال مشترک در فضای اصلی مسئله است. محاسبه مستقیم این انتگرال بسیار دشوار است؛ لذا در دهه‌های گذشته روش‌های مختلف زیادی برای حل این انتگرال ارائه شده‌اند؛ بنابراین به‌جای محاسبه انتگرال برای به دست آوردن احتمال شکست و خرابی تونل، از پارامتر دیگری به نام شاخص قابلیت اعتماد ( $\beta$ ) استفاده می‌شود. به‌این‌ترتیب، تنها در روش مرتبه اول به تابعی خطی تبدیل خواهد شد و با محاسبه میانگین و انحراف معیار تابع حالت حدی، شاخص قابلیت اعتماد با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (2)$$

که در آن،  $\mu_g$  و  $\sigma_g$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار تابع حالت حدی هستند. با داشتن شاخص قابلیت اعتماد، احتمال شکست از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P(f) = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (3)$$

که در آن،  $\Phi$  تابع توزیع تجمعی نرمال است. در اکثر موارد برای اندازه‌گیری قابلیت اعتماد، روش‌های مختلفی همچون قابلیت اعتماد مرتبه اول و دوم و یا روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو وجود دارد. در روش قابلیت اعتماد مرتبه اول با در نظر گرفتن بسط مرتبه اول سری تیلور برای تابع حالت حدی محاسبه احتمال گسیختگی ساده می‌شود. در این روش اطلاعات ممان اول و دوم (میانگین و واریانس) استفاده می‌شود. قابلیت اعتماد مرتبه اول در صورتی‌که تابع حالت حدی خطی باشد روشی مناسب است.

ضریب ایمنی دو فضای زیرزمینی ارائه دادند. سپس آنالیز احتمالاتی دو فضای زیرزمینی با کمک روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تابع حالت حدی به‌دست‌آمده از مرحله‌ی قبل انجام شده است [۲۰]. لو<sup>۲۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ به یک روش علمی برای ارزیابی قابلیت اطمینان تونل‌های سنگی با استفاده از روش‌های نوین حداقل مربعات و طراحی یکنواخت دست یافتند. همچنین احتمال خرابی تونل توسط قابلیت اطمینان مرتبه اول و مرتبه دوم محاسبه شد سپس برای نشان دادن امکان‌سنجی و اعتبار این روش با استفاده از روش‌های عددی احتمال ریزش تونل را بر روی یک تونل غیر دایره‌ای انجام دادند [۲۱]. لیو و لو<sup>۲۲</sup> در سال ۲۰۱۷ تحلیل احتمالاتی تونل‌های سنگی تقویت شده توسط پیچ‌سنگ را با استفاده از روش قابلیت اعتماد مرتبه اول، روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی موردبررسی قرار دادند [۲۲]. قاسمی<sup>۲۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ قابلیت اعتماد تونل‌های دایره‌ای شکل را بر پایه فاکتور طراحی بار - مقاومت ارائه کردند با انجام این روش، طیف یکنواخت از شاخص‌های قابلیت اطمینان بر اساس احتمال ارائه شده است [۲۳]. داک فی<sup>۲۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ به آنالیز قابلیت اعتماد تونل‌های عمیق با رفتار وابسته به زمان در محیط ویسکوالاستیک پرداختند. آن‌ها برای این ارزیابی از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، نرم‌افزار المان محدود و همچنین روابط فرم بسته ریاضی استفاده کردند [۲۴]. فانگ و سو<sup>۲۵</sup> در سال ۲۰۲۰ طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد برای برآورد تأثیرات عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی در تونل‌سازی را موردبررسی قرار دادند [۲۵].

با توجه به مطالعات فوق، تاکنون مسئله اندرکنش بین تونل‌ها و به دنبال آن جانمایی بهینه برای حفر تونل جدید (و تأثیر آن بر تونل موجود) به‌صورت آنالیز احتمالاتی مطالعه‌ای انجام نشده است. در این مقاله، با ارائه یک روش جدید و با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف (PLAXIS3D, RT, MATLAB) به این مسئله مهم در حوزه مهندسی تونل پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مفهوم قابلیت اعتماد

احتمال شکست تونل‌ها، یکی از موضوعات اصلی در مهندسی ژئوتکنیک و معدن است. این موضوع می‌تواند

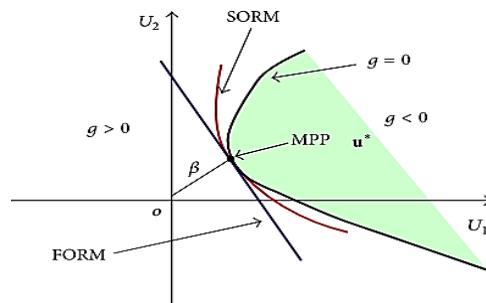
قابلیت اعتماد مسئله موردنظر از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و روش قابلیت مرتبه اول استفاده خواهد شد.

## ۲-۲- الگوریتم فرا ابتکاری هارمونی<sup>۲۶</sup>

در چهار دهه گذشته الگوریتم‌های زیادی برای حل کردن مسائل بهینه‌سازی مهندسی ارائه شده‌اند که بیشتر آن‌ها بر اساس روش‌های برنامه‌ریزی عددی خطی و غیرخطی هستند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی عددی در یافتن بهینه سراسری در مدل‌های ساده و ایده‌آل مفیدند اما در مواجهه با مسائل بهینه‌سازی واقعی و پیچیده محدودیت‌هایی داشته و کارایی لازم را ندارند؛ بنابراین برای رسیدن به جواب منطقی و درست از الگوریتم‌های فرا ابتکاری بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها در بهینه‌سازی از پدیده‌های طبیعی تقلید می‌کنند [۱۹]. الگوریتم جستجوی هارمونی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های فرا ابتکاری اولین بار با الهام از پدیده موسیقی توسط گیم و همکاران در سال ۲۰۰۱ ارائه شد [۱۴]. همان‌گونه که آهنگ‌ساز به دنبال یافتن زیباترین آهنگ است، در فرآیند بهینه‌سازی الگوریتم جستجوی هارمونی نیز به دنبال یافتن بهترین جواب برای مسئله است. مناسب بودن جواب در فرآیند بهینه‌سازی با بررسی تابع هدف تعیین می‌شود. این الگوریتم در مقایسه با دیگر روش‌های بهینه‌سازی عددی برتری‌هایی دارد. برای مثال این الگوریتم در پیدا کردن نقاط بهینه نسبت به سایر الگوریتم‌ها بهتر عمل کرده و از به دام افتادن آن‌ها جلوگیری می‌کند و توانایی کار با متغیرهای گسسته را نیز دارند. همچنین این الگوریتم از برخی ویژگی‌های سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند حفظ بردارهای قبلی، حفظ حافظه هارمونی از شروع تا پایان و ارزیابی چندین بردار در یک‌زمان نیز استفاده می‌کند؛ اما در مقایسه با آن‌ها پیش‌نیازهای ریاضی کم‌تری به‌کاربرده و توانایی حل مسایل مختلف بهینه‌سازی را دارد. گام‌های عمده و اصلی الگوریتم جستجوی هارمونی برای بهینه‌سازی مسئله موردنظر به‌صورت زیر است [۹؛ ۱۰؛ ۱۱؛ ۱۲].

- گام (۱) مقداردهی اولیه به مسئله و پارامترهای الگوریتم
- گام (۲) مقداردهی اولیه به حافظه هارمونی
- گام (۳) تعبیه‌ی یک هارمونی جدید
- گام (۴) بروز رسانی حافظه هارمونی
- گام (۵) چک و بررسی معیار نهایی

زمانی که سطح شکست به‌صورت غیرخطی باشد، استفاده از قابلیت اعتماد مرتبه اول در جهت برآورد شاخص ایمنی مؤثر و دقیق نیست. لذا در این مورد استفاده از روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم پیشنهاد شده است و با استفاده از بسط مرتبه دوم تابع شرایط حدی، احتمال شکست محاسبه‌شده توسط روش مرتبه اول اصلاح می‌شود. علی‌رغم سادگی، روش‌های مبتنی بر شاخص قابلیت اعتماد دارای معایبی از جمله: وابستگی پاسخ به نقطه شروع جستجو، لزوم خطی‌سازی تابع شرایط حدی، لزوم انتقال متغیرها به فضای نرمال استاندارد و نیز همگرا شدن به پاسخ بهینه محلی برای مسائل با چندین نقطه طراحی هستند [۴]. مطابق شکل ۱ باید توجه داشت که ممکن است نتایج روش‌های مرتبه دوم نیز برای شاخص قابلیت اعتماد بالا (احتمال شکست کم) و همچنین انحنای زیاد تابع شرایط حدی، نادرست باشد. این روش‌ها در بررسی قیده‌های غیرخطی محدب (یا مقعر) احتمال شکست را کمتر (یا بیشتر) از مقدار واقعی تخمین می‌زنند؛ که موجب طرح نایمن خواهد شد. از این‌رو در بررسی مسائل غیرخطی شامل متغیرهای تصادفی با توزیع غیر نرمال، استفاده از روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.



شکل ۱- مقایسه تقریب مرتبه اول و دوم قابلیت اعتماد

به‌عنوان قدیمی‌ترین و پرکاربردترین روش شبیه‌سازی، می‌توان به روش شبیه‌سازی مونت کارلو اشاره نمود. این روش دقیق‌ترین روش تخمین احتمال شکست است که بر پایه تولید نمونه‌های تصادفی بر اساس تابع چگالی احتمال هر متغیر بنا نهاده شده است. احتمال شکست یک سیستم در روش شبیه‌سازی مونت کارلو، از تقسیم تعداد نقاط واقع در ناحیه خرابی بر تعداد کل نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده به دست می‌آید. در تمامی این روش‌ها محاسبه احتمال شکست رابطه تابع حالت حدی باید به‌صورت دقیق و صریح باشد تا نتایج قابل استناد باشد. در این مقاله جهت آنالیز

مرزی تعیین خواهد شد که در ادامه به توضیح هر یک از این موارد پرداخته خواهد شد.

### ۲-۳-۱ پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی تونل‌های

#### دوقلو غیر هم‌سطح

در نرم‌افزار PLAXIS<sup>3D</sup> برای رسیدن به جانمایی بهینه تونل (کمترین نشست و بیشترین ضریب اطمینان) علاوه بر خواص مواد باید هندسه تونل در شرایط مختلفی مدل شود تا بهترین حالت برای تونل جدید به دست آید. با استفاده از معیار هوک براون و مطابق با جدول ۱ پارامترهای ورودی (شاخص دوام زمین‌شناسی (GSI)، شاخص ماده سنگ ( $m_i$ ), مقاومت فشاری سنگ بکر ( $\sigma_i$ ), فاصله سطح زمین تا تونل (H), قطر تونل موجود ( $D_1$ ), قطر تونل جدید ( $D_2$ ) و فاصله مرکز به مرکز دو تونل (h) برای ۳۲ حالت تونل‌های دوقلو غیر هم‌سطح مدل‌سازی عددی انجام شد؛ و چگالی توده سنگ برابر  $2400 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شد.

در این مقاله، پس از مدل‌سازی تونل‌های غیر هم‌سطح در حالت‌های مختلف و محاسبه ضریب ایمنی و ماکزیمم نشست به کمک نرم‌افزار عددی PLAXIS<sup>3D</sup>، برای به دست آوردن توابع حالت حدی و مدل پیش‌بینی شده از الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی هارمونی استفاده می‌شود. در نهایت مدل به دست آمده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی و مدل اجرایشده توسط نرم‌افزار PLAXIS<sup>3D</sup> باهم مقایسه شده که در صورتی که عملکرد دو مدل به یکدیگر نزدیک باشند توابع حالت حدی مورد تأیید می‌باشند که می‌توان از این توابع در روش‌های قابلیت اعتماد و نرم‌افزار RT در جهت تحلیل احتمالاتی تونل‌های مدنظر استفاده کرد.

### ۲-۳-۲ مدل‌سازی عددی تونل‌های غیر هم‌سطح

ساخت مدل عددی در تمامی نرم‌افزارها تقریباً روند یکسانی را دارند. به این صورت که ابتدا مدل هندسه ترسیم و سپس خصوصیات مواد برای هر لایه اختصاص داده می‌شود و هندسه مدل مش‌بندی می‌شود و در پایان شرایط

جدول ۱- مشخصات پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی عددی تونل‌های دوقلو غیر هم‌سطح

شماره مدل عددی	$\sigma_i$ (MPa)	$m_i$	GSI	H(m)	$D_1$ (m)	$D_2$ (m)	h(m)	$E_m$ (GPa)	$\nu$
۱	۳۰	۱۰	۵۰	۴۰	۱۵	۶	۵	۳٫۵۶	۰٫۳۴۵
۲	۵۰	۱۰	۱۰	۲۰	۱۲	۱۵	۶	۴٫۵۹	۰٫۴۲۵
۳	۷۰	۵	۵۰	۳۰	۹	۱۵	۱۸	۵٫۴۳	۰٫۳۶
۴	۵۰	۲۰	۷۰	۱۰	۹	۹	۱۲	۲٫۴۷	۰٫۲۷۵
۵	۳۰	۲۰	۳۰	۳۰	۶	۱۲	۶	۲٫۷۳	۰٫۳۵۵
۶	۳۰	۱۰	۳۰	۲۰	۹	۹	۵	۱٫۹۱	۰٫۳۸۵
۷	۷۰	۱۰	۱۰	۳۰	۶	۹	۳۰	۲٫۹۲	۰٫۴۲۵
۸	۱۰	۱۰	۵۰	۱۰	۹	۱۲	۱۲	۱٫۵۸	۰٫۳۴۵
۹	۵۰	۲۰	۱۰	۳۰	۱۵	۶	۱۲	۴٫۵۹	۰٫۳۹۵
۱۰	۱۰	۵	۱۰	۱۰	۶	۶	۵	۰٫۶۳	۰٫۴۴
۱۱	۷۰	۱۰	۷۰	۱۰	۱۲	۶	۶	۴٫۱۸	۰٫۳۰۵
۱۲	۵۰	۱۵	۵۰	۳۰	۱۲	۱۲	۵	۳٫۵۳	۰٫۳۳
۱۳	۵۰	۱۰	۷۰	۴۰	۶	۱۲	۱۸	۳٫۵۳	۰٫۳۰۵
۱۴	۵۰	۵	۵۰	۲۰	۱۵	۹	۶	۴٫۵۹	۰٫۳۶
۱۵	۳۰	۵	۱۰	۴۰	۱۲	۱۲	۱۲	۲٫۷۳	۰٫۴۴
۱۶	۱۰	۱۰	۳۰	۳۰	۱۵	۱۵	۱۲	۱٫۵۴	۰٫۳۸۵
۱۷	۱۰	۲۰	۵۰	۴۰	۶	۹	۶	۱٫۱۰	۰٫۳۱۵
۱۸	۷۰	۱۵	۵۰	۲۰	۶	۶	۱۲	۱٫۶۷	۰٫۳۳
۱۹	۱۰	۱۵	۱۰	۴۰	۹	۱۵	۶	۲٫۰۵	۰٫۴۱
۲۰	۵۰	۵	۳۰	۴۰	۹	۶	۳۰	۲٫۴۷	۰٫۴
۲۱	۷۰	۵	۳۰	۱۰	۱۵	۱۲	۶	۵٫۴۳	۰٫۴
۲۲	۳۰	۱۵	۷۰	۳۰	۹	۶	۶	۱٫۹۱	۰٫۲۹

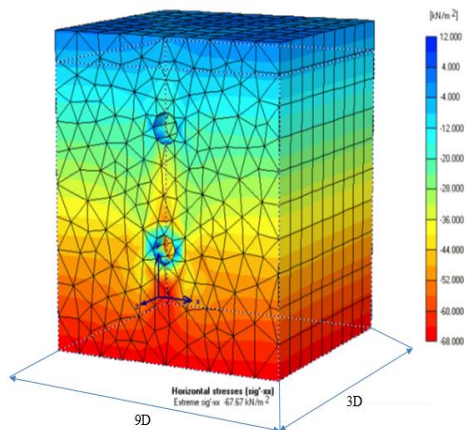
ادامه جدول ۱- مشخصات پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی عددی تونل‌های دوقلو غیر هم‌سطح

شماره مدل عددی	$\sigma_i$ (MPa)	$m_i$	GSI	H(m)	$D_1$ (m)	$D_2$ (m)	h(m)	$E_m$ (GPa)	$\nu$
۲۳	۱۰	۱۵	۷۰	۲۰	۱۵	۱۲	۳۰	۲,۰۵	۰,۲۹
۲۴	۷۰	۲۰	۱۰	۲۰	۹	۱۲	۵	۴,۱۸	۰,۳۹۵
۲۵	۳۰	۱۵	۱۰	۱۰	۱۵	۹	۱۸	۳,۵۶	۰,۴۱
۲۶	۳۰	۲۰	۵۰	۱۰	۱۲	۱۵	۳۰	۳,۵۶	۰,۳۱۵
۲۷	۵۰	۱۵	۳۰	۱۰	۶	۱۵	۵	۴,۵۹	۰,۳۷
۲۸	۷۰	۲۰	۷۰	۴۰	۱۵	۱۵	۵	۵,۴۳	۰,۲۷۵
۲۹	۱۰	۲۰	۳۰	۲۰	۱۲	۶	۱۸	۱,۵۸	۰,۳۵۵
۳۰	۱۰	۵	۷۰	۳۰	۱۲	۹	۵	۱,۵۸	۰,۳۲
۳۱	۷۰	۱۵	۳۰	۴۰	۱۲	۹	۱۲	۴,۱۸	۰,۳۷
۳۲	۳۰	۵	۷۰	۲۰	۶	۱۵	۱۲	۳,۵۶	۰,۳۲

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- نتایج مدل‌سازی عددی

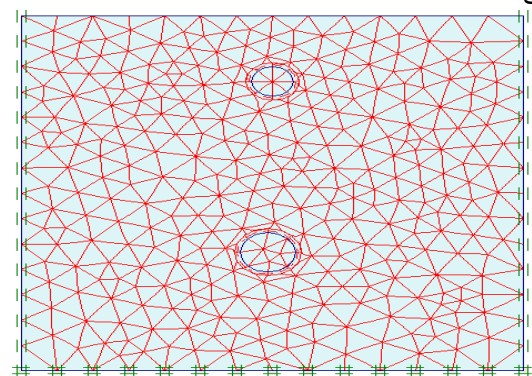
مطابق جدول ۱ طراحی تونل دوقلو باید به‌گونه‌ای انجام شود که دو تونل تأثیر کمتری روی هم داشته و موجب کاهش میزان جابه‌جایی در داخل تونل و افزایش ضریب ایمنی شود. در این مقاله پس از انجام مراحل مدل‌سازی عددی، تحلیل عددی برای ۳۲ حالت مختلف مطابق با جدول ۱ توسط نرم‌افزار *PLAXIS<sup>3D</sup>* انجام شد. به‌عنوان مثال (حالت ۳ جدول ۱) تنش‌های افقی، قائم و برشی در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است. علاوه بر آن همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است تنش کششی در تاج تونل تا سطح زمین ادامه پیدا کرده است و در صورتی‌که تونل دیگری در این میدان تنش قرار بگیرد تونل جدید تحت تأثیر تنش کششی قرار گرفته و از نظر پایداری با مشکل روبه‌رو می‌شود.



شکل ۳- تغییرات تنش افقی از عمق به سطح توسط نرم‌افزار *PLAXIS<sup>3D</sup>* برای حالت

#### ۳-۲- مش‌بندی مدل

در انتخاب بلوک‌های تغییر شکل‌پذیر اساسی‌ترین مسئله انتخاب طول یال بلوک‌های چهاروجهی است که برای مش‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نرم‌افزار *PLAXIS<sup>3D</sup>* برای محاسبه تنش‌ها و جابجایی‌ها در هر بلوک آن را به اجسام کوچک‌تر تقسیم می‌کند. برای مناطقی که از لحاظ شکل هندسی و یا ترکیب زمین‌شناسی پیچیده هستند، باید از طول یال کوچک‌تری استفاده شود. به‌طور کلی انتخاب نحوه مش‌بندی تقابلی بین وضع هندسی، شرایط زمین‌شناسی، کاربرد و اهمیت سازه از یک‌طرف و نحوه تحلیل و حافظه رایانه از طرف دیگر است. هرچه قدر مش ریزتر شود به معنای سختی کمتر و ماتریس سختی ضعیف‌تر است و در برخی مواقع انتخاب مش ریز جواب دقیق‌تر و جزئیات بیشتری را نشان خواهد داد؛ اما مدت‌زمان طولانی تحلیل مانع از این انتخاب می‌شود. در کل بهتر است هر منطقه از مدل را مطابق با شرایط، با طول یال متفاوتی مش‌بندی کرد. شکل ۲ نمایی از مش‌بندی برای حالت ۳ جدول ۱ را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمایی از مش‌بندی مدل عددی

زمین ( $S_{max}$ ) و ضریب ایمنی (S.F)، ناشی از حفر تونل جدید در جدول ۲ نشان داده شده است.

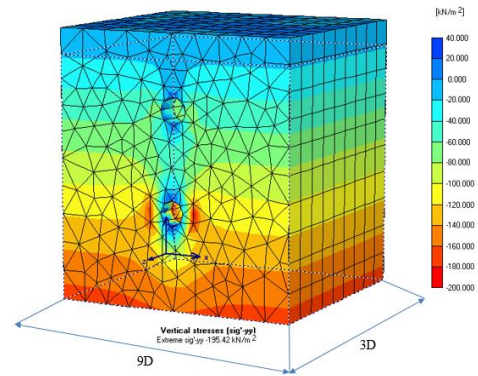
جدول ۲- خروجی (نشست سطح زمین ( $S_{max}$ ) و ضریب ایمنی (S.F)) مدل عددی در نرم‌افزار PLAXIS<sup>3D</sup>

شماره مدل عددی مطابق جدول ۱	ماکزیمم نشست سطح زمین ( $S_{max}$ ) mm	ضریب ایمنی (S.F)
۱	-۰٫۳۵	۳٫۴۲
۲	-۴٫۱۲	۲٫۳۷
۳	-۱٫۵	۷٫۲۲
۴	-۰٫۲۱	۴۱٫۲۱
۵	-۲٫۸	۴٫۰۳
۶	-۱٫۶۵	۵٫۰۱
۷	-۱٫۹	۳٫۵۲
۸	-۱٫۰۹	۱۰٫۱۹
۹	-۱٫۰۱	۱٫۸
۱۰	-۰٫۷۲	۳٫۱
۱۱	-۰٫۰۸	۳۸٫۳۶
۱۲	-۱٫۶۵	۴٫۸۹
۱۳	-۰٫۳۳	۱۲٫۱۸
۱۴	-۰٫۷۴	۷٫۱۲
۱۵	-۴٫۲۶	۱٫۱۹
۱۶	-۴٫۹۸	۲٫۰۲
۱۷	-۱٫۹	۴٫۰۱
۱۸	-۰٫۲۴	۱۱٫۲
۱۹	-۹٫۹۳	۱٫۰۹
۲۰	-۰٫۳۷	۲٫۶
۲۱	-۱٫۶۵	۴٫۹۸
۲۲	-۰٫۲۳	۱۰٫۵۲
۲۳	-۰٫۷۵	۹٫۶۵
۲۴	-۲٫۲۱	۳٫۶۵
۲۵	-۱٫۰۸	۳٫۸
۲۶	-۱٫۳	۱۰٫۸۵
۲۷	-۱٫۹	۹٫۳۸
۲۸	-۱٫۰۱	۱۰٫۹۳
۲۹	-۰٫۳۳	۳٫۲۹
۳۰	-۰٫۷۵	۷٫۲۲
۳۱	-۱٫۳	۲٫۴
۳۲	-۱٫۷۲	۱۴٫۹۵

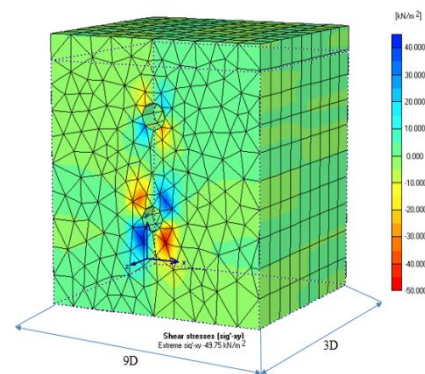
۳-۲- استفاده از روش عددی بر پایه الگوریتم

فرا ابتکاری جستجوی هارمونی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد به دلیل عدم قطعیت در پارامترهای ورودی مدل‌سازی، از روش‌های احتمالاتی

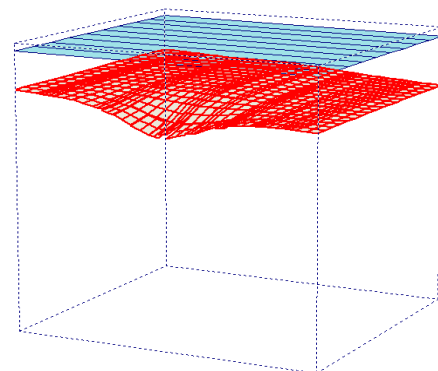


شکل ۴- کنترل تنش عمودی توسط نرم‌افزار PLAXIS<sup>3D</sup> برای حالت ۳



شکل ۵- کنترل تنش برشی توسط نرم‌افزار PLAXIS<sup>3D</sup> برای حالت ۳

پس از مدل‌سازی تنش در اطراف تونل میزان نشست در سطح زمین و همچنین ضریب ایمنی در هر نقطه با توجه به عدم قطعیت، محاسبه می‌شود شکل ۶ نمونه‌ای از میزان نشست سطح زمین به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمونه‌ای از خروجی نشست سطح زمین برای تونل‌های دوقلو غیر هم‌سطح

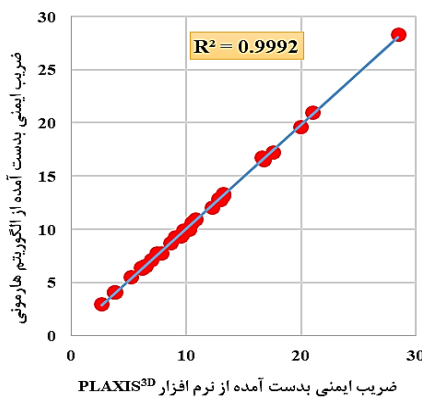
پس از مدل‌سازی برای حالت‌های مختلف جدول ۱، خروجی ۳۲ مدل عددی (ماکزیمم مقدار نشست سطح



$$FS_{algorithm} = (0.5068\sigma_i^{0.6050}) + (m_i^{0.6814}) * (GSI^{0.9706}) * (H^{-0.6930}) * (D_1^{-0.5939}) * (D_2^{-0.0959}) * (h^{0.1342}) \quad (6)$$

$$S_{Max(algorithm)} = (7.9134\sigma_i^{-1.3841}) + (m_i^{0.2479}) + (GSI^{-9.7782}) * (H^{1.4432}) * (D_1^{0.2153}) * (D_2^{6.5401}) * (h^{-0.8523}) \quad (7)$$

پس از به دست آمدن رابطه بهینه ماکزیمم نشست و ضریب ایمنی برای صحت‌سنجی درستی رابطه و ضرایب به‌دست‌آمده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی، مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست‌آمده توسط مدل‌سازی عددی و مدل به‌دست‌آمده توسط الگوریتم هارمونی صورت گرفت. در صورتی که رابطه‌ی بین مدل پیش‌بینی و مدل انجام شده توسط مدل‌سازی عددی دارای اختلاف چشم‌گیری باشد رابطه به‌دست‌آمده جهت محاسبه احتمال شکست توسط نرم‌افزار RT از دقت بالایی برخوردار نخواهد بود. لذا نتایج حاصل از مقایسه‌ی بین مدل پیش‌بینی شده و مدل به‌دست‌آمده توسط مدل‌سازی عددی مطابق شکل ۷ و ۸ به دست آمد. همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است ضریب  $R^2$  برای مقایسه‌ی بین  $FS_{algorithm}$  و  $FS_{PLAXIS}$  برابر ۰٫۹۹۹۲ و به‌طور مشابه ضریب  $R^2$  برای مقایسه‌ی بین  $S_{MAX(algorithm)}$  و  $S_{MAX(PLAXIS)}$  برابر ۰٫۹۹۹۲ است؛ بنابراین نتایج به‌دست‌آمده از شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد که الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی هارمونی دارای قابلیت پیش‌بینی بالایی برای ضریب ایمنی و حداکثر نشست سطح زمین بوده و درصد خطای این الگوریتم در این مطالعه حدود ۰٫۰۱ درصد است.



شکل ۷- مقدار  $R^2$  برای ضریب ایمنی

استفاده می‌شود؛ بنابراین به‌جای محاسبه ضریب ایمنی برای آنالیز احتمالاتی پایداری تونل جدید (حفاری شده در زیر تونل موجود) از احتمال شکست استفاده می‌شود. در این مقاله احتمال شکست تونل با استفاده از نرم‌افزار قدرتمند RT محاسبه می‌شود. از آنجاکه نرم‌افزار RT نیازمند یک تابع حالت حدی درست و دقیق است برای به دست آوردن تابع حالت حدی از الگوریتم فرا ابتکاری هارمونی استفاده می‌شود.

پس از مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار  $PLAXIS^{3D}$ ، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی (ضریب ایمنی و ماکزیمم نشست)، توسط الگوریتم جستجوی هارمونی در نرم‌افزار  $MATLAB$  جهت به دست آوردن تابع حالت حدی بهینه برای بیشترین ضریب ایمنی و کمترین نشست و در جهت ارزیابی نتایج مدل‌سازی عددی فراخوانی می‌شود. از آنجاکه استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری به دلیل تکرار در فرآیند تحلیل، در هر مرحله خطا کمتر می‌شود و به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود از دقت بالاتری برخوردار است و توانایی ساخت روابط خطی و غیرخطی با داشتن چندین پارامتر ورودی را دارند به همین دلیل استفاده از روش‌های هوشمند جایگزین بهتری برای روش‌های رگرسیونی که تنها در یک مرحله به جواب می‌رسند و از خطای بالاتری برخوردار هستند، می‌باشند.

در صورتی که رابطه‌ی بین مدل‌سازی عددی و مدل پیش‌بینی شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی به یکدیگر نزدیک باشد تابع حالت حدی به‌دست‌آمده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی تابعی قابل قبول و درستی است. رابطه‌ی به‌دست‌آمده برای حفر تونل جدید (حفاری شده در زیر تونل موجود) توسط الگوریتم جستجوی هارمونی حاصل از ۳۲ مدل اجرا شده توسط نرم‌افزار عددی مطابق روابط (۴) و (۵) به دست آمد.

$$FS_{algorithm} = (w_1\sigma_i^{w_2}) + (m_i^{w_3}) * (GSI^{w_4}) * (H^{w_5}) * (D_1^{w_6}) * (D_2^{w_7}) * (h^{w_8}) \quad (4)$$

$$S_{Max(algorithm)} = (w_1\sigma_i^{w_2}) + (m_i^{w_3}) + (GSI^{w_4}) * (H^{w_5}) * (D_1^{w_6}) * (D_2^{w_7}) * (h^{w_8}) \quad (5)$$

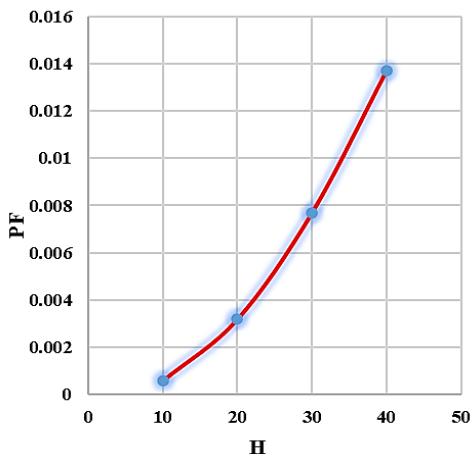
بهینه مقادیر ضرایب روابط ۴ و ۵ توسط الگوریتم جستجوی هارمونی به‌صورت روابط (۶) و (۷) زیر به دست آمد.

پارامترهای هندسی بر احتمال شکست تونل در جدول ۳ نشان داده شده است. با استفاده از جدول ۳، تأثیر فاصله تونل تا سطح زمین H، قطر تونل اول  $D_1$ ، قطر تونل دوم  $D_2$  و فاصله مرکز به مرکز دو تونل h در ایمنی تونل موجود، به ترتیب در شکل‌های ۱۲-۹ نشان داده شده است.

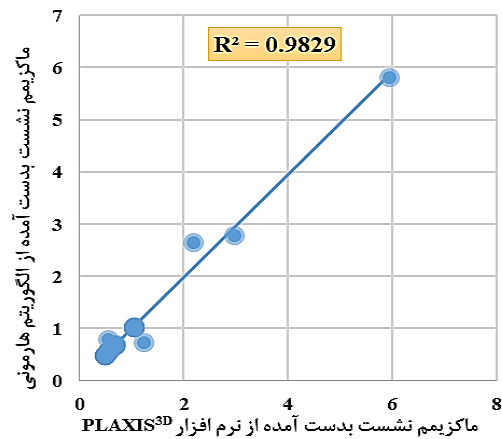
همان‌طور که از شکل ۹ نشان داده شده است با افزایش عمق تونل H، احتمال شکست تونل موجود افزایش می‌یابد. مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تأثیر قطر تونل موجود  $D_1$  و تونل جدید  $D_2$  در ایمنی تونل، همانند عمق تونل H است یعنی با افزایش قطر تونل موجود و تونل جدید احتمال شکست تونل افزایش پیدا می‌کند. باین‌حال بر اساس شکل ۱۲، با افزایش فاصله‌ی مرکز به مرکز دو تونل h احتمال شکست تونل کاهش می‌یابد و تونل از لحاظ ایمنی در شرایط مطلوبی قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که مطابق با جدول ۳ و شکل‌های ۱۲-۹ پارامترهای هندسی H،  $D_1$ ،  $D_2$  و h به ترتیب در مقادیر ۲۰، ۹، ۱۵ و ۶ دارای احتمال شکست مطلوب و ایده‌آل ۰/۰۰۳۲ است؛ بنابراین این مقادیر به‌عنوان ثابت‌های ورودی نرم‌افزار RT شناخته می‌شود.

جدول ۳- تأثیر پارامترهای هندسی بر احتمال شکست تونل

PF	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۶۲	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۲۶
h	۱۸	۱۲	۶	۵
PF	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۰۰۰۴۲	۰
D2	۱۵	۱۲	۹	۶
PF	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۲۸
D1	۱۵	۱۲	۹	۶
PF	۰/۰۱۳۷	۰/۰۰۰۷۷	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۶
H	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰



شکل ۹- تأثیر فاصله تونل‌ها از سطح زمین بر احتمال شکست



شکل ۸- مقدار  $R^2$  برای ماکزیمم نشست

### ۳-۳-۳- جانمایی بهینه تونل با استفاده از آنالیز

#### حساسیت

آنالیز حساسیت، ابزاری مهم برای ارزیابی پارامترها، تخمین پارامترها، طراحی و کنترل بهینه است. تجزیه و تحلیل حساسیت، یک روش برای بررسی تأثیر تغییر در متغیرهای پروژه به صورت مورد به مورد (محتمل‌ترین سناریوی نتیجه) است. به عبارت دیگر تحلیل حساسیت، روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به صورت سازمان‌یافته است به طوری که بتوان تأثیرات این تغییرات را با ثابت نگه‌داشتن بقیه‌ی پارامترها در خروجی مدل پیش‌بینی کرد.

در این روش با استفاده از مدل‌سازی یک سیستم، روابط بین پارامترهای ورودی را تعیین کرده و تأثیر هر یک از این پارامترها، بر نتیجه و خروجی مدل سنجیده می‌شود تا پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر نتیجه دارند به‌عنوان حساس‌ترین و مهم‌ترین متغیرهای ورودی شناسایی شوند. در واقع آنالیز حساسیت رابطه بین متغیرها و میزان تأثیر آنها بر یکدیگر را مشخص، پارامترهای مرتبط با متغیرهای خروجی را شناسایی و میزان تأثیر هر یک از متغیرهای ورودی بر خروجی مدل را تعیین می‌کند.

در این مقاله، مطابق جدول ۱، علاوه بر پارامترهای توده‌سنگ، پارامترهای هندسی تونل تأثیر زیادی بر ایمنی یا ریزش تونل دارد. به همین خاطر پارامترهای توده‌سنگ به دلیل عدم قطعیت از طریق روش‌های احتمالی و پارامترهای هندسی تونل با استفاده از آنالیز حساسیت به دست می‌آید؛ بنابراین مطابق جدول ۱ تأثیر تمامی مقادیر

به‌منظور عدم قطعیت ذاتی و شناختی خواص توده سنگ، یک رویکرد مبتنی بر ارزیابی پایداری تونل موجود (تحت تأثیر حفاری تونل جدید) بر مبنای روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول (FORM) و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو (MCS) ارائه شد. در ادامه برای انجام تحلیل قابلیت اعتماد و احتمال شکست تونل جدید، تابع حالت حدی ترکیبی به‌صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

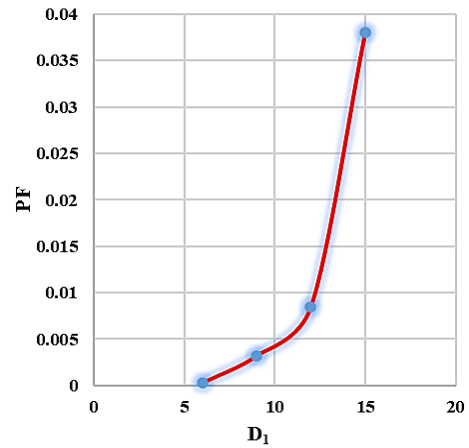
$$G(x) = (2 - FS_{algorithm}) * (S_{max(algorithm)} - 10) \quad (8)$$

در رابطه فوق، با توجه به عدم قطعیت پارامترهای توده سنگ، متغیرهایی با توزیع تصادفی لاگ نرمال با مقدار میانگین ( $\mu$ ) و انحراف معیار ( $\sigma$ ) با ضریب همبستگی (Cov) بین پارامترهای توده سنگ، مطابق جدول ۴ فرض شده است. از طرفی پارامترهای  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $h$  به‌صورت قطعی به ترتیب با مقادیر ۲۰ متر، ۹ متر، ۱۵ متر و ۶ متر در نظر گرفته شد.

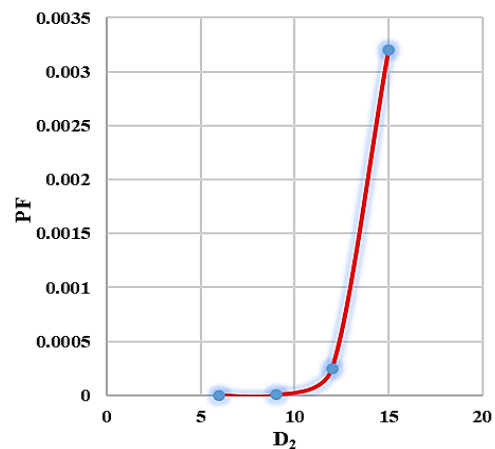
جدول ۴- متغیرهای تصادفی با توزیع لاگ نرمال در برنامه کامپیوتری RT

پارامتر	میانگین	انحراف معیار	ضریب همبستگی
$\sigma_i$	۵	۱	۰٫۲
$m_i$	۹٫۶	۱٫۹۲	۰٫۲
GSI	۲۰	۴	۰٫۲

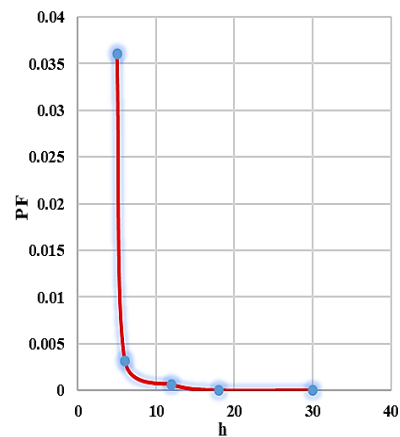
با توجه به ورودی‌های تابع حالت حدی (رابطه ۸) مقدار احتمال شکست تونل جدید و شاخص قابلیت اعتماد از روش قابلیت اعتماد مرتبه اول توسط برنامه کامپیوتری RT به‌دست‌آمده است. با توجه با خروجی نرم‌افزار RT پس از ۰٫۱۵۶ ثانیه تحلیل، شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست تونل جدید به دست می‌آید. در این مختصات مؤلفه اول مربوط به متغیر GSI، مؤلفه دوم مربوط به متغیر  $m_i$  و مؤلفه سوم مربوط به متغیر  $\sigma_i$  است. علاوه بر نتایج فوق در خروجی نرم‌افزار RT بردار اهمیت آلفا و گاما مشخص شده است. در شرایطی که متغیرها همبستگی داشته باشند از بردار اهمیت گاما استفاده می‌شود به‌طوری‌که اگر همبستگی بین متغیرها صفر باشد بردار اهمیت آلفا و گاما برابر هستند. مطابق با شرایط تونل و همچنین خروجی نرم‌افزار، به دلیل همبسته بودن متغیرهای توده سنگ بردار آلفا و گاما برابر نیستند و مقدار هر سه مؤلفه منفی به‌دست‌آمده است که این نشان‌دهنده آن است که با افزایش متغیرهای تصادفی



شکل ۱۰- تأثیر قطر تونل اول بر احتمال شکست



شکل ۱۱- تأثیر قطر تونل دوم بر احتمال شکست



شکل ۱۲- تأثیر فاصله مرکز به مرکز دو تونل نسبت به هم بر احتمال شکست

### ۴-۳- آنالیز احتمالاتی پایداری تونل

در این بخش، پس از به دست آوردن توابع حالت حدی بهینه برای ماکزیمم نشست و ضریب ایمنی

می‌کند و با میانگین گرفتن از آن‌ها اعداد بیشتر و کمتر میانگین حذف خواهند شد بنابراین موظف به مدل‌سازی در هر قسمت از توده سنگ است که به دلیل صرف وقت و همچنین از دست دادن برخی نقاط و دقیق نبودن آن تنها مدل‌سازی عددی جواب درستی به ما خواهد داد.

در این مقاله ابتدا با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS<sup>3D</sup> به مدل‌سازی تونل در ۳۲ حالت مختلف توده سنگ پرداخته شد و نتایج آن به دلیل عدم یکسان بودن در پارامترهای ورودی (ضریب ایمنی و ماکزیمم نشست) در هر ۳۲ حالت از توده سنگ متفاوت خواهد بود. به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد حفر تونل جدید (زیر تونل موجود)، ۳۲ مدل انجام شده توسط نرم‌افزار PLAXIS<sup>3D</sup> با مدل پیش‌بینی‌شده برای رسیدن به کمترین میزان نشست و بیشترین ضریب ایمنی (بهینه‌سازی) توسط الگوریتم جستجوی هارمونی مقایسه شد.

طبق مقایسه انجام شده سازگاری مطلوبی را بین مدل پیش‌بینی‌شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی و مدل انجام شده توسط روش‌های عددی را نشان داد؛ بنابراین با توجه به نزدیک بودن مدل انجام شده و مدل پیش‌بینی‌شده تابع حالت حدی برای به دست آوردن احتمال شکست تونل جدید دقیق است. پس از به دست آوردن تابع حالت حدی تمامی پارامترهای مدل به یک توزیع مناسب (توزیع لاگ نرمال) برازش شد و با استفاده از روش‌های احتمالاتی از جمله شبیه‌سازی مونت‌کارلو و قابلیت اطمینان مرتبه اول احتمال شکست تونل و به دنبال آن شاخص قابلیت اطمینان به دست آمد.

مطابق با نتایج به دست آمده در هر دو روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و قابلیت اعتماد مرتبه اول، احتمال شکست پایین (تقریباً ۰/۳۳ درصد) و شاخص قابلیت اعتماد بالایی را نشان داده و از نظر موقعیت تونل در شرایط بسیار مطلوبی قرار دارد. با توجه به تحلیل‌هایی که بر متغیرهای تصادفی تونل توسط نرم‌افزار RT صورت گرفت، مشخص شد که شاخص دوام زمین‌شناسی دارای اهمیت و تأثیرگذاری بسیار بالایی است. لازم به ذکر است که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش‌های قابلیت اعتماد به کار گرفته‌شده در برنامه کامپیوتری RT به منظور پایداری و جانمایی تونل جدید در زیر تونل موجود می‌تواند به عنوان یک شیوه با کارایی بالا در تحلیل مسائل فضاهای زیرزمینی بکار گرفته شود.

احتمال شکست کاهش می‌یابد. همچنین در این بردار، مقدار قدر مطلق مؤلفه اول از بقیه مؤلفه‌ها بیشتر است که این نشان می‌دهد، متغیر GSI بیشترین تأثیر را روی احتمال شکست تونل جدید را دارد و در تصمیمات مهندسی و ساخت تونل جدید اولویت بالاتری را دارد. پس از بردار اهمیت نوبت به بررسی احتمال شکست تونل و شاخص قابلیت اعتماد می‌رسد. در این تحلیل مقدار شاخص قابلیت اعتماد ۲/۷۲۰۲۷ و احتمال شکست تونل جدید ۰/۳۲ درصد است. با توجه به بالا بودن شاخص قابلیت اعتماد، احتمال شکست تونل جدید بسیار پایین بوده و از نظر پایداری و موقعیت تونل ایمن و شرایط بسیار مطلوبی را دارد.

حال تحلیل دیگری را با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای مقایسه با نتایج قابلیت اعتماد مرتبه اول انجام می‌شود. با توجه به خروجی نرم‌افزار RT پس از ۸۱۳۳۰۴ ثانیه تحلیل، به تعداد ۱۶۰۶۰۰ نمونه عدد تصادفی تولید شده است و احتمال شکست در این روش ۰/۳۳ درصد به دست آمده است. همان‌طور که مشخص است احتمال شکست به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو با روش قابلیت اعتماد مرتبه اول سازگار بوده و تقریباً نتایج یکسانی دارند. بنابراین پس از مقایسه دو روش نتایج حاکی از ایمن بودن تونل جدید را نشان می‌دهد و از نظر موقعیت تونل‌زنی موقعیت مناسبی را خواهد داشت.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به پیچیدگی اندرکنش بین تونل‌ها و همچنین به دلیل وجود عدم قطعیت در پارامترهای طراحی، در این مقاله با استفاده از تحلیل‌های احتمالاتی از جمله روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و قابلیت اطمینان مرتبه اول به پایداری و جانمایی بهینه تونل غیر هم‌سطح با استفاده از نرم‌افزار احتمالاتی RT پرداخته شد. از آنجاکه نرم‌افزار RT نیازمند یک تابع حالت حدی درست و دقیق است بنابراین برای محاسبه پایداری و همچنین دست یافتن به این تابع حالت حدی از الگوریتم جستجوی هارمونی در MATLAB استفاده شد. همان‌طور که گفته شد به دلیل متفاوت بودن خواص توده سنگ در هر نقطه، در روش‌های عددی برای مدل کردن تونل در ورودی نرم‌افزار پارامترهایی مانند چسبندگی، زاویه اصطکاک، چگالی، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته تنها یک عدد را قبول

## مراجع

- [13] Fu, H., An, P., Huang, Z., Zhang, J., Shi, Y., & Yao, G. (2020). Determination of Safety Distance of Twin Tunnel Underpassing Existing Tunnels. In *Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics* (pp. 839-848): Springer.
- [14] Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, 76(2), 60-68 .
- [15] Ghaboussi, J., & Ranken, R. E. (1977). Interaction between two parallel tunnels. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1(1), 75-103 .
- [16] Ghasemi, S. H., & Nowak, A. S. (۲۰۱۸) . Reliability analysis of circular tunnel with consideration of the strength limit state. *Geomechanics and Engineering*, 15(3), 879-888 .
- [17] Hoyaux, B., & Ladanyi, B. (1970). Gravitational stress field around a tunnel in soft ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 7(1), 54-61 .
- [18] Kim, S.-H. (1996). Model testing and analysis of interactions between tunnels in clay. University of Oxford ,
- [19] Lee, K. S., & Geem, Z. W. (2005). A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 194(36-38), 3902-3933 .
- [20] Li, X., & Yuan, D. (2012). Response of a double-decked metro tunnel to shield driving of twin closely under-crossing tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 18-30 .
- [21] Liang, R., Xia, T., Hong, Y., & Yu, F. (2016). Effects of above-crossing tunnelling on the existing shield tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 58, 159-176 .
- [22] Liu, H., Li, P., & Liu, J. (2011). Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), 276-283 .
- [23] Liu, H., & Low, B. K. (2017). System reliability analysis of tunnels reinforced by rockbolts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 65, 155-166 .
- [24] Liu, H., Small, J. C., & Carter, J. P. (2008). Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(4), 399-420 .
- [25] 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. *Computers and Geotechnics*, 84, 88-100 .
- [1] Boonyarak, T. (2014). Three-dimensional interaction of multiple crossing tunnels: centrifuge and numerical modeling .
- [2] Chakeri, H., Hasanpour, R., Hindistan, M. A., & Ünver, B. (2011). Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 70(3), 439-448 .
- [3] Chehade, F. H., & Shahrou, I. (2008). Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(2), 210-214 .
- [4] Choi, S., Grandhi, R., & Canfield, R. (2007). *Reliability-based Structural Design* Springer-Verlag London Limited .
- [5] Do, D.-P., Tran, N.-T., Mai, V.-T., Hoxha, D., & Vu, M.-N. (2019). Time-Dependent Reliability Analysis of Deep Tunnel in the Viscoelastic Burger Rock with Sequential Installation of Liners. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-27 .
- [6] Do, N.-A., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2014). Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, 40-51 .
- [7] Fang, Q., Zhang, D., Li, Q., & Wong, L. N. Y. (2015). Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 128-137 .
- [8] Fang, Y., & Su, Y. (2020). On the use of the global sensitivity analysis in the reliability-based design: Insights from a tunnel support case. *Computers and Geotechnics*, 117, 103280 .
- [9] Fattahi, H. (2016). Application of improved support vector regression model for prediction of deformation modulus of a rock mass. *Engineering with Computers*, 32(4), 567-580 .
- [10] Fattahi, H. (2017). Prediction of slope stability using adaptive neuro-fuzzy inference system based on clustering methods *Journal of Mining and Environment*, 8(2), 163-177 .
- [11] Fattahi, H. (2020). A New Method for Forecasting Uniaxial Compressive Strength of Weak Rocks. *Journal of Mining and Environment*, 11(2), 505-515 .
- [12] Fattahi, H., Gholami, A., Amiribakhtiar, M. S., & Moradi, S. (2015). Estimation of asphaltene precipitation from titration data: a hybrid support vector regression with harmony search. *Neural Computing and Applications*, 26(4), 789-798 .

- [30] Tohidi, A., & Sadaghiani, H. (1389). An investigation on affecting factors on interaction of constructing
- [31] non-level crossing tunnels. Tehran: Sharif University of Technology, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department .
- [32] Wang, Z., Sampaco, K., Fischer, G., Kucker, M., Godlewski, P., & Robinson, R. (2000). Models for predicting surface settlements due to soft ground tunneling. Paper presented at the North American Tunneling 2000 American Underground Construction Association
- [33] Zhang, W., Liu, D.-Y., Li, C., hen, X.-P., & Zou, C.-Q. (2017). Accumulation, partitioning, and bioavailability of micronutrients in summer maize as affected by phosphorus supply. *European Journal of Agronomy*, 86, 48-59.
- [26] Sahoo, J. P., & Kumar, J. (2013). Stability of long unsupported twin circular tunnels in soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 326-335 .
- [27] Sherizadeh, H., & Dehghan, S. (1395). A comparison between numerical modelling and monitoring data's on Tehran subway line 7. 10'th Student Mining Engineering Conference. Kashan: University of Kashan .
- [28] Shirinabadi, R., & Moosavi, E. (2016). Twin tunnel behavior under static and dynamic loads of Shiraz metro, Iran. *Journal of mining science*, 52(3), 461-472 .
- [29] Singh, R., Singh, T., & Bajpai, R. (2018). The investigation of twin tunnel stability: Effect of spacing and diameter. *Journal of the Geological Society of India*, 91(5), 563-568 .

---

<sup>1</sup>Hoyaux and Ladanyi

<sup>2</sup>Ghaboussi and Ranken

<sup>3</sup>Kim

<sup>4</sup>Chehade and Shahrour

<sup>5</sup>Liu and Small and Carter

<sup>6</sup>Tohidi and Sadaghiani

<sup>7</sup>Chakeri

<sup>8</sup>Liu

<sup>9</sup>Li and Yuan

<sup>10</sup>Sahoo and Kumar

<sup>11</sup>Do

<sup>12</sup>Boonyarak

<sup>13</sup>Sherizadeh and Dehghan

<sup>14</sup>Shirinabadi and Moosavi

<sup>15</sup>Liang

<sup>16</sup>Singh

<sup>17</sup>Fu

<sup>18</sup>Wang

<sup>19</sup>Fang

<sup>20</sup>Zhang

<sup>21</sup>Lü

<sup>22</sup>Liu and Low

<sup>23</sup>Ghasemi

<sup>24</sup>D.-P

<sup>25</sup>Fang and Su

<sup>26</sup>Harmony search algorithm