

ارزیابی پایداری تونل دسترسی معدن انگوران به روش‌های رده‌بندی تجربی و تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

ولی‌اله احمدی خونسارکی^۱، علی ارومیه‌ای^{۲*}، مهرداد امیری^۳ و محمدرضا نیکودل^۴

۱- دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

نویسنده مسئول: uromeica@modares.ac.ir*

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۶

دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲۰

چکیده

تونل دسترسی معدن سرب و روی انگوران زنجان به طول ۱۱۳۶ متر به منظور استخراج زیرزمینی در تراز ۲۷۰۰ متری با سطح مقطع ۷/۵ مترمربع در آهک‌های مرمیتی شده حفر گردیده است. به منظور دسترسی کامیون‌ها به سینه‌کار جهت استخراج به روش کند و پوش، قرار است سطح مقطع تونل به ۲۰ مترمربع افزایش داده شود. در این بررسی ضمن مطالعه روش‌های پایداری تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی، شرایط پایداری تونل دسترسی معدن انگوران به روش‌های تجربی و تحلیل سلسله مراتبی فازی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله اول با تهیه پرسشنامه‌ای از متخصصین شاغل در این زمینه نظرخواهی شده و سپس ساختار سلسله مراتبی ترسیم شده است. در روش تجربی ضمن طبقه‌بندی توده‌سنگ به روش‌های RMR، Q و GSI با استفاده از نتایج طبقه‌بندی Q، به دلیل تطابق بیشتر با منطقه، دو تیپ تحکیمات تعیین گردید که برای ۸۰ درصد تونل از تیپ ۱ با شاکت‌ریت به ضخامت ۵ سانتی‌متر و میل مهار به طول ۲/۵ متر و فاصله ۲/۵ متر پیشنهاد شد. با توجه به شرایط یکسان در پارامترهای طبقه‌بندی تجربی با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی، به‌عنوان یک معیار تحلیلی چندلایه اطلاعاتی بر اساس مقدار روباره، شاخص کیفی سنگ، فاصله‌داری، مقاومت سنگ و آب در پایداری تونل تعریف شده و با وزن‌دهی به لایه‌ها و هم‌پوشانی در محیط Arc GIS، نقشه پهنه‌بندی خطر ناپایداری در مسیر تونل ارائه می‌گردد که طبق نقشه به‌دست‌آمده انتهای تونل دارای بیش‌ترین خطر ناپایداری است.

واژه‌های کلیدی: پایداری تونل، طبقه‌بندی تجربی توده‌سنگ، معدن انگوران، تحلیل سلسله مراتبی فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی

۱- پیشگفتار

مسائل روبه‌رو شوند، حیاتی است (باینس و همکاران، ۲۰۰۵). مهندسان طراح با استفاده از تجربه‌های مربوط به گذشته و عمدتاً نیازهای کارفرما و نقشه عمومی توپوگرافی، گزینه‌هایی را به‌عنوان مسیرهای اولیه در نظر می‌گیرند و پس از بررسی آن‌ها و انجام سعی و خطا این گزینه‌ها را بهبود می‌بخشند و سپس با توجه به محدودیت‌های طرح، نقاط اجباری و دیگر مسائل مطرح شده در پروژه بر پایه قضاوت مهندسی و ارزیابی اقتصادی همان گزینه‌ها، مسیری را پیشنهاد کرده و آن را نهایی می‌کنند (OECD, 1973). به‌طور کلی در طراحی یک پروژه مهندسی عدم شناخت و آگاهی از شرایط منطقه، منجر به شکست و خرابی پروژه گردیده و احتمالاً موجب خسارت مالی و جانی می‌شود. لذا هر چه از وضعیت زمین و ساختارهای درونی

در طول چند دهه‌ی اخیر به‌منظور کوتاه نمودن مسیر و همچنین دستیابی به مواد معدنی، اجرای حفاری‌های زیرزمینی سرعت فزاینده‌ای به خود گرفته است. اکتشاف، طراحی و برقراری ایمنی تونل‌ها و به‌طور کلی فضاهای زیرزمینی در حین ساخت و در صورت لزوم پایداری درازمدت آن، از جمله مسائلی است که بایستی توسط طراحان مدنظر قرار گیرد. در این صورت لازم است قبل از حفاری اطلاعات جامعی از زمین‌شناسی، زمین‌شناسی ساختمانی و زمین‌شناسی مهندسی محدودده اجرای آن‌ها تهیه گردد (اجل‌لویان و همکاران، ۲۰۰۹). نقش زمین‌شناسان مهندس در چنین پروژه‌هایی با توجه به موضوعات و مسئولیت‌های خود که باید با طیف وسیعی از

آن‌که قرار است تونل در آنجا احداث شود، شناخت بیشتری در اختیار طراح قرار داده شود، طرح و اجرای پروژه‌ی مورد نظر از درجه موفقیت بالاتری برخوردار خواهد بود. مؤید این مطلب، پروژه‌های مختلف ژئوتکنیکی است که به علت عدم شناخت کافی منجر به شکست گردیده است.

مشکلاتی که در پروژه‌ها ایجاد می‌شود علل گوناگونی دارد: ۱- به شرایط زمین‌شناسی محل ممکن است توجه نشود. ۲- داده‌های جمع‌آوری‌شده از سایت ممکن است دارای ایراداتی باشد. ۳- تحقیقات میدانی ممکن است به درستی انجام نشده است. با توجه به مطالب ارائه شده، بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی در ارزیابی محل ساخت، عملیات طراحی و نگهداری فضاهای زیرزمینی الزامی گردیده است و بایستی ساختارهای زمین‌شناختی، نوع لیتولوژیکی، خصوصیات ژئومکانیکی و مقاومت سنگ‌ها و خاک‌های منطقه در اختیار طراح قرار داده شود. با حفر تونل و ایجاد فضاهای زیرزمینی شرایط تعادل طبیعی زمین به هم می‌خورد که لازم است روش‌هایی جهت پایداری فضاهای زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گیرد. در این بررسی ضمن مطالعه روش‌های پایداری تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی، شرایط پایداری تونل دسترسی معدن انگوران با استفاده از روش طبقه‌بندی تجربی و تحلیل سلسله مراتبی فازی مورد توجه و بررسی قرار می‌گیرد.

در روش تجربی بر مبنای طبقه‌بندی توده‌سنگ به روش‌های Q-system، RMR و GSI انجام می‌گیرد که خصوصیات فیزیکی و مهندسی توده‌سنگ و هندسه فضایی ناپیوستگی‌ها به کارگیری شده و بر اساس امتیازبندی و وزن‌دهی توده‌سنگ طبقه‌بندی می‌شود و در نهایت سیستم نگه‌دارنده پیشنهاد می‌گردد. در روش تحلیلی از تحلیل سلسله مراتبی فازی که روشی برای تصمیم‌گیری در مسائل مختلف است استفاده شده است. این روش بر مبنای تصمیم‌گیری چند معیارها امکان فرموله کردن مسئله را به صورت سلسله مراتبی فراهم می‌کند (اصغرپور، ۲۰۰۸؛ زارعی و همکاران، ۲۰۱۳). این فرآیند با دخالت گزینه‌های مختلف در تصمیم، امکان تحلیل حساسیت را تسهیل می‌نماید. نتایج این تحلیل با بهره‌مندی از نرم‌افزار Arc GIS و تعریف لایه‌های اطلاعاتی منجر به تهیه نقشه پهنه‌بندی مخاطرات در طول مسیر تونل می‌گردد. از جمله کاربردهای روش تحلیل سلسله مراتبی فازی می‌توان به ارزیابی خطر روانگرایی و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر در

محیط Arc GIS اشاره کرد با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی تأثیرگذارترین عوامل در بروز خطر مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی، امکان استفاده از متغیرهای کیفی در کنار متغیرهای کمی را دارد و مبتنی بر نظرات کارشناسی است. برای ارزیابی و تعیین درجه اهمیت شاخص‌ها نسبت به یکدیگر در این پروژه از روش F-AHP استفاده شده است تا ارزیابی به شرایط واقعی نزدیک‌تر باشد (ارومیه‌ای و همکاران، ۲۰۱۷). پژوهش‌های مختلفی بر روی طبقه‌بندی مهندسی سنگ در تونل انجام شده است. تا به امروز مطالعاتی در معدن انگوران زنجان و همچنین تحلیل پایداری به روش‌های مختلف مورد توجه محققین بسیاری تاکنون بوده است که در این بخش به روش‌های متداول اشاره شده است. سلطانی (۱۹۹۹) مطالعه‌ای تحت عنوان تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی توده سنگ و طراحی شیب بهینه در معدن انگوران انجام داده است. در این مطالعه خواص ژئوتکنیکی توده‌سنگ از طریق برداشته‌ها و انجام آزمایش‌های مکانیک سنگ تخمین زده شده است و با استفاده از نتایج به دست آمده، یک شیب بهینه برای معدن طراحی شد که در آن امکان افزایش قابل‌ملاحظه شیب اشاره شد. روشن‌قلب (۲۰۰۷) مطالعه‌ای با عنوان بررسی رفتار شکستگی ایجاد شده در پشت دیواره پیت معدن سرب و روی انگوران و ارائه راهکار جهت رفع مشکل انجام داده است. در مطالعه مذکور بیشتر بر روی دلایل اصلی در وقوع ترک و پایش جابجایی‌ها پرداخته شده است. معارفوند و احمدی (۲۰۰۹) مطالعه‌ای تحت عنوان گزارش وضعیت توده نابر جای معدن انگوران پس از ریزش، با همکاری شرکت زمین معدن انجام دادند. همچنین آن‌ها گزارشی با عنوان برنامه‌ریزی معدن انگوران و ساخت مدل آنالیز ریسک ارائه کردند. طی آن برای برآورد ریسک معدنکاری چهار معیار در نظر گرفته شد. برای برآورد ریسک کلی، ریسک به دست آمده از سه معیار با وزن‌های مختلف باهم جمع شده و با ضریب ایمنی تصحیح شد. با توجه به این تحلیل ریسک سناریوی سبک‌سازی برای توده ریزشی انتخاب می‌شود (یعقوبی و همکاران، ۲۰۱۶). معارفوند و احمدی در سال ۲۰۱۰ گزارش محاسبات ایمنی در حال کار با معدن انگوران را ارائه کردند (به نقل از یعقوبی و همکاران، ۲۰۱۶). در سال ۲۰۱۶ پژوهشی دیگر توسط یعقوبی و همکاران بر روی تحلیل پایداری و ارزیابی ریزش سنگین مجدد در دیواره

زمین‌شناسی مهندسی توده‌سنگ در مسیر تونل‌های دسترسی به ذخایر معدنی سرب و روی انگوران مورد مطالعه قرار می‌گیرند. هدف کلی از این پژوهش ارزیابی شرایط پایداری مسیر تونل و ارائه روش‌های پایداری است. در حال حاضر از معدن انگوران تا تراز ۲۸۵۰ متر به‌صورت روباز بهره‌برداری می‌شود. ولی برای دستیابی به ذخایر باقی‌مانده تا تراز ۲۷۰۰ متر، در نظر است بهره‌برداری به‌صورت زیرزمینی صورت گیرد. با توجه به عیار بالای سنگ معدن (۳۶٪) که در جهان بی‌نظیر است، نحوه استخراج به روش کند و پوش برنامه‌ریزی شده است (جوادی، ۲۰۱۱). بدین ترتیب ضمن برداشت ماده معدنی بتن جایگزین فضای خالی ایجاد شده می‌گردد. در شرایط فعلی تونل دسترسی به معدن با سطح مقطع ۷/۵ مترمربع در تراز ۲۷۰۰ متری از سطح دریا به طول ۱۱۶۶ متر و آرمیت N 329 در موقعیت جغرافیایی $x=716264$ ، $y=4055125$ (UTM) حفر شده است (شکل ۱). عمده طول تونل حفر شده بدون نگه‌دارنده و تنها در زون‌های خورد شده ناشی از گسلش از نگه‌دارنده فلزی استفاده شده است (شکل ۳). مطابق برنامه‌ریزی‌های به‌عمل‌آمده و جهت انتقال بتن توسط کامیون به موقعیت سینه‌کار، در نظر است، سطح مقطع تونل به ۲۰ مترمربع افزایش یابد. با افزایش سطح مقطع تونل درزه‌های بیشتری در سطح باز شده تونل رخنمون خواهند داشت و شرایط پایداری نیز متفاوت خواهد بود. در شکل ۱ نمای از تونل مورد مطالعه و در جدول ۱ سوابق دیگر این پروژه آورده شده است.

۲- موقعیت، راه دسترسی و زمین‌شناسی معدن

انگوران زنجان

معدن سرب و روی انگوران در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۲۴ دقیقه و عرض جغرافیایی آن ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه در استان زنجان، حدود ۱۳۰ کیلومتری جنوب غرب شهر زنجان و در ۳۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان دندی قرار گرفته است. نزدیک‌ترین روستا به معدن روستای قلعه جوق با جمعیت ۲۰۰ نفر و نزدیک‌ترین شهر به آن دندی با جمعیت دو هزار نفر است. کارخانه تغلیظ معدن انگوران در نزدیکی همین شهر قرار دارد. راه اصلی دسترسی (زنجان، دندی، معدن) دارای مسافتی در حدود ۱۲۰ کیلومتر است (شکل ۲).

معدن روباز انگوران انجام شد که پس از انجام آزمایش‌ها مکانیک سنگ با استفاده از نرم‌افزار 3DEC مدل سه‌بعدی معدن ساخته و ارزیابی اولیه بر روی آن انجام گرفت. بخشی دیگر از این مطالعات انجام گرفته در این پژوهش آورده شده است. بخشنده و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش همگرایی- هم‌جواری و معیار شکست هوک و براون به تحلیل پایداری سیستم نگهداری تونل بلند سد سردشت با استفاده از نرم‌افزار عددی مبتنی بر تفاضل محدود FLAC 3D پرداخته و کاربردی بودن معیار هوک و براون را نشان دادند. ترکمان جو و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش کاهش مقاومت و مفهوم ضریب ایمنی وضعیت پایداری جبهه کار در تونل‌سازی مکانیزه را به روش فشار متعادل‌کننده زمین در شرایط ناهمگن به کمک مدل‌سازی عددی تحلیل نمودند. احمدی و همکاران در سال ۲۰۲۲ پژوهشی تحت عنوان ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌های آرژیلیتی در منطقه مکران جنوبی (راه‌آهن چابهار- نیک شهر) انجام دادند که سنگ‌های منطقه مکران را مطابق طبقه‌بندی مهندسی سنگ به روش Q-System، RMR و GSI عمده توده‌سنگ در طبقه‌بندی ضعیف و خیلی ضعیف قرار دارند. سیزواری و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگه‌دارنده تونل آب بر سد معشوره را انجام داده‌اند. ایشان در روش تجربی از دو روش Q و RMR و در تحلیل به روش عددی از نرم‌افزار 2 phase که بر پایه اجزای محدود استوار است استفاده نموده‌اند و در نهایت نتایج حاصل از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی سیستم نگه‌دارنده مشابهی را ارائه داده است. ترینس و جانسون (۲۰۱۳) طراحی پایداری اتاق‌های زیرزمینی طولی را در سنگ‌های سخت معدن کانوان با استفاده از روش طبقه‌بندی توده‌سنگ Q انجام داده و در ادامه با استفاده از روش مدل‌سازی عددی اجزای محدود، نتایج طراحی سیستم نگهداری مورد تأیید قرار گرفته است. جیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ طراحی سیستم نگهداری کارگاه‌های استخراج جبهه کار طولانی را با استفاده از شبیه‌سازی عددی و نرم‌افزار 3D FLAC انجام و میزان جابجایی‌های رخ داده در کارگاه استخراج را پیش‌بینی کرده است. بر این اساس داده‌های حاصل از پایش جابجایی دیواره، نتایج شبیه‌سازی عددی از اعتبار کافی برخوردار بوده است. در تحقیق حاضر خصوصیات



شکل ۱. نمایی از تونل مورد مطالعه

Fig.1. A view of the studied tunnel

جدول ۱. مطالعات گذشته پروژه

Table 1. Previous project studies

| ردیف | مرجع | نوع تحقیق | عنوان تحقیق |
|------|--------------------------------------|--------------------|--|
| ۱ | جوادی، ۲۰۱۱ | پایان‌نامه | انتخاب روش استخراج و تحلیل پایداری زیرزمینی معدن سرب و روی انگوران |
| ۲ | معدن زمین، ۲۰۱۰ | گزارش | بازنگری طرح شرکت کاوشگران |
| ۳ | برهام خواجه پور، حسام مقدم علی، ۲۰۰۹ | ماهنامه توسعه معدن | تحلیل پایداری دیواره شمال غربی معدن سرب و روی انگوران با استفاده از نرم‌افزار FLAC |
| ۴ | مهندسین مشاور کاوشگران، ۲۰۰۸ | گزارش | تهیه طرح گزارش استخراج زیرزمینی |
| ۵ | معدن زمین، ۲۰۰۴ | گزارش | تهیه طرح پایه استخراج معدن |

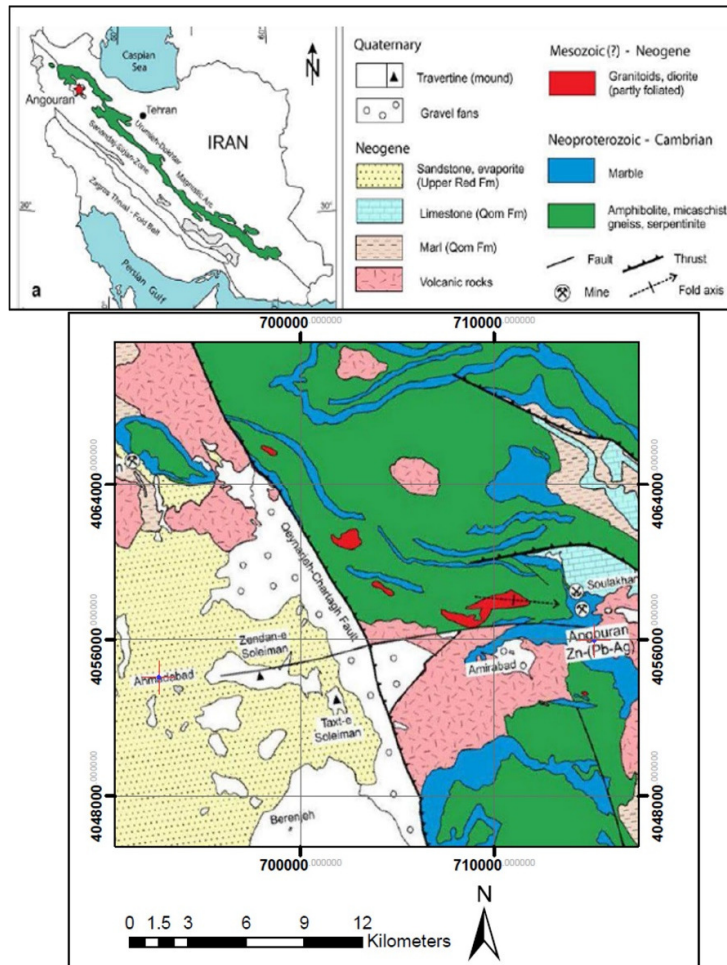
۳- روش تحقیق

در این مطالعه به منظور تعیین موضوع و روش پژوهش در ابتدا از روش کتابخانه‌ای استفاده شد. بدین منظور تعدادی منابع مختلف گردآوری و مطالعه شد. در مرحله‌ی بعد بازدیدهای میدانی انجام شده است. در این بازدیدها از افراد متخصص شاغل در معدن استفاده شد. در این بازدیدها ضمن آشنایی با شرایط فیزیکی محل اجرای طرح، اطلاعات محلی دیگر نیز جمع‌آوری و استفاده می‌شوند. فعالیت‌های محلی در نظر گرفته شده در این بازدیدها شامل: شناسایی محلی، تکمیل اطلاعات از منابع محلی، برنامه‌ریزی فعالیت‌های بعدی است. برداشت صحرایی ناپیوستگی‌ها به دلیل این‌که کل مسیر تونل در تراز ۲۷۰۰ متری از لحاظ خصوصیات پترولوژی و چینه‌شناسی تغییری نداشته است و برای به دست آوردن اطلاعات کل مسیر تونل به قسمت‌های ۱۰۰ متری تقسیم و در هر ۱۰۰ متر به بررسی ناپیوستگی‌ها در یک مقطع ۱۰ متری پرداخته شده است. به‌منظور تعیین

کانسار انگوران در بخش مرکزی یک تاق‌دیس، بین دو بخش دگرگونی شیستی و آهکی واقع شده است. در کمربالای این کانسار طبقات آهکی قرار دارند و شیب کلی ۲۰-۲۵ درجه به سمت جنوب شرق است و در کمربالایی نیز شیست‌های دگرگونی وجود دارد که شیب کلی آن‌ها حدود ۱۰-۲۵ درجه و در همان جهت (جنوب شرقی) است. شکل هندسی کانسار که با استفاده از نرم‌افزار دیتامین و بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی مشخص شده، تقریباً مشابه یک عدسی یا گلابی وارونه و دارای شیبی حدود ۲۰ تا ۳۰ درجه به طرف جنوب شرق است. در مقاطع افقی، بزرگ‌ترین طول کانسار در جهت شمال شرق- جنوب غرب و بزرگ‌ترین عرض آن در جهت شمال غرب- جنوب شرق است. بزرگ‌ترین طول و عرض کانسار در تراز ۲۷۷۰ + متر به ترتیب ۲۶۰ و ۱۲۰ متر و در عمق نهایی کانسار در تراز ۲۷۰۰ + به ترتیب ۱۲۰ و ۱۴ متر است (جوادی، ۲۰۱۱).

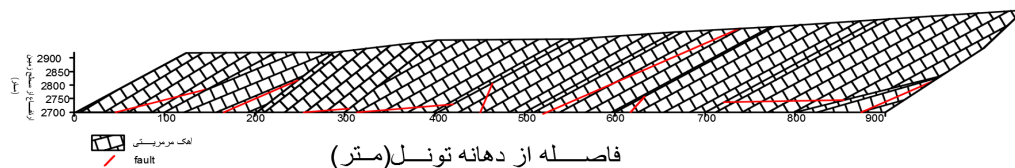
روشی برای تصمیم‌گیری در مسائل مختلف است بر مبنای تصمیم‌گیری چند معیار امکان فرموله کردن مسئله را به صورت سلسله مراتبی فراهم می‌کند (اصغری‌پور، ۲۰۰۸). این فرآیند با دخالت گزینه‌های مختلف در تصمیم، امکان تحلیل حساسیت را تسهیل می‌نماید. نتایج این تحلیل با بهره‌مندی از نرم‌افزار Arc GIS و تعریف لایه‌های اطلاعاتی منجر به تهیه نقشه پهنه‌بندی مخاطرات در طول مسیر تونل می‌گردد.

مقاومت سنگ در برداشت‌ها از چکش اشمیت استفاده شده است. مرحله سوم تهیه پرسشنامه جهت جمع‌آوری نظر افراد. مرحله چهارم روش‌های تجربی بود که در این روش با مطالعه خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ و برداشت دقیق خصوصیات درزه‌ها، اندازه‌گیری شرایط آب زیرزمینی و فشارهای همه‌جانبه، توده‌سنگ مطابق روش‌های RMR، GSI و Q-system طبقه‌بندی شده و پایداری آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. مرحله پنجم روش تحلیلی است که در این روش با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی که



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی، راه دسترسی و موقعیت معدن انگوران (برنول، ۱۹۶۸ با کمی تغییرات).

Fig. 2. Geological map, access road and location of Angoran mine (Barnell, 1968 with some changes)



شکل ۳. مقطع زمین‌شناسی تونل مورد مطالعه

Fig. 3. Geological cross section of the studied tunnel

۳-۱- طبقه‌بندی مهندسی سنگ

از دهه ۱۹۷۰ چندین سیستم طبقه‌بندی مهندسی سنگ وجود داشت که مهم‌ترین آن‌ها بنیواسکی (۱۹۷۳)، بنیواسکی (۱۹۷۴) و بارتون (۱۹۷۴) هستند. به منظور تعیین کیفیت توده‌سنگ مسیر تونل با استفاده از داده‌های حاصل از برداشت‌های میدانی، طبقه‌بندی توده‌سنگ به سه روش RMR، Q و GSI انجام گرفته و در نهایت تیپ پیشنهادی پایدار کننده با استفاده از طبقه‌بندی Q ارائه شده است. در طبقه‌بندی توده‌سنگ به روش RMR که توسط بنیواسکی (۱۹۷۳) برای اولین بار معرفی شده و در طی زمان اصلاحاتی روی آن انجام گرفته است. نتایج حاصل از این طبقه‌بندی در جدول ۲ آورده شده است که طبق این نتایج وضعیت سنگ در بازه متوسط تا خوب است. در طبقه‌بندی توده‌سنگ به روش Q بر اساس ارزیابی پایداری تعداد زیادی سازه‌های زیرزمینی که قبلاً حفاری و اجرا شده بودند بارتون و همکارانش از انستیتو ژئوتکنیک نروژ در سال ۱۹۷۴ شاخصی را برای تعیین کیفیت توده‌سنگی که تونل در آن حفر می‌شود ارائه نمودند. نتایج حاصل از این طبقه‌بندی که در جدول ۳ آورده شده است که وضعیت سنگ در بازه‌های ضعیف، متوسط و خوب است. نتایج نشان می‌دهد که در قسمت‌های ورودی تونل و مکان‌هایی که دارای گسل هستند به دلیل وضعیت ساختارها، پایداری تونل در رده ضعیف قرار دارد. در طبقه‌بندی GSI که بر اساس شاخص استقامت زمین‌شناسی GSI توسط هوک و براون در سال ۱۹۷۷ معرفی شده است. این روش بر مبنای ارزیابی صحرایی خصوصیات زمین‌شناسی توده‌سنگ شکل گرفته است که در آن دو ویژگی ظاهری توده‌سنگ شامل خصوصیات ظاهری و شرایط هوازدگی بررسی می‌شود. آن‌ها خصوصیات ساختاری را به چهار رده و خصوصیات هوازدگی را به پنج رده تقسیم‌بندی کردند؛ و بر اساس امتیازهای کسب شده، طبقه‌بندی توده‌سنگ انجام می‌پذیرفت. در سال ۲۰۰۱ مارینوس و هوک اصلاحاتی به روش اولیه اعمال کردند که در آن خصوصیات ساختاری به شش رده افزایش یافت. در این روش توده‌سنگ از نظر کیفی به ۱۰ رده طبقه‌بندی شده است که از رده خیلی ضعیف تا رده خیلی خوب به ترتیب از صفر درصد تا ۱۰۰ امتیاز را شامل می‌شوند. نتایج حاصل از طبقه‌بندی GSI در جدول ۴ نشان می‌دهد که شرایط سطحی توده‌سنگ عمدتاً در وضعیت خوب است. از لحاظ خصوصیات

توده‌سنگ، میزان پیوستگی در محدوده سنگ خیلی بلوکی و بلوکی است. در سیستم Q برای انتخاب حائل مورد نیاز، می‌توان از نموداری که به همین منظور ارائه شده است استفاده نمود. با داشتن مقدار Q و دهانه یا ارتفاع تونل و نیز با در نظر گرفتن مقدار مناسب برای ESR می‌توان حائل مورد نیاز برای سقف و دیواره‌های تونل را از آن منحنی به دست آورد. مقدار ESR با توجه به درجه اهمیت تونل انتخاب می‌شود به این صورت که هرچه درجه اهمیت تونل بالاتر باشد، مقدار ESR کمتر در نظر گرفته می‌شود، در خصوص تونل‌های دائمی معدنی ESR معادل ۱/۴ در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از نتایج حاصل از شاخص کیفی تونل زنی دو تیپ تحکیمات معرفی می‌شود (جدول‌های ۵ و ۶) پیش‌بینی می‌گردد ۸۰ درصد طول مسیر از تیپ تحکیمات دو استفاده شود.

۳-۲- تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی

در سال ۱۹۸۳ دو محقق هلندی به نام‌های «لارهورن و پدریک» روشی را برای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی پیشنهاد کردند که بر اساس روش حداقل مجذورات لگاریتمی بنا نهاده شده بود. در سال ۱۹۹۶ روش دیگری تحت عنوان «روش تحلیل توسعه‌ای» توسط یک محقق چینی به نام «چانگ» ارائه گردید. اعداد مورد استفاده در این روش، اعداد مثلثی فازی هستند مفاهیم و تعاریف تحلیل سلسله مراتبی فازی بر اساس روش تحلیل توسعه‌ای تشریح می‌شود.

دو عدد مثلثی $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ که در شکل ۴ رسم شده‌اند را در نظر بگیرید:

عملگرهای ریاضی آن‌ها به صورت رابطه ۱ تا رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$M_1 + M_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (1)$$

$$M_1 \times M_2 = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \quad (2)$$

$$M_1^{-1} = \left(\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1} \right) \quad (3)$$

باید توجه داشت که حاصل ضرب دو عدد فازی مثلثی، یا معکوس یک عدد فازی مثلثی، دیگر یک عدد فازی مثلثی نیست. این روابط، فقط تقریبی از حاصل ضرب واقعی دو عدد فازی مثلثی و معکوس یک عدد فازی مثلثی را بیان می‌کنند (به نقل از: مومنی، ۲۰۰۶).

جدول ۲. طبقه‌بندی RMR توده‌سنگ مسیر تونل مورد مطالعه

Table 2. RMR classification of the rock mass of the studied tunnel route

| ۸۹۰-۹۰۰ | ۷۸۰-۷۹۰ | ۶۱۰-۶۲۰ | ۵۲۰-۵۳۰ | ۴۶۰-۴۷۰ | ۳۲۰-۳۳۰ | ۲۵۵-۲۶۵ | ۱۷۰-۱۸۰ | ۶۰-۷۰ | متراز | |
|----------|---------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|------------------------------------|
| ۴۲/۴۶ | ۴۲/۴۶ | ۴۲/۴۶ | ۴۲/۴۶ | ۴۲/۴۶ | ۴۲/۴۶ | ۴۲/۴۶ | ۴۲/۴۶ | ۴۲/۴۶ | | مقاومت توده‌سنگ بکر |
| ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | | امتیاز |
| ۶۰ | ۵۷ | ۵۷ | ۱۰۰ | ۸۴ | ۸۷ | ۹۳ | ۷۸ | ۱۰۰ | | شاخص RQD |
| ۱۳ | ۱۳ | ۱۳ | ۲۰ | ۱۷ | ۱۷ | ۲۰ | ۱۷ | ۲۰ | | امتیاز |
| ۱۲ | ۱۳ | ۱۲ | ۲۲ | ۲۴ | ۲۴ | ۱۵ | ۱۸ | ۲۳ | | فاصله‌داری درزه‌ها |
| ۱۰ | 10 | ۱۰ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۰ | | امتیاز |
| ۱-۳ | ۳-۱۰ | ۳-۱۰ | < ۱ | < ۱ | < ۱ | < ۱ | < ۱ | < ۱ | | طول ناپیوستگی |
| ۴ | ۲ | ۲ | ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | | امتیاز |
| ۰/۱-۰/۲۵ | < ۰/۱ | < ۰/۱ | < ۰/۱ | < ۰/۱ | < ۰/۱ | < ۰/۱ | < ۰/۱ | < ۰/۱ | | بازشدگی |
| ۴ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | | امتیاز |
| صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | | زبری |
| ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | | امتیاز |
| ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | | پرشده‌گی |
| ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | | امتیاز |
| هوانزده | هوانزده | کمی هوانزده | هوانزده | هوانزده | هوانزده | هوانزده | هوانزده | هوانزده | | هوانزده‌گی |
| ۶ | ۶ | ۵ | ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | ۶ | | امتیاز |
| ۲۱ | ۲۰ | ۱۹ | ۲۴ | ۲۴ | ۲۴ | ۲۴ | ۲۴ | ۲۴ | | امتیاز کل |
| مرطوب | مرطوب | مرطوب | خیس | خیس | خشک | خشک | خشک | خشک | | آب زیرزمینی |
| ۱۰ | ۱۰ | ۱۰ | ۷ | ۷ | ۱۵ | ۱۵ | ۱۵ | ۱۵ | | امتیاز |
| | | | | | | | | | راستا | تعدیل امتیاز برای جهت‌بایی درزه‌ها |
| -۱۰ | -۱۰ | -۱۰ | -۱۰ | -۱۰ | -۱۰ | -۱۰ | -۱۰ | -۱۰ | | امتیاز |
| ۵۲ | ۴۸ | ۴۶ | ۸۵ | ۲۵ | ۶۳ | ۳۶ | ۶۰ | ۶۳ | | جمع امتیازها |

جدول ۳. نتایج طبقه‌بندی Q توده‌سنگ مسیر تونل مورد مطالعه

Table 3. Q classification results of the studied tunnel route rock mass

| ۰-۹۰۰ | ۸۹۰-۹۰۰ | ۷۸۰-۷۹۰ | ۶۱۰-۶۲۰ | ۵۲۰-۵۳۰ | ۴۶۰-۴۷۰ | ۳۲۰-۳۳۰ | ۲۵۵-۲۶۵ | ۱۸۰-۱۷۰ | ۶۰-۷۰ | متراز | عنوان |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|---|
| خوب | خوب | خوب | خوب | عالی | عالی | عالی | خوب | خوب | عالی | | شاخص کیفیت سنگ RQD |
| ۸۷ | ۸۰ | ۸۲ | ۸۰ | ۹۲ | ۹۳ | ۹۳ | ۸۶ | ۸۹ | ۹۳ | | |
| صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | | عدد مربوط به زبری درزه‌ها J_r |
| صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | صاف | | |
| ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | | |
| سه | سه | سه | سه | سه | دو | سه | یک | دو | دو | | عدد مربوط به تعداد دسته درزه‌ها J_n |
| ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۲ | ۳ | ۱ | ۲ | ۱+۲ | | |
| ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۴ | ۹ | ۲ | ۴ | ۶ | | |
| سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | | عدد مربوط به هوانزده‌گی و دگرسانی درزه‌ها J_a |
| فاقد | فاقد | فاقد | ناچیز | فاقد | فاقد | فاقد | فاقد | فاقد | فاقد | | |
| ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | ندارد | | |
| کمتر از ۱ | کمتر از ۱ | کمتر از ۱ | کمتر از ۱ | کمتر از ۱ | کمتر از ۱ | کمتر از ۱ | کمتر از ۱ | کمتر از ۱ | کمتر از ۱ | | فاکتور کاهش آب درزه‌ها J_w |
| ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | ۱ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | | |
| متوسط | متوسط | متوسط | متوسط | زیاد | زیاد | کم | کم | کم | کم | | |
| کم | کم | کم | کم | زیاد | زیاد | خیلی کم | خیلی کم | خیلی کم | خیلی کم | | |
| ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۳۳ | ۰/۳۳ | ۰/۶۶ | ۰/۶۶ | ۰/۶۶ | ۰/۶۶ | | |
| سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | سخت | | ضریب کاهش تنش SRF |
| چند دسته | چند دسته | چند دسته | چند دسته | چند دسته | چند دسته | چند دسته | چند دسته | چند دسته | چند دسته | | |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | بیشتر | بیشتر | بیشتر | بیشتر | بیشتر | بیشتر | بیشتر | | |
| از ۵۰ | از ۵۰ | از ۵۰ | از ۵۰ | از ۵۰ | از ۵۰ | از ۵۰ | از ۵۰ | از ۵۰ | از ۵۰ | | |
| ۷/۵ | ۷/۵ | ۷/۵ | ۷/۵ | ۷/۵ | ۷/۵ | ۷/۵ | ۷/۵ | ۷/۵ | ۷/۵ | | |
| ۱/۶ | ۱/۵ | ۱/۶ | ۱/۱۷ | ۱/۱۶ | ۲/۶۶ | ۲/۳۶ | ۹/۸۳ | ۵/۰۹ | ۳/۵۴ | | Q |
| ضعیف | ضعیف | ضعیف | ضعیف | ضعیف | ضعیف | ضعیف | متوسط | متوسط | ضعیف | | توصیف |

جدول ۴. طبقه‌بندی GSI توده‌سنگ مسیر تونل
Table 4. GSI classification of tunnel rock mass

| متر از | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-----------|
| ۸۹۰-۹۰۰ | ۷۸۰-۷۹۰ | ۶۱۰-۶۲۰ | ۵۲۰-۵۳۰ | ۴۶۰-۴۷۰ | ۲۲۰-۳۳۰ | ۲۵۵-۲۶۵ | ۱۷۰-۱۸۰ | ۶۰-۷۰ | طبقه‌بندی |
| ۷۵ | ۸۰ | ۶۵ | ۵۰ | ۷۰ | ۵۵ | ۶۰ | ۶۰ | ۷۵ | GSI |

جدول ۵. روش‌های پیشنهادی تقویت فضای زیرزمینی بر اساس طبقه‌بندی RMR (اقتباس از ارومیه‌ای، ۲۰۱۴)

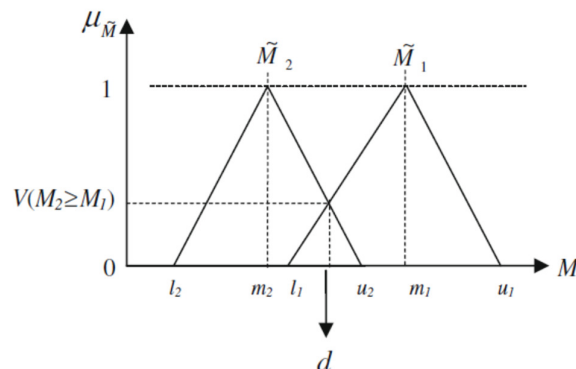
Table 5. Suggested methods of strengthening the underground space based on RMR classification (adapted from Urmiaei, 2014)

| فاصله میله مهار (متر) | طول میل مهار (متر) | توری مشبک | | ضخامت شاتکریت (سانتی‌متر) | | تیپ تحکیمات پیشنهادی | امتیاز توصیفی RMR |
|-----------------------|--------------------|--------------|-----|---------------------------|-----|----------------------|-------------------|
| | | دیواره | سقف | دیواره | سقف | | |
| - | ۲/۵ | - | ۳ | - | - | ۱ | خوب |
| در صورت نیاز | ۲-۱/۵ | در صورت نیاز | ۴ | دارد | ۳۰ | ۲ | متوسط |

جدول ۶. تیپ تحکیمات پیشنهادی طبق شاخص کیفی تونل زنی

Table 6. The type of proposed reinforcements according to the tunneling quality index

| فاصله میله مهار (متر) | طول میل مهار (متر) | ضخامت شاتکریت (سانتی‌متر) | تیپ تحکیمات پیشنهادی | توصیف شاخص کیفی تونل زنی Q |
|-----------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|----------------------------|
| ۲/۵ | ۲/۵ | ۵ | ۱ | ضعیف |
| ۲ | ۲/۶۶ | - | ۲ | خوب |



شکل ۴. دو عدد مثلثی $M1=(l1, m1, u1)$ و $M2=(l2, m2, u2)$ (به نقل از: مومنی، ۲۰۰۶)

Fig. 4. Two triangular numbers $M1=(l1, m1, u1)$ and $M2=(l2, m2, u2)$ (cited by Momeni, 2006)

$$\left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \mu_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (5)$$

۳-۴- محاسبه‌ی درجه بزرگی S_i نسبت به همدیگر در روش تحلیل توسعه‌ای پس از محاسبه S_k باید درجه بزرگی آن‌ها را نسبت به هم به دست آورد. به‌طورکلی اگر M_1 و M_2 دو عدد فازی مثلثی باشند درجه بزرگی M_1 بر M_2 که با $V(M_1 \geq M_2)$ نشان می‌دهیم، به‌صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود (به نقل از: مؤمنی، ۲۰۰۶):

۳-۳- محاسبه‌ی S_k برای هر یک از سطرها

ماتریس مقایسه زوجی

در روش تحلیل توسعه‌ای، برای هر یک از سطرها ماتریس مقایسات زوجی، مقدار S_k که خود یک عدد مثلثی است، به‌صورت رابطه‌های ۴ و ۵ محاسبه می‌شود (به نقل از: مؤمنی، ۲۰۰۶):

$$S_k = \sum_{j=1}^n M_{kj} \times \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{ij} \right]^{-1} \quad (4)$$

k بیانگر شماره سطر و i و j به ترتیب نشان‌دهنده گزینه‌ها و شاخص‌ها هستند.

- ضرب وزن‌های تعیین‌شده برای هر کدام از معیارها و زیر معیارها در محیط نرم‌افزار Arc GIS در رده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی مربوط (ارومیه‌ای و همکاران، ۲۰۱۷).

۳-۷- معیارهای مؤثر در ناپایداری تونل

نخستین گام در ارزیابی ناپایداری تونل شناسایی و معرفی عوامل تأثیرگذار در بروز ناپایداری در منطقه مورد مطالعه است. با توجه به اطلاعات برداشت صحرائی، آزمون‌های آزمایشگاهی و طبقه‌بندی مهندسی سنگ پنج عامل که می‌توانند بیش‌ترین تأثیرگذاری را در ناپایداری داشته باشند به شرح زیر برای تونل دسترسی تراز ۲۷۰۰ متری معدن انگوران زنجان معرفی شدند:

(۱) روباره: با افزایش ارتفاع ستون سنگی بر روی تونل باعث افزایش فشار سرباره و خرابی ساختار توده‌سنگ می‌شود.
(۲) شاخص کیفی سنگ: این شاخص فقط بر مبنای میزان شکستگی توده‌سنگ پایه‌ریزی شده است و درباره استقامت، ابعاد هندسی و خصوصیات سطوح ناپیوستگی هیچ‌گونه اطلاعاتی ارائه نمی‌دهد. این شاخص کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی اولیه توده‌سنگ دارد. این شاخص میزان تراکم و تمرکز درزه‌ها را در توده‌سنگ مشخص می‌کند.

(۳) آب زیرزمینی: تأثیر حضور آب در درزه، در به هم زدن تعادل تنش‌ها در توده‌سنگ از دیدگاه‌های مختلف بررسی شده است. یکی از این دیدگاه‌ها محاسبه نسبت تنش فشار منفذی توده‌سنگ به تنش قائم مؤثر در عمقی از سطح زمین است. همچنین حضور آب در سطح درزه می‌تواند سبب تغییر رفتار مواد پرکننده درزه و در نتیجه کاهش مقاومت برشی توده‌سنگ نیز می‌شود.

(۴) فاصله‌داری درزه‌ها: فاصله‌داری درزه‌ها عبارت است از فاصله میان دو درزه مجاور از یک دسته که در جهت عمود بر امتداد آن اندازه‌گیری شود. به‌طور کلی، هر چه فاصله‌داری درزه‌ها بیشتر باشد، کیفیت توده‌سنگ از شرایط مناسب‌تری برخوردار است (ارومیه‌ای، ۲۰۱۴).

(۵) استقامت سنگ: در این پارامتر استقامت سنگ بر اساس مقاومت تراکمی تک‌محوره ارزیابی می‌شود که برای ارزیابی از چکش اشمیت استفاده شده است. ویژگی‌های عوامل یاد شده در بروز خطر ناپایداری تونل در جدول ۷ ارائه شده است.

$$V(M_1 \geq M_2) = \begin{cases} 1 & ; m_1 \geq m_2 \\ \frac{u_1 - l_2}{(u_1 - l_2) + (m_2 - m_1)} & ; \text{other} \end{cases} \quad (6)$$

میزان بزرگی یک عدد فازی مثلثی از k عدد فازی مثلثی دیگر نیز از رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$V(M_1 \geq M_2, \dots, M_k) = \min[V(M_1 \geq M_2), \dots, V(M_1 \geq M_k)] \quad (7)$$

محاسبه‌ی وزن معیارها و گزینه‌ها در ماتریس مقایسات زوجی در روش تحلیل توسعه‌ای برای محاسبه وزن شاخص‌ها در ماتریس مقایسه زوجی به صورت رابطه ۸ عمل می‌کنیم (به نقل از: مؤمنی، ۲۰۰۶):

$$d(A_i) = \min\{V(S_i \geq S_k)\}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad k \neq i \quad (8)$$

۳-۵- محاسبه وزن بردار نهایی

بنابراین، بردار وزن شاخص‌ها به‌صورت ذیل (رابطه ۹) خواهد بود که همان بردار ضرایب غیر بهنجار تحلیل سلسله مراتبی فازی است (به نقل از: مؤمنی، ۲۰۰۶):

$$w = \left(d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n) \right)^T \quad (9)$$

۳-۶- ساختار کلی کار با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

- انتخاب معیارهای مورد نظر (تعیین ساختار).
- ارزیابی گزینه‌های تأثیرگذار بر پایه معیارهای انتخاب شده و تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیر معیارها و وزن دادن به جایگزین‌ها برای رسم ساختار؛ لازم است هدف، معیار و گزینه‌ها مشخص شوند.
- مقایسه زوجی و تعیین وزن معیارهای مختلف با توجه به هدف صورت گرفته (ترکیب ضریب اهمیت گزینه‌ها و ترکیب وزن‌ها).
- گردآوری داده‌ها در ارتباط با معیارهای تعریف شده.
- مقایسه زوجی هر کدام از گزینه‌ها به تفکیک هر کدام از معیارها.
- تعیین وزن پایانی هر کدام از گزینه‌ها و تعیین اولویت هر یک از آن‌ها.
- مقایسه معیارها با توجه به میزان تأثیرگذاری به‌صورت زوجی و نشان دادن وزن هر کدام روی ماتریس‌های سنجشی.

۳-۸- مراحل تحلیل سلسله مراتبی فازی تونل دسترسی

معدن انگوران زنجان

برای استفاده از این روش تجزیه و تحلیل، ابتدا ساختار برنامه بر پایه هدف تعیین شده رسم می‌شود. سپس معیارهای مورد ارزیابی معرفی و گزینه‌ها انتخاب می‌شوند. هدف پایانی در این بخش تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر ناپایداری است که بر مبنای آن بتوان قسمت بحرانی تونل که دارای بیش‌ترین خطر ناپایداری است شناسایی شود. معیارهای ارزیابی منظور شده در این پژوهش ۵ عامل یاد شده است. در شکل ۵ ساختار تحلیل سلسله مراتبی فازی تعریف شده برای ارزیابی خطر ناپایداری تونل دسترسی معدن انگوران آورده شده است. فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی، امکان استفاده از متغیرهای کیفی در کنار

متغیرهای کمی را دارد و مبتنی بر نظرات کارشناسی است (جدول ۸). وزن هرکدام از عوامل یاد شده در ایجاد ناپایداری بر پایه ماتریس مقایسه زوجی عوامل مطابق (جدول ۹ و ۱۰) تعیین می‌شود. ارزش‌گذاری عوامل از دید ماتریس مقایسه زوجی بر پایه اعداد فازی مطابق (جدول ۱۱) نیز انجام پذیرفت، سپس مقدار تأثیرگذاری هر عامل (M)، مطابق (جدول ۱۲) به دست می‌آید. در روش تحلیل توسعه‌ای برای هر یک از سطوح ماتریس مقایسات زوجی Sk که خود یک عدد مثلثی است، به صورت (جدول ۱۳) و پس از آن، درجه بزرگی (V) Sk نسبت به هم مطابق (جدول ۱۴) به دست می‌آید. در پایان در این روش وزن شاخص‌ها در ماتریس مقایسه زوجی به صورت (جدول ۱۵) به دست آمد.

جدول ۷. عوامل مؤثر در ناپایداری

Table 7. Effective factors in instability

| ردیف | متر از (متر) | مختصات | | | مقاومت تراکمی تک‌محوره سنگ (مگا پاسکال) | نسبت تنش مؤثر قائم به فشار آب منفذی | ارتفاع روباره (متر) | RQD (%) | فاصله‌گذاری درزه (سانتی‌متر) |
|------|--------------|---------|---------|------|---|--|------------------------|------------|---------------------------------|
| | | Z, m | Y | X | | | | | |
| ۱ | ۸۹۰-۹۰۰ | ۷۱۷۱۱۲۶ | ۴۰۵۵۰۴۰ | ۲۷۰۰ | ۰/۳۵ | ۲۴۰ | ۶۰ | ۱۲ | |
| ۲ | ۷۹۰-۷۸۰ | ۷۱۷۰۱۶ | ۴۰۵۵۰۵۱ | ۲۷۰۰ | ۰/۳۵ | ۲۳۰ | ۵۷ | ۱۳ | |
| ۳ | ۶۱۰-۶۲۰ | ۷۱۶۸۴۷ | ۴۰۵۵۰۶۷ | ۲۷۰۰ | ۰/۳۵ | ۲۲۰ | ۵۷ | ۱۲ | |
| ۴ | ۵۳۰-۵۲۰ | ۷۱۶۷۵۷ | ۴۰۵۵۰۷۶ | ۲۷۰۰ | ۰/۱۵ | ۲۲۰ | ۱۰۰ | ۲۲ | |
| ۵ | ۴۷۰-۴۶۰ | ۷۱۶۶۹۸ | ۴۰۵۵۰۸۲ | ۲۷۰۰ | ۰/۱۵ | ۲۲۰ | ۸۴ | ۲۴ | |
| ۶ | ۳۲۰-۳۳۰ | ۷۱۶۵۵۸ | ۴۰۵۵۰۹۵ | ۲۷۰۰ | ۰/۰۵ | ۲۲۰ | ۸۷ | ۲۴ | |
| ۷ | ۲۶۵-۲۵۵ | ۷۱۶۴۹۴ | ۴۰۵۵۱۰۲ | ۲۷۰۰ | ۰/۰۵ | ۲۲۰ | ۹۳ | ۱۵ | |
| ۸ | ۱۷۰-۱۸۰ | ۷۱۶۴۰۹ | ۴۰۵۵۱۱۰ | ۲۷۰۰ | ۰/۰۵ | ۲۰۰ | ۷۸ | ۱۸ | |
| ۹ | ۶۰-۷۰ | ۷۱۶۳۲۴ | ۴۰۵۵۱۱۸ | ۲۷۰۰ | ۰/۰۵ | ۲۰۰ | ۱۰۰ | ۲۳ | |

جدول ۸. عبارات کلامی و مقادیر عددی فازی مورد کاربرد

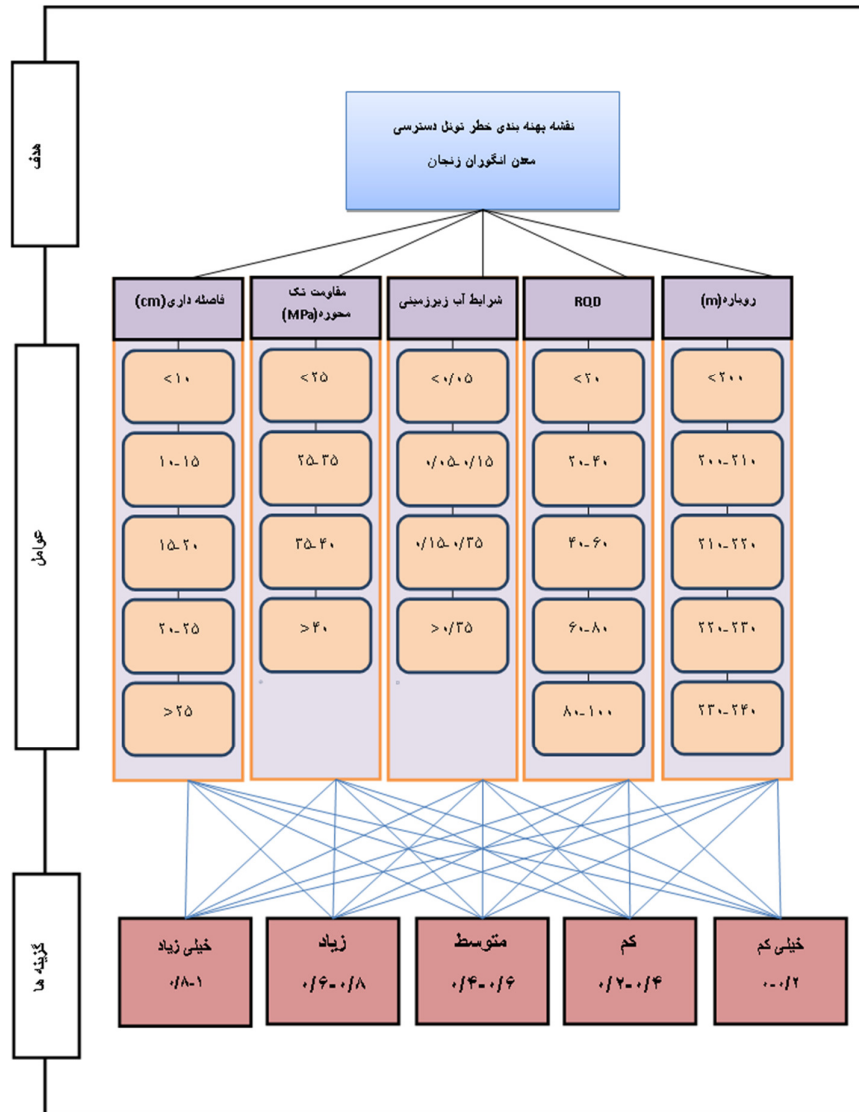
Table 8. Verbal expressions and fuzzy numerical values used

| کلامی | EXI | IEXI | VSI | IVSI | SI | ISI | MI | IMI | EI | IMI | MI | ISI | SI | IVSI | VSI | IEXI | EXI |
|-------|-----|------|-----|------|----|-----|----|-----|----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| قطعی | ۹ | ۸ | ۷ | ۶ | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | ۰/۵ | ۰/۳۳ | ۰/۲۵ | ۰/۲ | ۰/۱۷ | ۰/۱۴ | ۰/۱۳ | ۰/۱۱ |
| فازی | ۸ | ۷ | ۶ | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | ۱ | ۰/۳۳ | ۰/۲۵ | ۰/۲ | ۰/۱۷ | ۰/۱۴ | ۰/۱۳ | ۰/۱۱ | ۰/۱ |
| | ۹ | ۸ | ۷ | ۶ | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | ۰/۵ | ۰/۳۳ | ۰/۲۵ | ۰/۲ | ۰/۱۷ | ۰/۱۴ | ۰/۱۳ | ۰/۱۱ |
| | ۱۰ | ۹ | ۸ | ۷ | ۶ | ۵ | ۴ | ۳ | ۱ | ۱ | ۰/۵ | ۰/۳۳ | ۰/۲۵ | ۰/۲ | ۰/۱۷ | ۰/۱۴ | ۰/۱۳ |

جدول ۹. ماتریس مقایسه زوجی عوامل تأثیر گذار بر پایه اعداد واقعی

Table 9. Matrix of pairwise comparison of influencing factors based on real numbers

| معیارها | روباره | RQD | آب زیرزمینی | فاصله داری درزه | مقاومت تک محوره |
|--------------------|--------|------|-------------|--------------------|--------------------|
| روباره | ۱ | ۰/۳۳ | ۰/۲ | ۰/۱۴ | ۰/۱۱ |
| RQD | ۳ | ۱ | ۰/۳۳ | ۰/۲ | ۰/۱۴ |
| آب زیرزمینی | ۵ | ۳ | ۱ | ۰/۳۳ | ۰/۲ |
| فاصله داری درزه | ۷ | ۵ | ۳ | ۱ | ۰/۳۳ |
| مقاومت تک محوره | ۹ | ۷ | ۵ | ۳ | ۱ |



شکل ۵. ساختار تحلیل سلسله مراتبی فازی تعریف شده برای ارزیابی خطر ناپایداری تونل
 Fig. 5. Defined fuzzy hierarchical analysis structure for tunnel instability risk assessment

جدول ۱۰. وزن عوامل یاد شده بر مبنای تغییرهای کلامی

Table 10. The weight of the mentioned factors based on verbal changes

| متغیرهای کلامی | روباره | RQD | آب زیرزمینی | فاصله داری درزه | مقاومت تک محوره |
|-----------------|--------|-----|-------------|-----------------|-----------------|
| روباره | EI | | | | |
| RQD | MI | EI | | | |
| آب زیرزمینی | SI | MI | EI | | |
| فاصله داری درزه | VSI | SI | MI | EI | |
| مقاومت تک محوره | EXI | VSI | SI | MI | EI |

جدول ۱۱. ماتریس مقایسه زوجی عوامل تأثیرگذار بر پایه اعداد فازی

Table 11. The matrix of pairwise comparison of influencing factors based on fuzzy numbers

| (L,M,U) | روباره | RQD | آب زیرزمینی | فاصله داری درزه | مقاومت تک محوره |
|-----------------|----------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| روباره | (1,1,1) | (0/25,0/33,0/5) | (0/17,0/2,0/25) | (0/13,0/14,0/17) | (0/1,0/11,0/13) |
| RQD | (2,3,4) | (1,1,1) | (0/25,0/33,0/5) | (0/17,0/2,0/25) | (0/13,0/14,0/17) |
| آب زیرزمینی | (4,5,6) | (2,3,4) | (1,1,1) | (0/25,0/33,0/5) | (0/17,0/2,0/25) |
| فاصله داری درزه | (6,7,8) | (4,5,6) | (2,3,4) | (1,1,1) | (0/25,0/33,0/5) |
| مقاومت تک محوره | (8,9,10) | (6,7,8) | (4,5,6) | (2,3,4) | (1,1,1) |

جدول ۱۲. مقدار M برای هر عامل در محاسبه فازی

Table 12. The value of M for each factor in the fuzzy calculation

| M | L | M | U | فازی |
|-----------------|-------|-------|-------|--------------------|
| روباره | 1/65 | 1/78 | 2/05 | (1/65,1/78,2/05) |
| RQD | 3/55 | 4/67 | 5/92 | (3/55,4/67,5/92) |
| آب زیرزمینی | 1/06 | 9/53 | 11/75 | (7/42,9/53,11/75) |
| فاصله داری درزه | 13/25 | 16/33 | 19/5 | (13/25,16/33,19/5) |
| σC | 21 | 25 | 29 | (21,25,29) |

جدول ۱۳. عدد مثلثی فازی Sk برای عوامل مختلف بر پایه محاسبه فازی

Table 13. Fuzzy triangular number Sk for different factors based on fuzzy calculation

| Sk | L | M | U | فازی |
|-----------------|------|------|------|------------------|
| روباره | 0/02 | 0/03 | 0/04 | (0/02,0/03,0/04) |
| RQD | 0/05 | 0/08 | 0/13 | (0/05,0/08,0/13) |
| آب زیرزمینی | 0/11 | 0/17 | 0/25 | (0/11,0/17,0/25) |
| فاصله داری درزه | 0/19 | 0/28 | 0/42 | (0/19,0/28,0/42) |
| مقاومت تک محوره | 0/19 | 0/44 | 0/62 | (0/19,0/44,0/62) |

جدول ۱۴. ماتریس مقایسه زوجی عوامل تأثیرگذار برای تعیین درجه بزرگی (V)

Table 14. Pairwise comparison matrix of influencing factors to determine the degree of magnitude(v)

| V | روباره | RQD | آب زیرزمینی | فاصله داری درزه | مقاومت تک محوره |
|-----------------|--------|------|-------------|-----------------|-----------------|
| روباره | | 0/74 | 0/57 | 0/46 | 0/36 |
| RQD | 1 | | 0/82 | 0/67 | 0/55 |
| آب زیرزمینی | 1 | 1 | | 0/85 | 0/72 |
| فاصله داری درزه | 1 | 1 | 1 | | 0/87 |
| مقاومت تک محوره | 1 | 1 | 1 | 1 | |

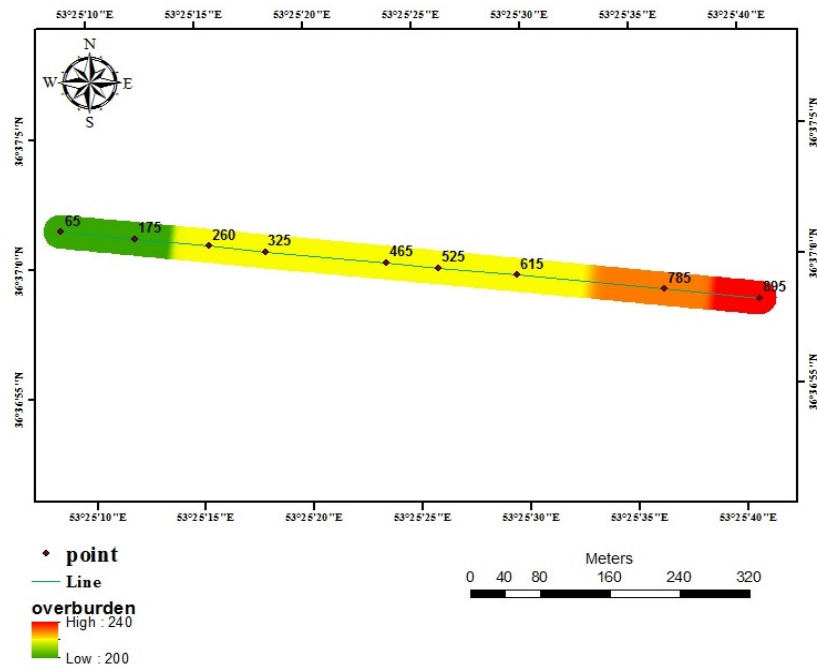
جدول ۱۵. ضرایب وزنی عوامل تأثیرگذار برای تهیه نقشه پهنه‌بندی

Table 15. Weight coefficients of influential factors for the preparation of zoning map

| | MIN | W | RANK |
|-----------------|---------|---------|------|
| مقاومت تک محوره | ۰/۰۰۲۲۱ | ۰/۰۰۰۷ | ۵ |
| فاصله داری درزه | ۰/۵۴۶۸۴ | ۰/۱۷۴۱۹ | ۴ |
| آب زیرزمینی | ۰/۷۱۹۳۱ | ۰/۲۲۹۱۳ | ۳ |
| RQD | ۰/۸۷۱ | ۰/۲۷۷۴۴ | ۲ |
| روباره | ۱ | ۰/۳۱۸۵۴ | ۱ |
| SUM | ۳/۱۴ | ۱ | |

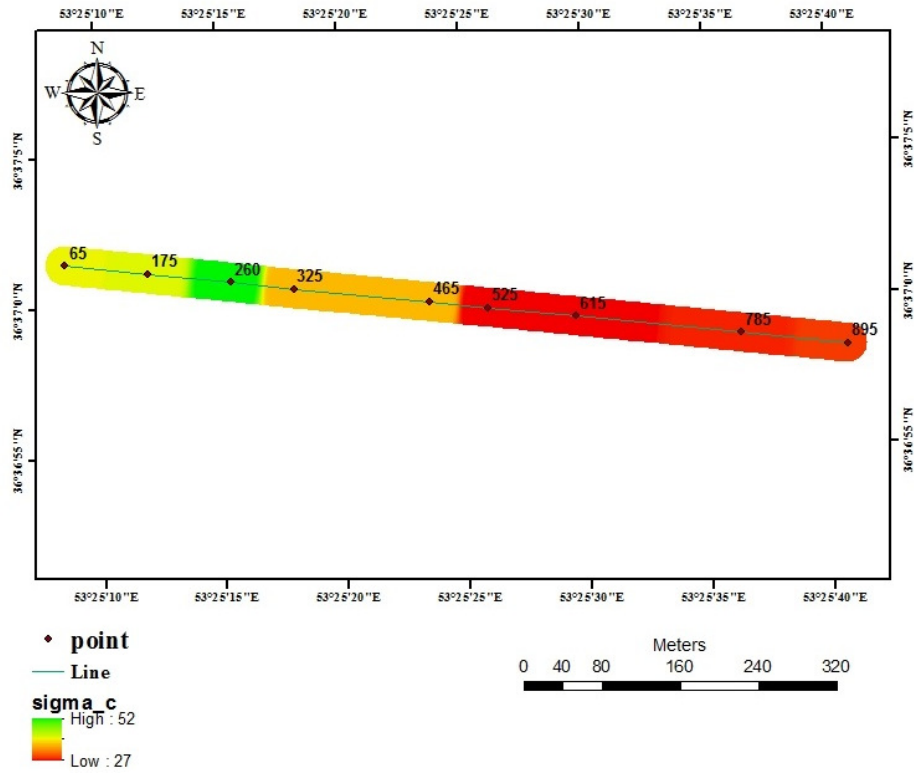
زمین‌شناسی احتمالی را شناسایی کرده و شیوه مناسب مقاوم‌سازی را برای کاهش اثرات آن پیشنهاد داد. نقشه پهنه‌بندی خطر ناپایداری تونل دسترسی معدن انگوران زنجان در تراز ۲۷۰۰ متری بر پایه پنج لایه اطلاعاتی تعریف و به کمک نرم‌افزار Arc GIS و بر اساس تحلیل سلسله مراتبی فازی تهیه شده است (شکل‌های ۶ الی ۱۰) که ویژگی‌های این نقشه در جدول ۱۶ ارائه شده است. در انتها نقشه خطر ناپایداری بر اساس تلفیق پنج معیار در نظر گرفته شده ترسیم گردیده است. بیشترین محدوده خطر مطابق نقشه پهنه‌بندی انتهای تونل دسترسی است که می‌تواند مورد مطالعه دقیق‌تری قرار گیرد (شکل ۱۱).

۳-۹- پهنه‌بندی خطر ناپایداری تونل تراز ۲۷۰۰ متری
امروزه در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مخاطرات زمین‌شناسی از ابزار و نرم‌افزارهای کارآمدی استفاده می‌شود. این ابزارها با بهره‌گیری از مدل ریاضی پیچیده و پیشرفته امکانات زیادی برای تحلیل دقیق‌تر ویژگی‌های زمین‌شناسی در اختیار می‌گذارند. از سوی دیگر سامانه اطلاعات جغرافیایی، توانایی زیادی برای تولید نقشه‌های پهنه‌بندی دارند و نمایش بصری بهتری در اختیار کاربران قرار می‌دهد. با تلفیق الگوهای ریاضی با کاربری‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی، امکان تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی و نمایش دامنه عملکرد مخاطرات میسر می‌شود. با استناد به این‌گونه نقشه‌ها می‌توان بحران ناشی از بروز مخاطرات

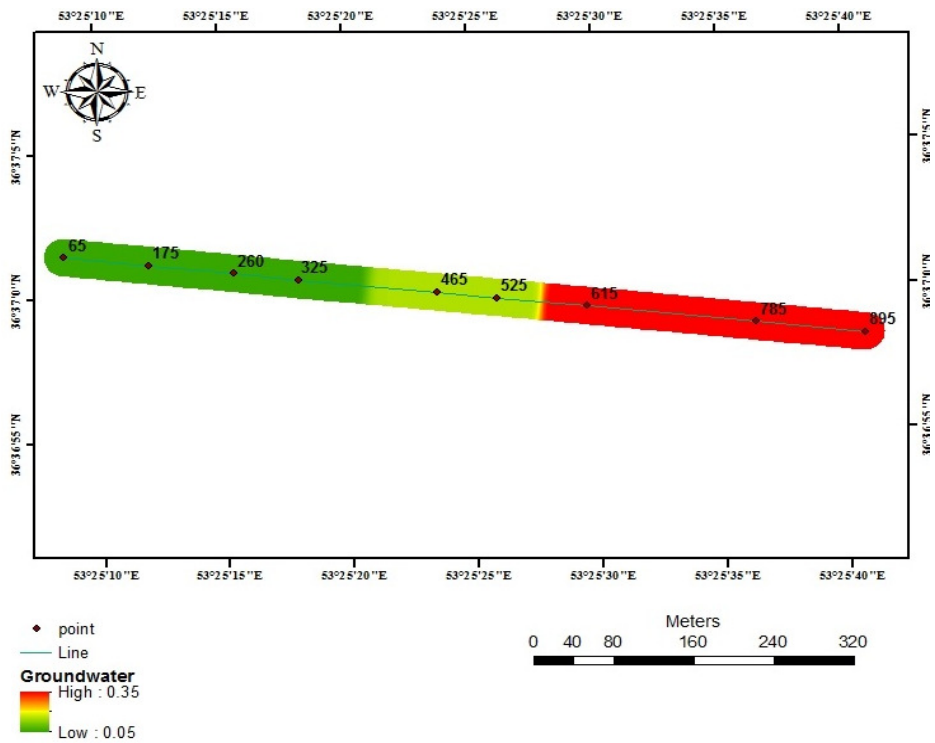


شکل ۶. لایه اطلاعاتی روباره (بر حسب متر) در مسیر تونل تراز ۲۷۰۰+

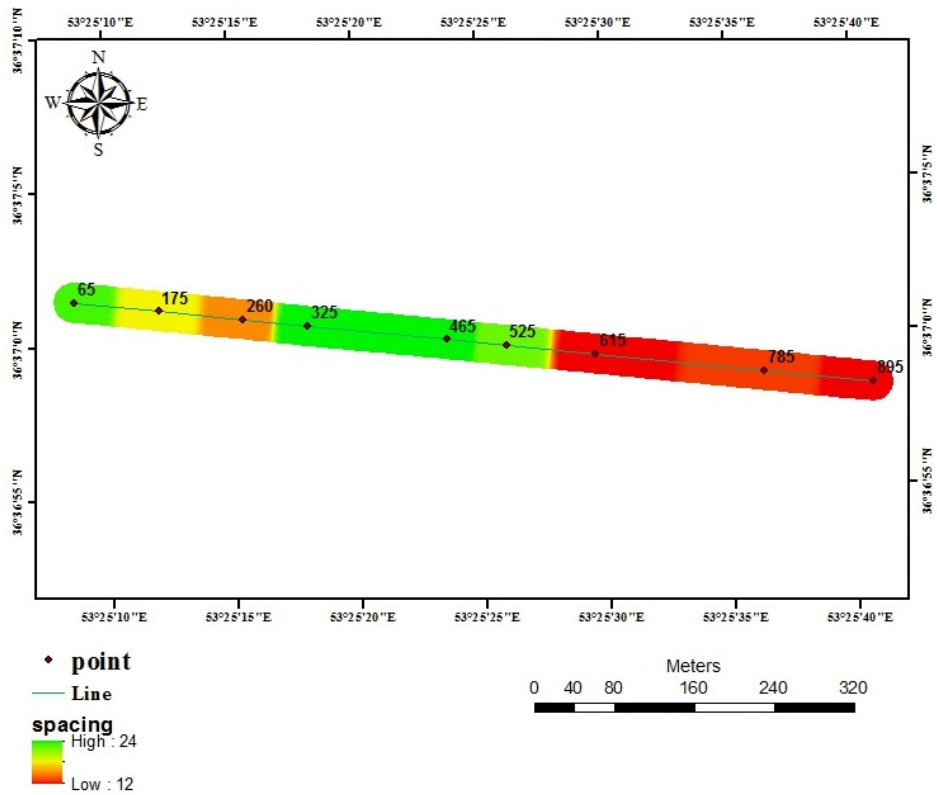
Fig. 6. Overburden information layer (in meters) on the tunnel route, level 2700+



شکل ۷. لایه اطلاعاتی مقاومت تک‌محوره سنگ (MPa) در مسیر تونل تراز +۲۷۰۰
Fig. 7. The information layer of rock uniaxial strength (MPa) in the 2700+ level tunnel route

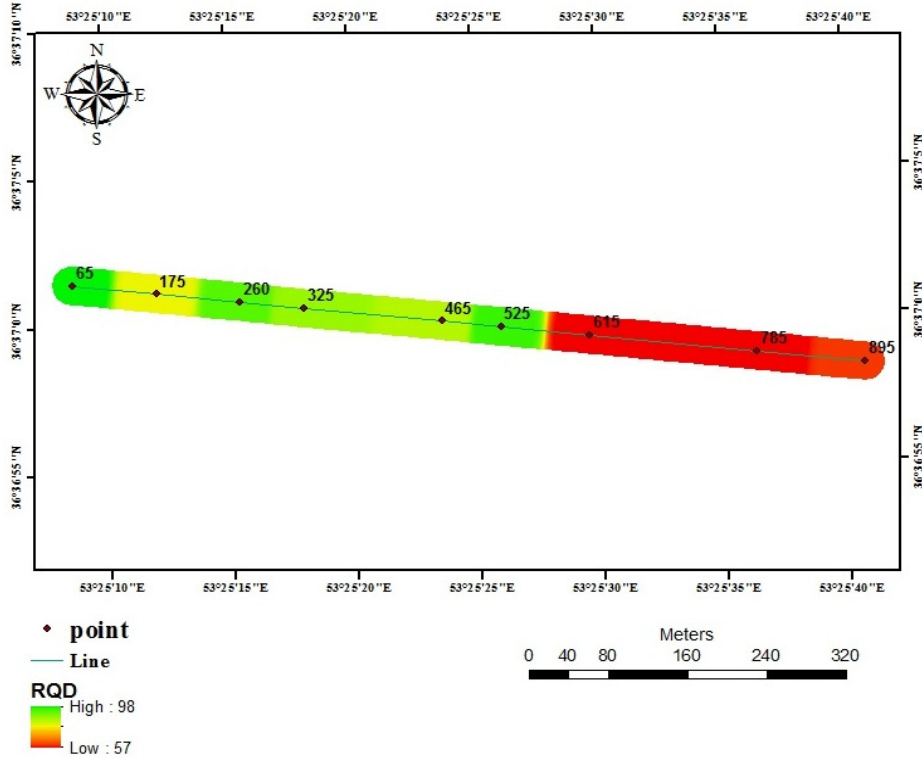


شکل ۸. لایه اطلاعاتی نسبت فشار آب منفذی به روباره در مسیر تونل تراز +۲۷۰۰
Fig. 8. The information layer of the ratio of pore water pressure to overburden in the tunnel route of level 2700+



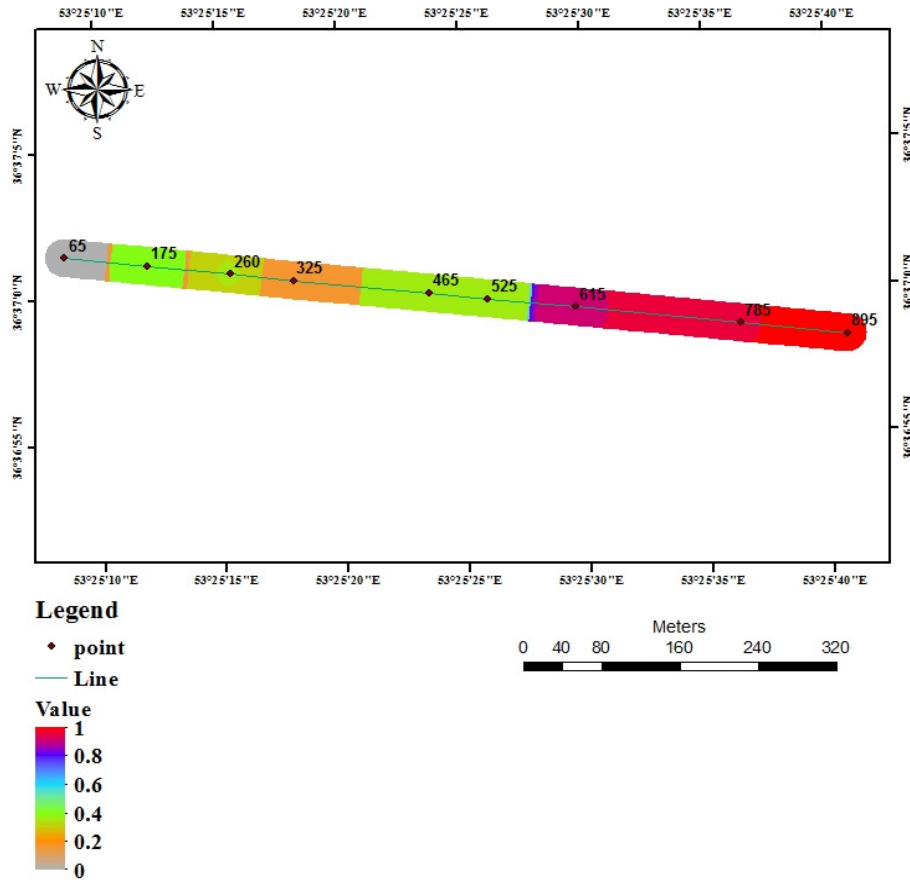
شکل ۹. لایه اطلاعاتی فاصله‌داری درزه‌ها (سانتی‌متر) در مسیر تونل تراز +۲۷۰۰

Fig. 9. The information layer of the spacing of the joints (cm) in the tunnel route at +2700 level



شکل ۱۰. لایه اطلاعاتی شاخص کیفی سنگ (%) در مسیر تونل تراز +۲۷۰۰

Fig. 10. The information layer of the stone quality index (%) in the tunnel route, level 2700+



شکل ۱۱. نقشه پهنه‌بندی خطر ناپایداری تونل تراز ۲۷۰۰+ با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی

Fig. 11. Zoning risk map of tunnel instability level 2700+ using fuzzy hierarchical analysis

جدول ۱۶. ویژگی زیرمعیارهای استفاده شده در نقشه پهنه‌بندی خطر ناپایداری تونل مورد مطالعه

Table 16. The characteristics of the sub-criteria used in the tunnel instability risk zoning map under study

| فاصله‌داری | | | وضعیت آب | | | مقاومت تک‌محوره | | | شاخص کیفی سنگ | | | روباره | | |
|------------|-------|-----------|----------|--------|-----------|-----------------|--------|-----------|---------------|--------|-----------|--------|--------|-----------|
| درجه | وزن | زیر معیار | درجه | وزن | زیر معیار | درجه | وزن | زیر معیار | درجه | وزن | زیر معیار | درجه | وزن | زیر معیار |
| ۱ | ۰/۵۵ | ۱۲-۱۵ | ۱ | ۰/۵۵ | ۰/۲-۰/۳۵ | ۱ | ۰/۴ | ۲۷-۳۰ | ۱ | ۰/۵۵ | ۵۷-۶۰ | ۱ | ۰/۴ | ۲۳-۲۴۰ |
| ۲ | ۰/۴۵ | ۱۵-۲۰ | ۲ | ۰/۴۶ | ۰/۱-۰/۲ | ۲ | ۰/۳۸ | ۳۰-۳۵ | ۲ | ۰/۴۵ | ۶۰-۸۰ | ۲ | ۰/۳۴ | ۲۲-۲۳۰ |
| ۳ | ۰/۰۰۲ | ۲۰-۲۴ | ۳ | ۰/۰۰۱۳ | ۰/۵-۰/۱ | ۳ | ۰/۲۶ | ۳۵-۴۰ | ۳ | ۰/۰۰۱۴ | ۸۰-۹۸ | ۳ | ۰/۲۶ | ۲۱۰-۲۲۰ |
| | | | | | | ۴ | ۰/۰۰۰۹ | ۴۰-۵۲ | | | | ۴ | ۰/۰۰۰۹ | ۲۰۰-۲۱۰ |
| | ۱ | جمع | | ۱ | جمع | | ۱ | جمع | | | جمع | | ۱ | جمع |

تغییری ندارد و بیشترین عامل مؤثر ویژگی‌های ساختاری سنگ است، نتایج حاصل از طبقه‌بندی Q، بیشترین مطابقت را با شرایط تونل دارد. طبق شاخص Q، دو تیپ توده‌سنگ ضعیف و توده‌سنگ خوب شناسایی شد که بیشترین طول تونل در محدوده ضعیف قرار دارد. با توجه به دو نوع توده‌سنگ شناسایی شده، دو تیپ تحکیمات

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از طبقه‌بندی تجربی نشان می‌دهد که در طبقه‌بندی RMR، توده‌سنگ مسیر تونل دسترسی تراز ۲۷۰۰+ به درده متوسط و خوب قابل تقسیم‌بندی است و برای پایدارسازی تونل دو تیپ تحکیمات تعیین شده است. اما به دلیل این که توده‌سنگ از لحاظ پترولوژی

- Barton, N., Lien, R., And Lunde, J (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, 6(4): 189-236.
- Bieniawski, Z. T (1973) Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S Afr Inst Civ Eng*, 15(12): 335-344.
- Bieniawski, Z. T (1974) Estimating the strength of rock materials. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 74(8): 312-320.
- Burnol, L (1968) Contribution à l'étude des gisements de plomb et zinc del' Iran. essais de classification paragenetique [sic] (No. 11), Geological Survey of Iran.
- Baynes, F. J., Fookes, P. G., Kennedy, J. F (2005) The total engineering geology approach applied to railways in the Pilbara. *Western Australia, Bull Eng Geol Environ*, 64: 67-94.
- Bakhshndeh Amieh, H., Taei Semiromi, S., Rahimi, M., Pirmoradian, H (2014) Stability analysis of the support system for Sardasht long tunnel using convergence -confinement and Hoek-Brown criteria. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 7: 83-92 (in Persian).
- Babazadeh, R., Asghari Kaljahi, E (2022) Instability risk assessment of open cut trenches of Sungun copper mine by FAHP. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 15(2): 91-112 (in Persian).
- Feizi, A., Hezarkhani, A (2013) The Separation of Geochemical Anomalies from Background by Concentration-Area Fractal Method (Angouran Area, Northwestern Iran). *Advanced Applied Geology*, 3(3): 43-53 (in Persian).
- Hoek, E., Brown, E (1977) practical estimates off rock mass strength. *rock mech and mine*, 34(8): 1165-1186.
- Javadi, M (2011) Selection of extraction method and stability analysis of Angoran underground lead and zinc mine. Master's thesis, Faculty of Mining. Tarbiat Modares University of Tehran, (in Persian).
- Jiang, L., Kong, P., Shu, J., Fan, K (2019) Numerical analysis of support designs based on a case study of a longwall entry. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(9): 3373-3384.
- Momeni, M (2006) New topics of research in operations. Tehran University Press, 252p (in Persian).
- Marinos, M., Hoek, E (2001) Estimating the geological properties of heterogeneous rock masses such as flysh. *Bulletin of the engineering geology and the environment*, 60: 85-92.
- OECD (1973) Optimization of Road Alignment by the Use of Computers. Paris.
- تعیین شده که برای ۸۰ درصد از طول تونل، تیپ یک پیشنهاد می‌گردد که میل مهار به طول ۲/۵ متر و فاصله ۲/۵ متر و شاتکریت به ضخامت ۵ سانتی‌متر است. در طبقه‌بندی مهندسی سنگ پارامترهایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند که از لحاظ امتیازدهی در بیشتر طول میسر از تونل یکسان هستند و برخی از شرایط محلی در نظر گرفته نمی‌شوند. با استفاده از نقشه پهنه‌بندی به‌دست‌آمده می‌توان برای هر محدوده تیپ پایدار کنند متناسب با آن را تعریف نمود. فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی، امکان استفاده از متغیرهای کیفی در کنار متغیرهای کمی را دارد و مبتنی بر نظرات کارشناسی است. برای ارزیابی و تعیین درجه اهمیت شاخص‌ها در این پروژه از روش F-AHP استفاده شده است تا ارزیابی به شرایط واقعی نزدیک‌تر باشد. طبق نتایج به‌دست‌آمده از نظر سنجی عوامل مؤثر بر ناپایداری تونل دسترسی معدن انگوران زنجان به ترتیب عبارت‌اند از: روباره، RQD، شرایط آب زیرزمینی، فاصله‌داری و در نهایت مقاومت سنگ است. به دلیل یکسان بودن جنس سنگ در طول مسیر تونل مقاومت سنگ دارای کمترین اهمیت است. با توجه به وضعیت توپوگرافی سطح هرچه به سمت انتهای تونل حرکت می‌کنیم، مقدار ارتفاع ستون سنگی افزایش می‌یابد که این افزایش ارتفاع باعث افزایش تنش وارده بر تونل و تغییر در خصوصیات درزه‌ها است، به‌گونه‌ای که در قسمت‌های انتهایی بیشترین محدوده خطر به دلیل قرارگیری در عمق ۲۲۰ متری از سطح زمین است. با مشخص شدن وضعیت خطر در نواحی مختلف تونل می‌توان تیپ پایداری متناسب با هر مقطع و گام پیشروی را پیشنهاد داد و مبنای مطالعات بعدی به‌ویژه مطالعات عددی قرار گیرد.

References

- Ahmadi khounsaraki, V., Uromeihy, A., Madanipour, S., Amiri, M (2022) Evaluation of geomechanical properties of argillite rocks in the region of south Makran (Chabahar-Nikshahr railway). *New Findings in Applied Geology*, 17 (33): 150-168. doi: 10.22084/nfag.2022.26043.1514 (in Persian).
- Ajalloeian, R., Dadkhah, R., Hasan Mirzaei, Z (2009) Application of engineering geology in tunnels, Alavi Educators Publications, Iran, 334p. (in Persian).
- Asgharpour, M (2008) Multi-criteria decision making, Tehran University Publications, Iran, 400p (in Persian).

- Roshanghalb, M (2007) Investigation of behavior of created failure in North wall of Angooran mine with offering solution. M. Sc. thesis, Islamic Azad University of Tehran (in Persian).
- Soltani, A (1999) Estimation of geotechnical parameters of rock mass and optimal slope design in Angooran mine. M. Sc. thesis, Tarbiat Modarres University of Tehran (in Persian).
- Sabzevari, B., Fallah, A., Moshrefifar, M., Emami, E (2018) Sustainability Analysis and Design of water tunnel Maintenance system on Mashoorh Dam. Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology, 10: 97-111 (in Persian).
- Trinh, N., Jonsson, K., (2013) Design considerations for an underground room in a hard rock subjected to a high horizontal stress field at Rana Gruber, Norway. *Tunnelling and underground space technology*, 38: 205-212.
- Technical office of Angooran mine (2009) Geology report of Angooran mine (in Persian).
- Torkamanjo, K., Najafi, M., Ghelijzadeh, J., Mehrmahad, H (2018) Estimation of Minimum Heterogeneous Face Support Pressure in Mechanized Tunneling Using Numerical and Analytical Methods, Case Study: Tehran Metro Line 7. Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology, 11(3): 47-60 (in Persian).
- Uromeihy, A., Sadat Razavi, E., Baghri, V (2017) Evaluation of liquefaction hazard along Line 2 of Rasht Metro by the use of AHP fuzzy method. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 26 (103): 227-236. doi: 10.22071/gsj.2017.46612 (in Persian).
- Uromeihy, A (2014) Advanced engineering geology. Tarbiat Modares University (in Persian).
- Yaghoubi, E., Shamsadin Saeid, M., Maarefvand, P (2017) Slope stability analysis and evaluation of further major failure in Angooran open-pit mine. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 6 (12): 33-45 (in Persian).
- Zarei, H. R., Uromeihy, A. Sharifzadeh, M (2013) A new tunnel inflow classification system through sedimentary rock masses. *Tunnelling and underground space technology*, 34: 1-12.

Angouran mine access tunnel stability assessment using the experimental classification method and fuzzy hierarchical analysis (FAHP)

V. Ahmadi Khounsaraki¹, A. Uromeihy^{*2}, M. Amiri³ and M. R. Nikudel⁴

1- Ph. D. student, Dept. of Geology, Faculty of sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Prof., Dept. of Geology, Faculty of sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Ph. D. student, Dept. of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4- Assoc. Prof., Dept. of Geology, Faculty of sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* uromeiea@modares.ac.ir

Received: 2022.12.11 Accepted: 2023.2.25

Abstract

Zanjan Angaran lead and zinc mine access tunnel with the length of 1133 meters has been excavated for underground extraction at a level of 2700 meters with an existing cross section of 7.5 square meters. The tunnel cross-section is to be increased to 20 square meters in order to access the trucks for cut and cover extraction. In this study, while studying tunnelling and underground space stability methods, the stability conditions of Anguran mine access tunnel were investigated empirically, fuzzy hierarchical analysis. In the experimental method, while classifying rock masses by Q, RMR and GSI methods using Q classification results, two types of reinforcement were introduced, due to their greater conformity with the region, with 80% tunnelling of type 2 with 2cm shotcrete and rockbolts with 2.5 meters length and 2.5 meters spacing. According to the same conditions in the empirical classification parameters using fuzzy hierarchical analysis, as a multilayer information analytical criterion based on the amount of overburden, RQD index of rock, spacing, rock and water strength in defined tunnel stability and weighting to layers and overlap In Arc GIS environment, a hazard zoning map is presented in the tunnel, which according to the map of the end of the tunnel has the highest risk of instability.

Keywords: Tunnel stability, Experimental classification of rock mass, Anguran mine, Fuzzy hierarchical analysis and GIS

Introduction

During the last few decades, to shorten the route and also obtain minerals, underground excavations have been significantly carried out. Exploration, design, establishing the safety of tunnels, in general, underground spaces, during construction, and, if necessary, its long-term stability are among the issues that must be considered by designers. In this case, before excavation, it is necessary to prepare comprehensive information about the geology, structural geology, and engineering geology of their scope of implementation. The problems in the projects have various causes: 1- It is possible to not pay attention to the geological conditions of the place. 2- The collected data from the site may have errors. 3- Field research might not be done properly.

Accordingly, engineering geological investigations for the evaluation of the construction site, design, and maintenance operations of underground spaces have become mandatory. Geological structures, lithological

diversity, geomechanical properties as well as rocks and soil strength of the area should be provided to the designer. Digging tunnels and underground spaces disturb the natural balance of the earth, which requires evaluating methods for the stability of underground spaces.

Materials and methods

In this study, at first, the library method was used to determine the topic and research method. Then, field visits have been done. Experts working in the mine were used in these visits. In these visits, In addition to getting to know the physical conditions of the project implementation site, other local information was also collected and used. Activities considered in these visits include local identification, supplementing information from local sources, and planning.

The characteristics of petrology and stratigraphy have not changed because the entire tunnel route is 2,700 meters from the point of view. Therefore, to obtain information

about the entire route of the tunnel, Field sampling of discontinuities divided into 100-meter parts, and every 100 meters, discontinuities were investigated in a 10-meter section. In the next stage, Schmidt's hammer has been used to determine the strength of the rocks. The third step was the questionnaire preparation to collect people's opinions. The fourth stage was the experimental methods which studied the mechanical properties of rock mass and accurate perception of joint characteristics, measurement of underground water conditions, and all-round pressures. The rock mass was classified and their stability was evaluated according to RMR, Q-system, and GSI methods.

The fifth step is the analytical method, in this method, phasic hierarchical analysis was used, which is a decision-making method. In various problems, it is possible to formulate the problem hierarchically based on several criteria.

Discussion

The results of the experimental classification showed that in the RMR classification, the rock mass of the access tunnel route 2700+ level can be divided into two categories, medium and good, and two types of reinforcements have been determined to stabilize the tunnel. However, the results of Q classification are the most consistent with tunnel conditions because the rock mass does not change in terms of petrology and the most effective factor is the structural characteristics of the rock. According to the Q index, two types of rock masses were identified, Weak and good rock masses, and the longest length of the tunnel is in the weak range.

According to two identified rock masses, two types of reinforcements have been determined,

and for 80% of the length of the tunnel, type one is suggested. The anchor rod is 2.5 meters long the distance is 2.5 meters, and the shotcrete is 5 cm thick. In rock engineering classification, Rock parameters are evaluated which are the same in terms of scoring in most of the length of the tunnel, some local conditions are not considered.

It is possible to define the type of stabilizer for each range according to the obtained zoning map. The process of phasic hierarchical analysis has the possibility of using both qualitative and quantitative variables and is based on expert opinions.

To evaluate and determine the importance degree of indicators in this project, the F-AHP method was used which made the evaluation closer to the real conditions.

Conclusion

According to the results obtained from the survey, the factors affecting the instability of the access tunnel of the Angoran mine in Zanjan are overburden, underground water conditions, spacing, and rock strength. Due to the same rock material along the tunnel route, the rock strength is the least important.

According to the topographical situation of the surface, as we move towards the end of the tunnel, the height of the rock column increases which increases the tension, and changes in the characteristics of the joints, and it affects the tunnel. Thus, the end part is the most dangerous area because it is located at a depth of 220 meters from the ground. By identifying the dangerous situation in different areas of the tunnel, it is possible to suggest the type of suitable stability for each section and step forward, and the basis of subsequent studies, especially numerical studies.