

مقایسه سامانه‌های نگهداری پیشنهادی Q و MRMR برای تقاطع تونل‌های معدنی با استفاده از مدل‌سازی عددی (مطالعه موردی: تقاطع W3 معدن شماره یک پروده)

مقاله پژوهشی

بویا قهرمانی سقایی^۱؛ مهدی نوروزی^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد استخراج معدن؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، p.ghahremani.tabriz@gmail.com

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، mnoroozi.mine@gmail.com، mehdi.noroozi@shahroodut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

شماره صفحات: ۱۳۵ تا ۱۵۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2025.14764.1489

واژگان کلیدی	چکیده
طراحی سامانه نگهداری روش MRMR روش Q مدل‌سازی عددی تقاطع W3 معدن پروده	هدف اصلی این پژوهش، مقایسه سامانه‌های نگهداری پیشنهادی روش‌های تجربی RMR و Q برای تقاطع تونل‌های معدن زغال‌سنگ و برآورد میزان کارایی این روش‌های طبقه‌بندی ژئومکانیکی در پایداریسازی تقاطع‌ها است. در این مقاله، با تمرکز بر روی تقاطع W3 واقع در معدن شماره یک پروده طیس به عنوان مورد مطالعاتی، اطلاعات لازم از طریق برداشت‌های میدانی و آزمایشگاهی، جمع‌آوری شد. بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده و با استفاده از روش‌های تجربی طبقه‌بندی ژئومکانیکی MRMR و Q، رده‌بندی توده سنگ انجام شد. سپس با توجه به امتیازهای به دست آمده، سامانه‌های نگهداری مناسب برای تقاطع W3 طراحی شد. در ادامه، سامانه‌های نگهداری طراحی شده با استفاده از روش المان محدود و با کاربرد نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی شدند. به منظور اعتبارسنجی مدل‌های عددی تهیه شده، وضعیت فعلی تقاطع به همراه سامانه نگهداری نصب شده در محل، مدل‌سازی شده و مقادیر جابجایی حاصل با مقادیر جابجایی برداشت‌شده از ابزار دقیق نصب شده در محل، مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد که داده‌هایی که از مدل‌سازی به دست آمده با داده‌های برداشتی از جابجایی‌سنج‌های معدن، تطابق قابل قبولی دارد. در نهایت مدل‌های تهیه شده بر اساس سامانه‌های نگهداری پیشنهادی هر یک از روش‌های طراحی تجربی (MRMR و Q) تحلیل شدند. نتایج مدل‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که سامانه نگهداری پیشنهادی روش Q نسبت به روش MRMR، محافظه‌کارانه‌تر است و منجر به رخداد جابجایی‌های کمتر در تقاطع می‌شود.

۱- مقدمه

است که از وضعیت پایداری کمتری برخوردار است. به طور خاص در خصوص معادن زغال‌سنگ که از پایداری نسبی کمتری نسبت به معادن سنگ سخت برخوردار هستند، این موضوع اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. قابل تاکید است که هرگونه شکست و ریزش در تونل‌ها باعث کاهش یا اختلال در تولید معدن و یا خسارات جانی و مالی می‌شود. بنابراین

ایجاد فضاهای زیرزمینی در معادن جهت دسترسی به ماده معدنی امری اجتناب ناپذیر است. جهت تامین پایداری فضاهای زیرزمینی، استفاده از سامانه تقویت یا نگهداری مناسب الزامی است. یکی از مناطق بسیار حساس در فضاهای زیرزمینی، محل تقاطع تونل‌ها و یا تونل و کارگاه

* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه شاهرود؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه دوم؛ کدپستی: ۴۶۱۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۹۵۵۰۹

زمین با دقت مناسب است. بسته به نوع مساله مورد بررسی، از روش سه بعدی یا دو بعدی استفاده می‌شود. روش‌های دوبعدی به طور معمول در تحلیل پایداری گالری‌ها و دسترسی‌ها که یک بعد آنها، طول بسیار بیشتری نسبت به دو بعد دیگر دارد، استفاده می‌شوند. برای مدل‌سازی کارگاه-های استخراج زیرزمینی و تقاطع‌های تونل‌ها لازم است از روش‌های سه بعدی استفاده شود. در ادامه به بررسی برخی پژوهش‌ها در زمینه تحلیل پایداری کارگاه‌ها، راهروهای معادن زغال‌سنگ و همچنین تقاطع تونل‌ها پرداخته شده است.

پایول و همکاران (Paul et al., 2011) تحقیقات خود را درباره‌ی معدن زغال‌سنگ زیرزمینی در هندوستان شروع کردند. آنها با استفاده از روش مدل‌سازی عددی توانستند نگهداری تونل‌های این معدن را که با روش طبقه‌بندی توده‌سنگ RMR طراحی شده بود، بازبینی و سیستم قابل اطمینان‌تری ارائه کنند. کولاتیلاک و همکاران در سال ۲۰۱۳ تحقیقاتی را در معدن زیرزمینی زغال‌سنگ واقع در چین انجام دادند. آنها با استفاده از اطلاعات موجود، یک مدل عددی سه‌بعدی با استفاده از نرم افزار *FLAC3D* برای شبیه‌سازی شرایط تنش در اطراف تونلی که متحمل تنش‌های درجا زیاد بود، تهیه نمودند. نتایج به دست آمده در خصوص الگوهای تنش و جابجایی در اطراف تونل، برای انتخاب بهترین شکل مقطع تونل و مناسب‌ترین سامانه نگهداری برای دستیابی به شرایط پایداری مطلوب، استفاده شد. در نهایت آنها نشان دادند که با نصب سامانه نگهداری پیشنهادی، جابجایی‌ها به نصف کاهش خواهد یافت (Kulatilake et al., 2013). عبدالله و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از نرم افزار *FLAC3D* به بررسی پایداری تقاطع‌های معدنی در معدن *Garson* کانادا پرداختند. به اعتقاد آنها، پایداری تونل‌های معدن در طول دوره برنامه‌ریزی تولید یا عمر معدن از اهمیت بالایی برخوردار است. آنها مقدار جابجایی‌ها را در اطراف تونل با استفاده از کشیدگی‌سنج‌ها به دست آوردند و برای جلوگیری از ریزش تونل، نگهدارنده‌های تقویتی پیشنهاد نمودند (Abdellah et al., 2014). کانیک و همکاران در سال ۲۰۱۵ به طراحی سامانه نگهداری با استفاده از روش‌های تجربی، در تونل ماکا در شمال شرقی ترکیه، پرداختند. آنها ابتدا با استفاده از

طراحی سامانه نگهداری مطمئن، ایمن و اقتصادی از یک طرف باعث پایداری تونل‌ها و حفاظت از جان و سرمایه معدن می‌شود و از طرف دیگر سبب افزایش نرخ بازیابی و کاهش هزینه‌های تولید معدن می‌شود. روش‌های مختلفی وجود دارد تا رفتار توده سنگ در برابر فشارها را بررسی و سامانه‌های تقویت و نگهداری با امنیت بالا و هزینه مناسب را طراحی کنند. از مهمترین روش‌های تحلیل پایداری و طراحی سامانه‌های نگهداری فضاهای زیرزمینی می‌توان به روش‌های تجربی و عددی اشاره نمود. روش‌های تجربی، تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی را به کمک تحلیل‌های آماری و مشاهدات میدانی انجام می‌دهند. طبقه‌بندی مهندسی سنگ، کاربردی‌ترین روش تجربی شناخته شده برای تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی معدنی و طراحی سامانه‌های نگهداری است. از شاخص‌ترین این طبقه‌بندی‌ها می‌توان به رده‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR) و شاخص کیفی توده سنگ (Q) اشاره نمود. البته برای کارهای معدنی امتیاز تعدیل شده RMR موسوم به MRMR (Mining Rock Mass Rating) پیشنهاد شده است.

ضروری است بسته به شرایط منطقه، روش مناسب برای طراحی سامانه نگهداری انتخاب شود. به طور خاص، در مورد معادن زغال‌سنگ که معمولاً در شرایط سنگ لایه‌ای و نرم قرار دارند، نیاز است کارایی هر یک از روش‌های موجود بررسی شود. لذا در این مقاله، با تمرکز بر معدن شماره یک پرورده طبس، به مقایسه سامانه‌های نگهداری پیشنهاد شده توسط هر یک از روش‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ MRMR و Q برای یکی از نقاط حساس معدن، یعنی تقاطع W_3 ، پرداخته خواهد شد. چگونگی عملکرد سامانه‌های نگهداری پیشنهادی روش‌های تجربی MRMR و Q با استفاده از تحلیل‌های عددی ارزیابی می‌شود. عمدتاً روش‌های عددی برای تحلیل پایداری و طراحی سامانه نگهداری که در مراحل اولیه با استفاده از روش‌های ساده‌تر (مانند روش‌های تجربی) طراحی شده‌اند، به کار گرفته می‌شوند.

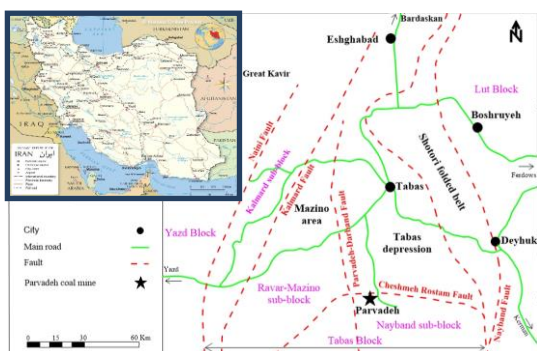
امروزه کاربرد روش مدل‌سازی عددی در تحلیل پایداری فضای زیرزمینی و طراحی سامانه‌های نگهداری مورد استقبال بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. از دلایل اصلی این امر، امکان مدل‌کردن شرایط پیچیده‌ی

کردن هر یک از پیچ‌سنگ‌ها، بهترین نوع آنها را برای نگهداری پیشنهاد نمودند (Tang et al., 2021). عباسی و همکاران به بررسی ناپایداری تونل‌های اصلی معدن مکانیزه زغال سنگ پروده طبس در تقاطع با لایه زغال سنگ پرداخته‌اند. نتایج تحلیل پایداری انجام شده با استفاده از مدل‌سازی‌های دو بعدی و سه بعدی با کاربرد نرم افزار *FLAC* نشان داد که تونل‌های مورد مطالعه با سامانه نگهداری قاب فولادی ناپایدار است. پیچ‌سنگ می‌تواند به عنوان یک سامانه نگهداری موفق به کار برده شود (Abbasi et al., 2021). تانگ و همکاران یک سامانه نگهداری تونل ابداعی را برای تونل‌های حفر شده توسط *TBM* در معادن زغال سنگ زیرزمینی چین توسعه دادند. آنها دریافتند که پیچ‌سنگ‌کاری عامل اصلی تاخیر در عملیات تونل‌زنی *TBM* است و سامانه پیشنهادی می‌تواند این مشکل را برطرف کند. مدل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار *ABAQUS* تهیه شدند و ظرفیت باربری سامانه جدید پیشنهادی تجزیه و تحلیل شد (Tang et al., 2023). مسوتوقلو و ازکان به ارزیابی و مقایسه سامانه‌های نگهداری پیچ‌سنگ و قاب فولادی در گالری‌های زیرزمینی معدن زغال سنگ پرداختند. به عنوان مورد مطالعاتی بر روی معدن زغال سنگ زیرزمینی *Ömerler* در ترکیه تمرکز کردند. نتایج مدل‌سازی عددی با استفاده از *FLAC3D* نشان می‌دهد که تغییر مکان و تنش در ناحیه نگهداری شده توسط پیچ‌سنگ زرینی-سیمانی کمتر از ناحیه نگهداری شده توسط آرک‌های فولادی است (Mesutoglu & Ozkan, 2024).

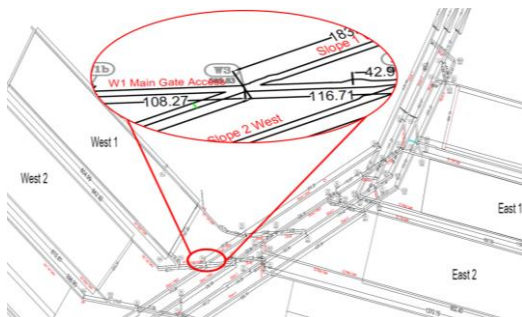
بر اساس پیشینه مطالعات انجام شده، تاکنون مطالعه-ای بر روی مقایسه سامانه‌های نگهداری پیشنهادی روش‌های *RMR* و *Q* برای تقاطع تونل‌های معادن زغال سنگ و برآورد میزان کارایی این روش‌های طبقه‌بندی ژئومکانیکی انجام نشده است. هدف اصلی این مقاله، انتخاب مناسب‌ترین روش تجربی برای طراحی سامانه نگهداری تقاطع تونل‌های معادن زغال سنگ است. در این راستا، با تمرکز بر روی معدن شماره یک پرورده طبس، در ابتدا به جمع‌آوری اطلاعات زمین‌شناسی و ساختاری از جمله پارامترهای ژئومکانیکی منطقه شامل ضریب پواسون، مدول الاستیسیته، مدول برشی، مدول حجمی، مدول یانگ، تنش عمودی و نسبت تنش افقی به عمودی و همچنین بررسی وضعیت تونل‌ها و

نسخه‌های *RMR89* و *RMR14* سامانه‌های نگهداری را برای تونل پیشنهاد دادند. سپس سامانه‌های نگهداری پیشنهادی را با استفاده از روش المان محدود تحلیل نمودند. در این راستا، حداکثر جابجایی کل و حداکثر ضخامت منطقه پلاستیکی در اطراف تونل ماکا مقایسه شدند. نتایج بررسی آنها نشان داد که نسخه *RMR14* سیستم نگهداری واقع‌بینانه‌تری را پیشنهاد می‌دهد (Kanik, et al., 2015). بای و توو (Bai & Tu, 2016) مطالعاتی در خصوص راهروهای دسترسی روش جبهه‌کار طولانی انجام دادند و به بررسی عوامل ریزش سقف و جریان هجومی آب پرداختند. آنها با تکیه بر مشاهدات صحرائی و شبیه‌سازی‌های عددی، محدوده وسیعی از جبهه‌کار را تحلیل کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که انتخاب اشتباه مکان حفاری تونل و طراحی غیر اصولی سامانه‌های نگهداری، مهمترین عواملی بودند که باعث شکست سقف شدند. کانگ و همکاران (Kang et al., 2018) تحقیقات خود را برای بررسی و طراحی یک سامانه نگهداری کارآمدتر برای تونل‌های معادن زغال سنگ که از مناطق پر خطر گسلی عبور می‌کنند، انجام دادند. آنها یک تونل در منطقه معدنی چین را به عنوان مورد آزمایشی در نظر گرفتند. در نهایت، سامانه نگهداری ترکیبی پیشنهادی در تونل آزمایشی، اجرا و نتایج نشان داد که از تغییرشکل‌های جدی جلوگیری شده است. لی و همکاران (Li et al., 2019) راهروی اصلی برگشت هوا در معدن زغال سنگ چاگانور در چین که تحت شرایط آماسی شدید قرار دارد را مورد مطالعه قرار دادند. راهرو در لایه زغالی در عمق حدود ۲۱۰ متری قرار گرفته و در حین حفاری راهرو، تغییرشکل‌های قابل توجهی به طور مداوم مشاهده شده است. برای نگهداری این راهرو، قاب‌های فلزی *I* شکل (No. 12 mining I-beam) با تقویتی افقی در تاج و کف به عنوان سامانه نگهداری پیشنهاد شده است. تانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ در زمینه‌ی اثرگذاری سامانه نگهداری پیچ‌سنگ در بازکننده‌ی معدن زغال سنگ ژانگجی در چین مطالعاتی انجام دادند. در این مطالعه مقادیر کیفیت توده‌سنگ (*RQD*) تعیین شده و برای مدل‌سازی عددی از نرم افزار (*UDEC*) استفاده شده است. آنها با نصب دو نمونه از پیچ‌سنگ با آرایش‌های مختلف، رفتارهای جابجایی تونل و تنش‌های وارده را مورد بررسی قرار دادند و با مقایسه

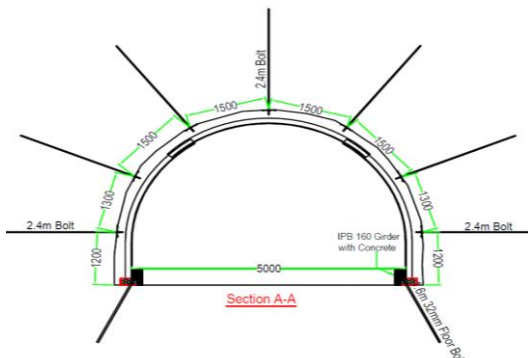
تقاطع W_3 را در معدن نشان می‌دهد. در تقاطع W_3 برای نگهداری از قاب‌های کشویی (آرک) V_{29} (شکل ۳) و قاب IPB_{260} (شکل ۴) استفاده شده است. فاصله‌ی قاب‌های کشویی از یکدیگر ۵۰ الی ۱۰۰ سانتی‌متر است. همانطور که در شکل ۵، مشاهده می‌شود از نگهداری شماره ۵۵ تا ۱۰۶ توسط آرک‌های کشویی و از ۱۰۷ تا ۱۴۳ به وسیله قاب IPB نگهداری شده است. خواص و ویژگی‌های توده سنگ بر اساس برداشت‌های میدانی، آزمایش‌های برجا و معادلات تجربی برای انواع سنگ‌های منطقه برآورد و در جدول ۱، ارایه شده است.



شکل ۱- محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲- موقعیت تقاطع W_3 را در معدن



شکل ۳- آرک کشویی V_{29} و بیج‌سنگ‌ها در مقطع نعل‌اسبی

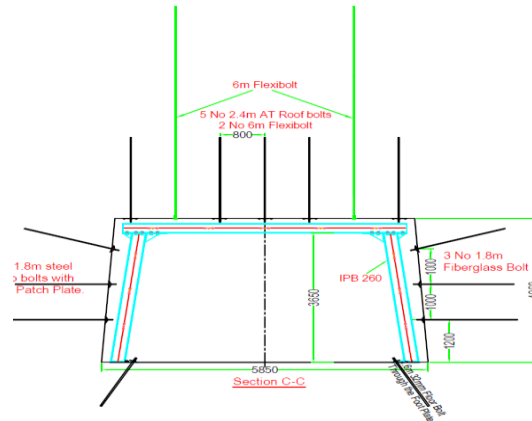
سامانه نگهداری تقاطع W_3 پرداخته می‌شود. بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده، رده توده سنگ بر اساس روش‌های طبقه‌بندی ژئومکانیکی $MRMR$ و Q تعیین می‌شود. سپس با استفاده از امتیازهای تعیین شده روش‌های $MRMR$ و Q ، سامانه نگهداری مناسب برای تقاطع W_3 طراحی می‌شود. در ادامه سامانه‌های نگهداری طراحی شده، با استفاده از نرم‌افزار $FLAC3D$ ، مدل‌سازی و تحلیل می‌شود. بیشینه جابجایی در اطراف منطقه مورد نظر پس از نصب سامانه‌های نگهداری پیشنهادی از روش‌های مختلف طبقه‌بندی تجربی، مقایسه می‌شود. در نهایت روش تجربی مناسب برای طراحی سامانه نگهداری ایمن در تقاطع‌های تونل‌های معدنی، انتخاب خواهد شد. به منظور اعتبارسنجی مدل‌های عددی تهیه شده، وضعیت فعلی تقاطع به همراه سامانه نگهداری نصب شده در محل، مدل‌سازی شده و مقادیر جابجایی حاصل شده با مقادیر جابجایی برداشت‌شده از ابزار دقیق نصب شده در محل، مقایسه خواهد شد.

۲- مورد مطالعاتی

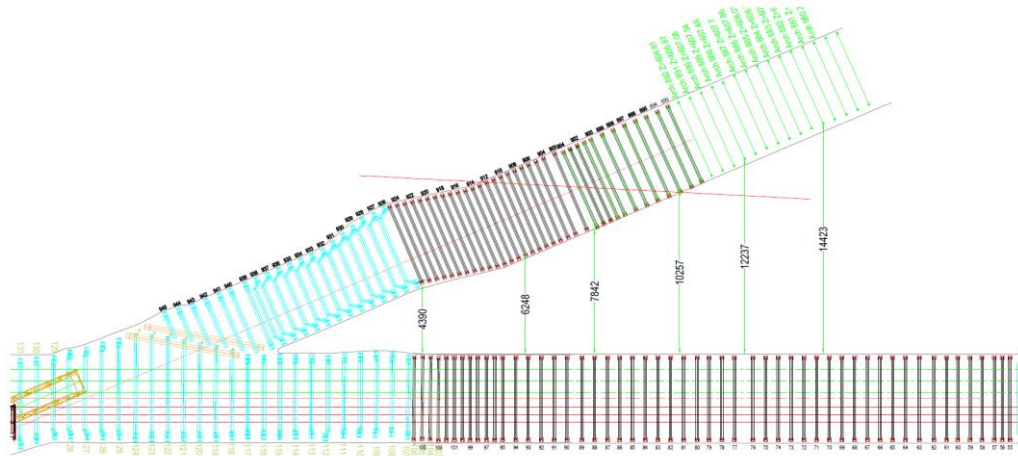
ناحیه پروده با وسعتی حدود ۱۲۰۰ کیلومترمربع در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان طبس قرار گرفته است (شکل ۱). معدن شماره یک پروده طبس به عنوان نخستین معدن مکانیزه زغال‌سنگ ایران شناخته شده است. از این معدن سالیانه بالغ بر ۱/۵ میلیون تن زغال‌سنگ استخراج می‌شود. این معدن با روش اتاق پایه و جبهه‌کار طولانی به روش مکانیزه در حال استخراج است. در طراحی این معدن لایه مدنظر برای استخراج، لایه C_1 است. ضخامت لایه زغال-سنگ C_1 در این ناحیه ۱/۸ متر الی ۲ متر است. برای دسترسی به این لایه از سه بازکننده مایل استفاده شده است. تونل شیب‌دار چهارم برخلاف سایر تونل‌ها به سطح زمین متصل نمی‌شود و از فاصله ۱۱۰ متری دهانه تونل ۳ منشعب شده است. فاصله تونل‌های اصلی از همدیگر حدوداً ۴۰ متر است که تونل‌های شماره ۱ و ۴ هوای آلوده را از داخل معدن خارج می‌کند و تونل‌های ۲ و ۳ هوای تمیز را به معدن وارد می‌کند. شیب لایه C_1 در محدوده بین ۵ الی ۲۶ درجه است. طول کارگاه استخراج در پهنه‌ها حدوداً ۲۲۰ متر و طول پهنه‌های استخراجی تقریباً ۱۲۰۰ متر است. شکل ۲، جانمایی پهنه‌ها، تونل‌های بازکننده و موقعیت

۳- طراحی سامانه نگهداری برای تقاطع W3 به روش‌های تجربی

روش‌های طراحی تجربی همانطور که از نام آن پیداست بر اساس تجربیات عملی بر روی پروژه‌های مختلف، ایجاد شده است. روش‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ را می‌توان اساس کار تحلیل و طراحی سامانه‌های نگهداری تجربی دانست. در این پژوهش از بین انواع روش‌های طبقه‌بندی، به دو مورد $MRMR$ و Q پرداخته می‌شود. برای این منظور ابتدا داده‌های لازم از طریق عملیات صحرایی و برداشت‌های زمین‌شناسی منطقه جمع‌آوری شده، سپس با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی تجربی ($MRMR$ و Q)، سامانه نگهداری برای تقاطع W3 طراحی شده است.



شکل ۴- قاب IPB260 و پیچ‌سنگ‌ها در مقطع دوزنقه‌ای



شکل ۵- آرک کشویی و قاب دوزنقه‌ای در تقاطع W3

جدول ۱- ویژگی‌های ماده‌سنگ (Tabas Mine Technical Office, 2019)

نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	چگالی (MN/M ³)	نوع سنگ
۰/۲۶	۲۸۳۸	۱/۳	۲۴/۱۲	۲/۵	۳۷/۳۸	۰/۰۲۷	سیلتستون
۰/۲۵	۲۹۸۷	۰/۴۴۳	۳۱/۷۵	۲/۶	۷۳	۰/۰۲۵	سیلتستون ماسه‌ای
۰/۲۵	۳۱۶	۰/۰۱۶	۲۵-۱۵	۰/۰۰۲	۶	۰/۰۱۶	زغال‌سنگ
۰/۲۵	۵۲۸۱	۸/۶۹	۲۱/۷۵	۶/۳	۷۲/۷۹	۰/۰۲۷	ماسه سنگ
۰/۲۵	۴۸۲۶	۶/۹۵	۲۳/۹۲	۵/۸	۶۳/۵	۰/۰۲۷	ماسه سنگ سیلتی

$$RMR = R_s + R_{RQD} + R_{sd} + R_{cd} + R_w + R_{od} \quad (1)$$

در این رابطه:

R_s امتیاز مقاومت تک محوره برای سنگ سالم
 R_{RQD} امتیاز شاخص RQD

۳-۱- برآورد مقدار MRMR برای توده سنگ اطراف تقاطع

رابطه ۱ برای رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (RMR) مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۳-۲- برآورد مقدار Q برای توده سنگ اطراف

تقاطع

روش Q توسط بارتون و همکاران (۱۹۷۴) با مطالعه موردی ۲۱۲ تونل در اسکاندیناوی برای تعیین کیفیت توده سنگی که تونل در آن حفر می‌شود، به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$Q = (RQD/J_n)(J_r/J_a)(J_w/SRF) \quad (3)$$

در این رابطه:

RQD	شاخص کیفی توده سنگ
J _n	تعداد دسته درزه
J _a	عدد دگرسانی درزه‌های با جهت بحرانی
J _r	عدد زبری درزه‌های با جهت بحرانی
J _w	ضریب آب درزه
SRF	ضریب کاهش تنش

مقدار محاسبه شده Q در منطقه‌ی مورد مطالعاتی به صورت جدول ۳، است.

در این پژوهش، بر اساس میانگین‌گیری از مقادیر به دست آمده، مقدار Q برای توده سنگ برابر ۰/۲۸ در نظر گرفته شده است. در روش Q برای طراحی سامانه نگهداری تقاطع تونل‌ها، باید مقدار J_n، ۳ برابر در نظر گرفته شود. بنابراین مقدار Q در تقاطع نسبت به تونل‌های عادی به یک سوم کاهش می‌یابد. بر این اساس، مقدار نهایی Q برای تقاطع W3 برابر ۰/۰۹ به دست می‌آید.

R_{sd} امتیاز مربوط به فواصل درزه‌ها
 R_{cd} امتیاز مربوط به وضعیت درزه‌ها
 R_w امتیاز مربوط به شرایط آب زیرزمینی
 R_{od} امتیاز مربوط به راستای نسبی درزه‌ها
 مقدار محاسبه شده RMR در منطقه‌ی مورد مطالعاتی به صورت جدول ۴، است.

در این پژوهش، امتیاز RMR₈₉ برابر ۳۹ (میانگین مقادیر) در نظر گرفته شده است.

برای بکارگیری روش RMR در کارهای معدنی، باید تعدیل‌هایی را اعمال نمود. امتیاز تعدیل شده RMR موسوم به RMR معدنی (MRMR) با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$MRMR = RMR \times A_w \times A_s \times A_o \times A_b \quad (2)$$

در این رابطه:

A_w ضریب تعدیل مربوط به هوازگی
 A_s ضریب تعدیل مربوط به تنش‌های القایی معدنکاری
 A_o ضریب تعدیل مربوط به جهت‌داری درزه
 A_b ضریب تعدیل مربوط به اثر آتشیاری
 برای منطقه مورد مطالعه، ضرایب تعدیل مربوط به آتشیاری، جهت‌داری درزه، تنش‌های القایی معدنکاری و هوازگی به ترتیب برابر ۱، ۰/۸، ۱، ۰/۹ در نظر گرفته شده است. بر این اساس، مقدار MRMR برای تقاطع W3 برابر ۲۸/۸ به دست می‌آید. این مقدار، رده‌ی سنگ را در گروه سنگ‌های ضعیف (رده IV) قرار می‌دهد.

جدول ۲- امتیاز RMR برای سنگ‌های اطراف تقاطع W3

پارامتر	زغال سنگ		ماسه سنگ		سیلتستون	
	مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز
مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	۶	۲	۷۲	۷	۳۷	۴
RQD (%)	۱۹	۳	۲۱	۳	۲۱	۳
فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (m)	۰/۵	۱۰	۰/۷۵	۱۵	۰/۵	۱۰
وضعیت ناپیوستگی‌ها	سطوح اندکی زبر، بازشدگی کمتر از ۱ mm، دیواره‌ها به شدت هوازده	۲۰	سطوح اندکی زبر، بازشدگی کمتر از ۱ mm، دیواره‌ها به شدت هوازده	۲۰	سطوح اندکی زبر، بازشدگی کمتر از ۱ mm، دیواره‌ها به شدت هوازده	۲۰
آب زیرزمینی	کمی نمودار	۱۰	کمی نمودار	۱۰	کمی نمودار	۱۰
تعدیل جهات ناپیوستگی	نامطلوب	-۱۰	نامطلوب	-۱۰	نامطلوب	-۱۰
امتیاز RMR ₈₉	۳۵		۴۵		۳۷	

جدول ۳- امتیاز Q برای سنگ‌های اطراف تقاطع W_3

سیلتستون		ماسه سنگ		زغال سنگ		پارامتر
مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز	
خیلی ضعیف	۲۱	خیلی ضعیف	۲۱	خیلی ضعیف	۱۹	RQD (%)
دو دسته درزه و درزه‌های اضافی	۶	دو دسته درزه و درزه‌های اضافی	۶	دو دسته درزه و درزه‌های اضافی	۶	دسته درزه (J_n)
زبر یا نامنظم، دارای تموج	۳	زبر یا نامنظم، دارای تموج	۳	زبر یا نامنظم، دارای تموج	۳	عدد زبری درزه (J_r)
اندودهای کانی‌های رسی و مقادیر کم رس‌های آماسی	۴	رس ماسه‌ای با نسبت کمی رس	۳	اندودهای کانی‌های رسی و مقادیر کم رس‌های آماسی	۴	عدد دگرسانی درزه (J_a)
حفاری در محیط خشک یا با جریان اندک	۱	حفاری در محیط خشک یا با جریان اندک	۱	حفاری در محیط خشک یا با جریان اندک	۱	ضریب آب درزه (J_w)
مناطق ضعیف حاوی رس و سنگ‌های اطراف بسیار سست	۱۰	مناطق ضعیف حاوی رس و سنگ‌های اطراف بسیار سست	۱۰	مناطق ضعیف حاوی رس و سنگ‌های اطراف بسیار سست	۱۰	ضریب کاهش تنش (SRF)
۰/۲۶۲		۰/۳۵		۰/۲۳۷		امتیاز Q

جدول ۴- سامانه‌های نگهداری پیشنهادی روش‌های تجربی و نگهداری نصب شده در تقاطع W_3

تقویت کننده	نگهداری اصلی			سامانه نگهداری
	میل مهار	شاتکریت	قاب‌های فولادی	
ندارد	ندارد	به صورت سیستماتیکی به طول ۴ تا ۵ متر و به فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره‌ها با مش	به ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر در تاج تونل و ۱۰۰ میلی‌متر در دیوارها	پیشنهادی روش $MRMR$
ندارد	ندارد	میل‌مهار به طول ۲ متر در فواصل ۱ متری	شاتکریت تقویت شده یا توری فلزی با ضخامت ۷/۵ تا ۱۵ سانتی‌متر	پیشنهادی روش Q
مش سیمی	ورق‌های گالوانیزه	هر یک متر ۷ عدد میل‌مهار به قطر ۲۰ میلی‌متر و به طول ۲/۴ متر به فاصله‌داری حدوداً ۱۴۰ سانتی‌متر	ندارد	فعلی نصب شده در تقاطع W_3

۳-۳- طراحی سامانه نگهداری بر اساس روش‌های $MRMR$ و Q

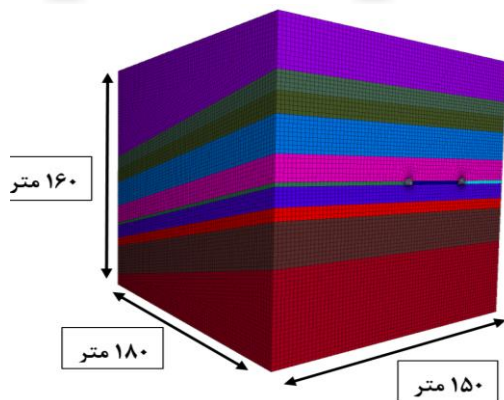
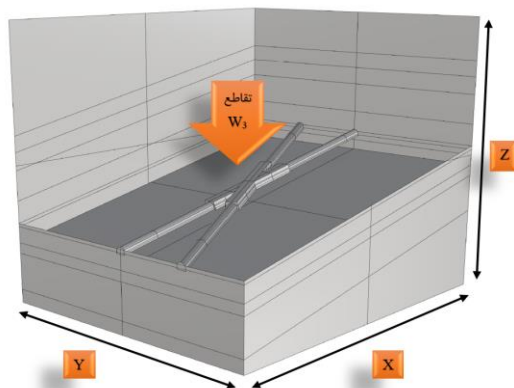
با استفاده از نمودارها و جداول موجود در روش‌های RMR و Q ، سامانه‌های نگهداری طراحی شده در جدول ۴، ارائه شده است. همچنین در این جدول، به طور مقایسه‌ای سامانه نگهداری که در حال حاضر در معدن نصب می‌باشد نیز بیان

شده است. لازم به ذکر است که در تقاطع W_3 برای تقویت بیشتر از مش‌های سیمی و نیز ورق‌های گالوانیزه بین فضای قاب-های فولادی استفاده شده است. با توجه به سامانه نگهداری ترکیبی نصب شده در تقاطع و مقایسه‌ی آن با سامانه‌های نگهداری پیشنهادی می‌توان به این نتیجه رسید که سامانه نگهداری نصب شده در تقاطع با هیچ‌یک از سامانه‌های

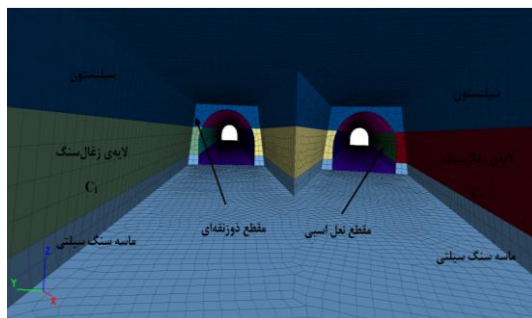
کشویی از نوع V29 بوده و مقادیر آن در جدول ۵ قابل مشاهده است. در شکل ۹، قاب‌های کشویی مدل‌سازی شده، نشان داده شده است.

۴-۱-۲- مدل‌سازی قاب‌های IPB

قاب‌ها با فواصل یک متر از همدیگر مدل شده است. قاب مورد استفاده در تقاطع از نوع IPB 260 بال پهن است. در جدول ۶، مشخصات فنی قاب‌های IPB ارائه شده است. در شکل ۱۰، نیز قاب‌های مدل شده، نمایش داده شده است.



شکل ۶- هندسه و ابعاد مدل تهیه شده



شکل ۷- هندسه تقاطع W3

نگهداری تجربی Q و MRMR تطابق کامل ندارد. البته می‌توان گفت که نگهداری فعلی تقاطع W3 به نگهداری پیشنهادی روش MRMR، نزدیک‌تر است.

۴- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش، برای تخمین کارایی سامانه‌های نگهداری پیشنهادی روش‌های تجربی، از مدل‌سازی عددی با کاربرد نرم افزار FLAC3D استفاده شده است.

در شکل ۶، هندسه ساخته شده و ابعاد مدل، نمایش داده شده است. ضخامت و جنس لایه‌های ساخته شده را می‌توان در این شکل مشاهده کرد. تونل‌های متقاطع و لایه-ها با شیب ۱۲ درجه در جهت x، مدل شده است. تقاطع W3 در لایه زغال‌سنگ C1 قرار گرفته است. لایه زغال‌سنگ C1 در عمق ۳۶۰ متری از سطح زمین قرار دارد. برای کمتر شدن حجم محاسبات، ۲۴۷ متر از روباره بصورت بار گسترده به مدل اعمال گردیده است. در محل تقاطع، مقطع تونل‌ها دوزنقه‌ای و در سایر نقاط، مقطع تونل‌ها نعل اسبی است. شکل ۷، نشان دهنده تونل‌های مدل شده در دو مقطع نعل اسبی و دوزنقه‌ای است.

از مدل رفتاری موهر کلمب برای لایه‌های سنگی استفاده شده است. شرایط مرزی و اولیه در مدل اعمال شد. مرزهای سطوح قائم در جهت x و y و کف مدل در هر سه جهت ثابت شده است. با توجه به عمق و جنس سنگ‌های اطراف تونل‌ها، نسبت تنش افقی به قائم (k) برابر ۱ در نظر گرفته شده است. پس از اعمال شرایط مرزی و تنش روباره، مدل برای رسیدن به تعادل، اجرا شده است (شکل ۸).

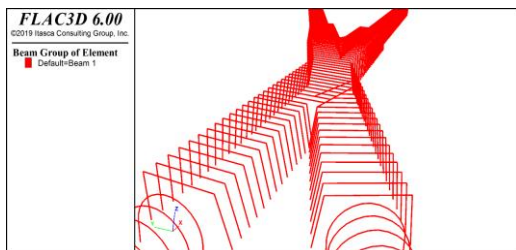
۴-۱-۱- مدل‌سازی سامانه نگهداری فعلی و اعتبارسنجی مدل

در این مرحله، پس از حفر تونل‌ها سامانه نگهداری که در حال حاضر در تونل نصب است، مدل‌سازی می‌شود. حفاری تونل‌ها به صورت مرحله‌ای انجام شده و بلافاصله پس از یک متر حفاری، نگهداری‌ها نصب می‌شود.

۴-۱-۱-۱- مدل‌سازی قاب‌های کشویی V29

قاب‌های کشویی (آرک فولادی)، با فواصل یک متر از یکدیگر مدل شده است. برای مدل‌سازی قاب‌های کشویی از المان بییم استفاده شده است. مشخصات فنی قاب‌های

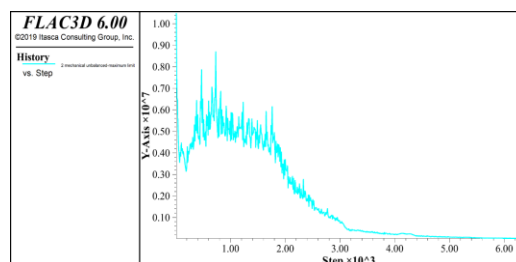
۱۲، نمایی از حلقه میل‌مه‌ار نصب شده بر آرک‌های فولادی را ارایه می‌کند.



شکل ۱۰- نمایی از قاب‌های IPB مدل‌سازی شده در تقاطع W3

جدول ۷- مشخصات فنی میل‌مه‌ارهای مدل‌سازی شده

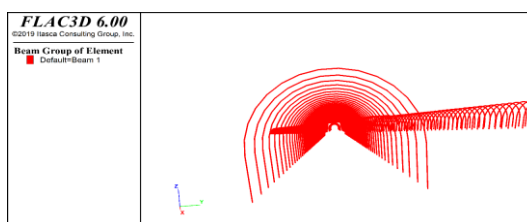
مقدار	پارامتر
۷۸۰۰	وزن حجمی (N/m^3)
۲۰۰	مدول یانگ میل‌مه‌ار (GPa)
۵۶۵	مقاومت فشاری دوغاب (MPa)
۴۰	زاویه اصطکاک دوغاب (درجه)
۸/۱۵	سختی دوغاب (GPa)
۰/۰۹۴۲	محیط آشکار دوغاب
۰/۰۰۰۳۱۴	مساحت سطح مقطع (M^2)
۲۴۶	مقاومت (نیرو) فشاری تسلیم (MPa)
۲۴۶	مقاومت (نیرو) کششی تسلیم (MPa)



شکل ۸- نمودار نیروهای نامتعادل

جدول ۵- مشخصات فنی قاب‌های کشویی مدل‌سازی شده

مقدار	مشخصات
۲۰۰	مدول یانگ (GPa)
۰/۳	ضریب پواسون
۳۷×10^{-۴}	سطح مقطع (L^2)
۶۱۶×10^{-۸}	ممان دوم نسبت به محور افقی (L^4)
۶۱۶×10^{-۸}	ممان دوم نسبت به محور قائم (L^4)
۷۷۵×10^{-۸}	ممان اینرسی قطبی (L^4)



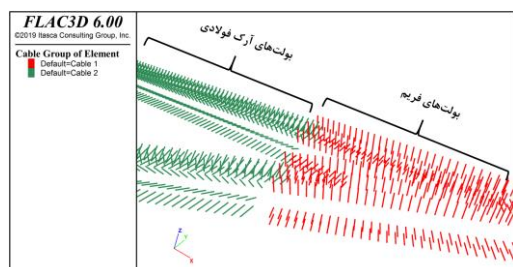
شکل ۹- نمایی از قاب‌های کشویی مدل‌سازی شده در تقاطع W3

جدول ۶- مشخصات فنی قاب‌های IPB مدل‌سازی شده

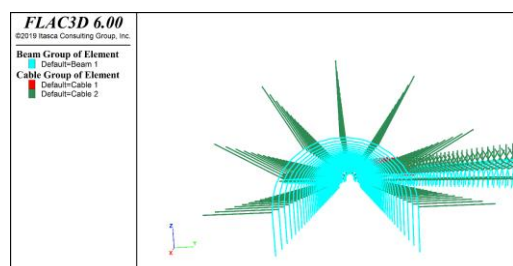
مقدار	مشخصات
۲۰۰	مدول یانگ (GPa)
۰/۳	ضریب پواسون
$۱/۱۸ \times 10^{-۲}$	سطح مقطع (L^2)
۵۱۳۰×10^{-۸}	ممان دوم نسبت به محور افقی (L^4)
۵۱۳۰×10^{-۸}	ممان دوم نسبت به محور قائم (L^4)
۱۴۹۲۰×10^{-۸}	ممان اینرسی قطبی (L^4)

۴-۱-۳- مدل‌سازی میل‌مه‌ارها

برای مدل‌سازی میل‌مه‌ارها از المان کابل استفاده شده است. در هر یک متر ۷ بولت به صورت حلقه‌ای مدل شده است. طول بولت‌ها ۲/۴ متر است و به فواصل ۱/۴ متری از یکدیگر قرار دارند. جدول ۷، مشخصات فنی به کار رفته در مدل‌سازی میل‌مه‌ارها را ارایه می‌دهد. شکل ۱۱، میل‌مه‌ارهای مدل شده در تقاطع را نمایش می‌دهد. شکل

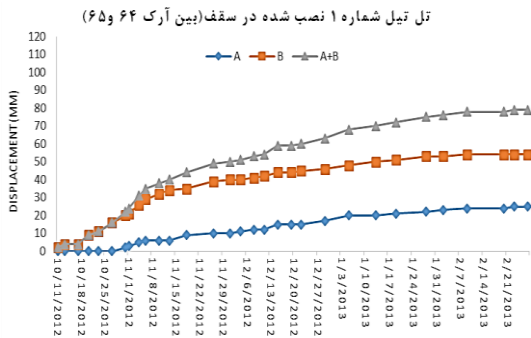


شکل ۱۱- نمایی میل‌مه‌ارهای مدل‌سازی شده در تقاطع W3

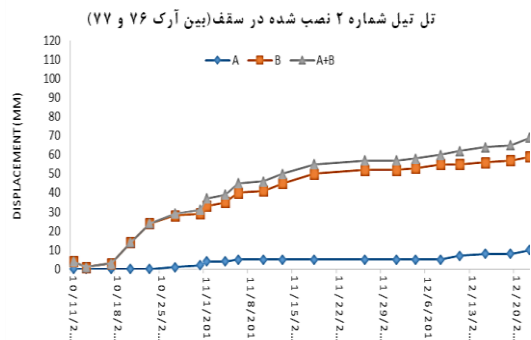


شکل ۱۲- نمایی از حلقه‌های میل‌مه‌ارها بر روی آرک‌ها

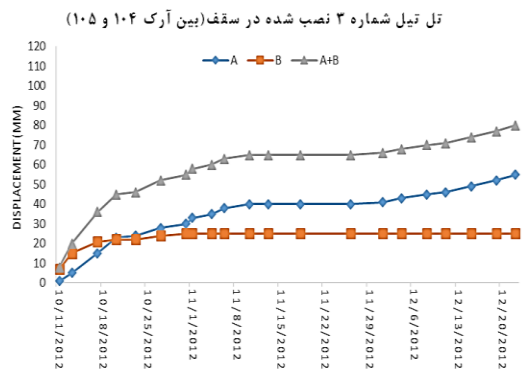
مقایسه سامانه‌های نگهداری پیشنهادی Q و MRMR برای تقاطع تونل‌های ... پویا قهرمانی سقایی و ص ۱۳۵-۱۵۰



شکل ۱۴- نمودار جابجایی نقاط جابجایی سنج شماره ۱



شکل ۱۵- نمودار جابجایی نقاط جابجایی سنج شماره ۲



شکل ۱۶- نمودار جابجایی نقاط جابجایی سنج شماره ۳

۴-۲- مدل‌سازی سامانه نگهداری پیشنهادی در

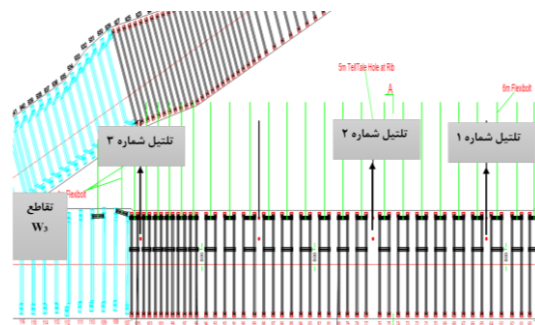
روش MRMR

سامانه نگهداری پیشنهادی روش MRMR مدل‌سازی شده است. شکل ۱۸، میزان جابجایی در کل مدل بعد از نصب سامانه نگهداری را نمایش می‌دهد. میزان جابجایی‌ها در موقعیت جابجایی سنج شماره ۱، ۲، ۳ و در مرکز تقاطع W3 برداشت شد.

۴-۱-۴- اعتبارسنجی مدل

در محدوده تقاطع W3، همان‌طور که در شکل ۱۳، مشاهده می‌شود، تعداد ۳ جابجایی سنج (تل‌تیل) نصب شده است. جابجایی سنج شماره ۱ (در فاصله ۵۰ متری از تقاطع) بین آرک شماره ۶۴ و ۶۵، جابجایی سنج شماره ۲ (در فاصله ۳۸ متری از تقاطع) بین آرک ۷۶ و ۷۷ و جابجایی سنج شماره ۳ (در فاصله ۱۲ متری از تقاطع) بین آرک شماره ۱۰۴ و ۱۰۵ نصب شده‌اند. جابجایی‌های خوانش شده در جابجایی‌سنج‌ها در جدول ۸، ارائه شده است. در این جدول، شاخص A جابجایی در فاصله ۲/۴ متری و شاخص B جابجایی در فاصله ۵ متری از تونل را نشان می‌دهد. در شکل ۱۴ تا شکل ۱۶، به ترتیب نمودار جابجایی جابجایی‌سنج‌های شماره ۱ تا ۳ ارائه شده است.

مدل تهیه شده از سامانه‌های نگهداری فعلی تقاطع W3، اجرا و جابجایی‌های قایم در راستای محور Z سقف تونل به دست آمد. مقایسه بین داده‌های ابزار دقیق و داده‌های مدل، در شکل ۱۷، ارائه شده است. با توجه به شکل، می‌توان نتیجه گرفت که داده‌هایی که از مدل‌سازی به دست آمده با داده‌های برداشتی از جابجایی‌سنج‌های معدن تطابق قابل قبولی دارد.



شکل ۱۳- محل نصب جابجایی‌سنج‌ها در اطراف تقاطع W3

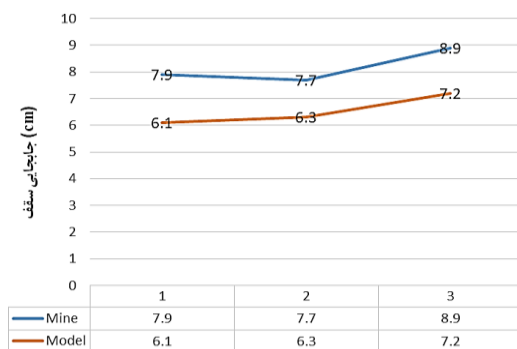
جدول ۸- جابجایی‌های خوانده شده در جابجایی‌سنج‌ها

جابجایی سنج	شماره ۱	شماره ۲	شماره ۳
موقعیت	بین آرک‌های ۶۵ و ۶۴	بین آرک‌های ۷۶ و ۷۷	بین آرک‌های ۱۰۴ و ۱۰۵
شاخص	A A+B B A	A A+B B A	A A+B B A
جابجایی (mm)	۲۵ ۵۴ ۷۹	۶۶ ۷۷ ۶۳	۲۶ ۸۹ ۲۶

۵- مقایسه سامانه‌های نگهداری

نتایج مدل‌سازی‌های عددی انجام شده در خصوص جابجایی‌های اتفاق افتاده پس از نصب سامانه نگهداری پیشنهادی روش‌های تجربی مختلف در تقاطع $W3$ ، در جدول ۹، ارایه شده است.

در شکل ۲۰، نیز میزان جابجایی در مرکز تقاطع به ازای روش‌های مختلف، نمایش داده شده است. با توجه به این نتایج می‌توان بیان کرد که میزان جابجایی در سامانه نگهداری پیشنهادی Q نسبت به دیگر موارد کمتر است. به عبارت دیگر، استفاده از نگهدارنده‌های پیشنهادی روش Q برای پایدارسازی محل تقاطع تونل‌ها مناسب‌تر است. همانطور که قبلاً بیان شد، نگهداری فعلی تقاطع $W3$ به نگهداری پیشنهادی روش $MRMR$ ، نزدیک‌تر است. میزان جابجایی‌های به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی نیز این گفته را تایید می‌کند.

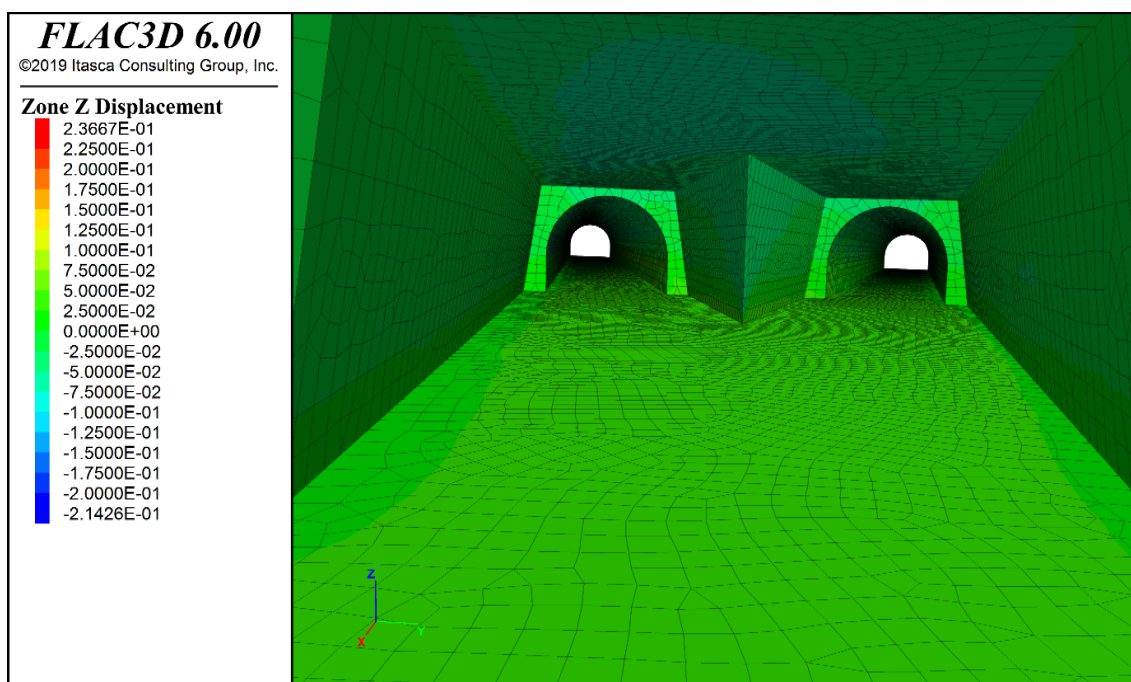


شکل ۱۷- اعتبار سنجی مدل شبیه‌سازی شده

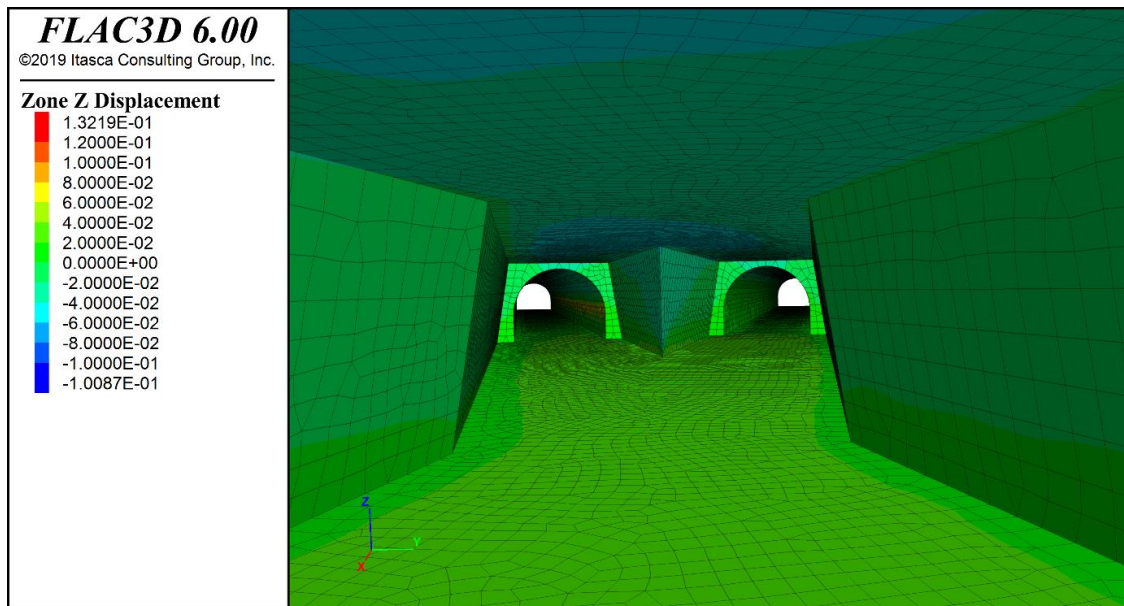
۴-۳- مدل‌سازی سامانه نگهداری پیشنهادی

روش Q

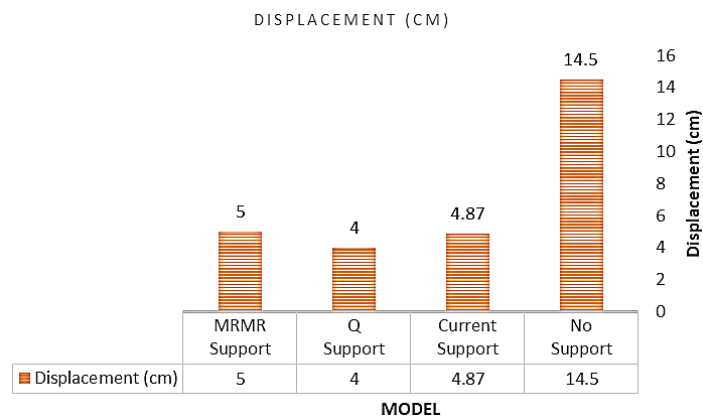
سامانه نگهداری پیشنهادی روش Q مدل شده است. شکل ۱۹، میزان جابجایی در کل مدل بعد از نصب سامانه نگهداری را نمایش می‌دهد. جابجایی‌ها در موقعیت جابجایی‌سنج شماره ۱، ۲، ۳ و در مرکز تقاطع نیز برداشت شد.



شکل ۱۸- جابجایی کل مدل پس از نصب سامانه نگهداری پیشنهادی $MRMR$



شکل ۱۹- جابجایی کل مدل پس از نصب سامانه نگهداری پیشنهادی Q



شکل ۲۰- نمودار جابجایی‌ها در مرکز تقاطع W3 پس از نصب سامانه نگهداری پیشنهادی روش‌های تجربی

جدول ۹- مقایسه جابجایی‌ها پس از نصب سامانه نگهداری پیشنهادی روش‌های تجربی برای تقاطع W3

میزان جابجایی قائم در مرکز تقاطع (cm)	میزان جابجایی قائم در جابجایی سنج‌ها (cm)			بیشینه جابجایی قائم در کل مدل (cm)	وضعیت سامانه نگهداری
	جابجایی سنج شماره ۳	جابجایی سنج شماره ۲	جابجایی سنج شماره ۱		
۱۴/۵	۲۹	۲۱	۱۹	۲۳۳	بدون نگهداری
۴/۸۷	۷/۲	۶/۳	۶/۱	۱۰/۱۷	با نگهداری فعلی
-	۸/۹	۷/۷	۷/۹	-	با نگهداری فعلی (داده‌های ابزار دقیق)
۴	۴/۵۳	۳/۴۷	۳/۲	۱۳	با نگهداری پیشنهادی Q
۵	۶/۷۲	۵/۲۳	۴/۸۵	۲۳	با نگهداری پیشنهادی MRMR

۶- نتیجه‌گیری

محل تقاطع، مقطع تونل‌ها دوزنقه‌ای و در سایر نقاط، مقطع تونل‌ها نعل اسبی است. از مدل رفتاری موهر کلمب برای لایه‌های سنگی استفاده شده است. شرایط مرزی و تنش روباره به مدل اعمال شد. پس از حفر تونل‌ها، سامانه نگهداری پیشنهادی روش‌های تجربی مختلف، مدل‌سازی شد. حفاری تونل‌ها به صورت مرحله‌ای انجام شده و بلافاصله پس از یک متر حفاری، نگهداری‌ها نصب شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل، سامانه‌های نگهداری فعلی تقاطع W_3 ، شبیه‌سازی و جایجایی‌های قائم به دست آمد. نتایج به دست آمده از مدل عددی و داده‌های ابزار دقیق مقایسه شد. مشاهده شد که داده‌های به دست آمده از مدل‌سازی با داده‌های برداشتی از جایجایی‌سنگ‌های معدن، تطابق قابل قبولی دارد. نتایج مدل‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که در حالت بدون نگهداری، تقاطع به طور کامل تخریب می‌شود. در صورت نصب نگهداری پیشنهادی روش Q ، $MRMR$ و نصب سامانه فعلی، میزان جایجایی قائم در مرکز تقاطع به ترتیب برابر ۴، ۵ و ۴/۸۷ سانتی‌متر رخ می‌دهد. میزان جایجایی روش Q نسبت به سایر موارد کمتر است. همچنین جایجایی‌های رخ داده در روش $MRMR$ و سامانه فعلی، تقریباً مشابه هم هستند که این موضوع به دلیل تشابه نگهداری فعلی تقاطع با نگهداری پیشنهادی روش $MRMR$ است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت سامانه نگهداری پیشنهادی روش Q نسبت به روش $MRMR$ ، محافظه‌کارانه‌تر است و منجر به رخداد جایجایی‌های کمتر در تقاطع می‌شود.

هدف اصلی این مقاله برآورد میزان کارایی روش‌های تجربی طبقه‌بندی ژئومکانیکی RMR و Q در طراحی سامانه‌های نگهداری تقاطع تونل‌های معادن زغال‌سنگ و انتخاب مناسب‌ترین روش برای چنین تقاطع‌هایی است. برای نیل به این هدف، تقاطع W_3 واقع در معدن شماره یک پرورده طیس به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است. اطلاعات لازم از طریق برداشت‌های میدانی و آزمایش‌های آزمایشگاهی، جمع‌آوری شد. رده‌بندی توده سنگ اطراف منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش‌های تجربی طبقه‌بندی ژئومکانیکی $MRMR$ و Q انجام و امتیاز توده سنگ تعیین شد. بر این اساس، برای توده سنگ اطراف تقاطع W_3 ، امتیاز RMR_{89} برابر ۳۹، امتیاز $MRMR$ برابر ۲۸/۸ و مقدار Q برابر ۰/۰۶ به دست آمد. با توجه به امتیازهای به دست آمده و بر اساس نمودارها و جداول موجود، سامانه‌های نگهداری مناسب برای تقاطع W_3 طراحی شد. با توجه به سامانه نگهداری ترکیبی نصب شده در تقاطع و مقایسه‌ی آن با سامانه‌های نگهداری پیشنهادی، می‌توان به این نتیجه رسید که سامانه نگهداری نصب شده در تقاطع با هیچ‌یک از سامانه‌های نگهداری تجربی Q و $MRMR$ تطابق کامل ندارد. البته می‌توان گفت که نگهداری فعلی تقاطع به نگهداری پیشنهادی روش $MRMR$ نزدیک‌تر است. برای تخمین کارایی سامانه‌های نگهداری پیشنهادی روش‌های تجربی، از مدل‌سازی عددی با کاربرد نرم افزار $FLAC3D$ استفاده شده است. پس از ساخت هندسه و ابعاد مدل، تونل‌های متقاطع و لایه‌ها با شیب ۱۲ درجه مدل شد.

۷- مراجع

- Abbasi, F., Khosravi, M., Jafari, A., Bashari, A., & Alipenhani, B. (2021). Support Analysis of Main Tunnels in Tabas Mechanized Parvadeh Mine at Intersection with Coal Seam. *Journal of Mining and Environment*, 12 (3), 711-724. <https://doi.org/10.22044/jme.2021.10610.2014>.
- Abdellah, W., Raju, G., Mitri, H., & Thibodeau, D. (2014). Stability of underground mine development intersections during the life of a mine plan. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 72, 173-181.
- Bai, Q. S., & Tu, S.H. (2016). Failure analysis of a large span longwall drift under water-rich roofs and its control techniques. *Engineering Failure Analysis*, 67, 15-32.
- Kang, Y., Liu, Q., Xi, H., & Gong, G. (2018). Improved compound support system for coal mine tunnels

- in densely faulted zones: A case study of China's Huainan coal field. *Engineering Geology*, 240, 10-20.
- Kanik, M., Gurocak, Z., & Alemdag, S. (2015). A comparison of support systems obtained from the RMR89 and RMR14 by numerical analyses: Macka Tunnel project, NE Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 109, 224–238.
- Kulatilake, P., Qiong, W., Zhengxing, Y., & Fuxing, J. (2013). Investigation of stability of a tunnel in a deep coal mine in China. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23 (4), 579-589.
- Li, Q., Li, J., Zhang, J., Wang, C., Fang, K., Liu, L., & Wang, W. (2019). Numerical simulation analysis of new steel sets used for roadway support in coal mines. *Metals*, 9 (5), 606. <https://doi.org/10.3390/met9050606>.
- Mesutoglu, M., & Ozkan, I. (2024). Evaluation and Comparison of Rock Bolting Versus Steel Arch Support Systems in Thick Coal Seam Underground Galleries: A Case Study. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 41, 1719–1737. <https://doi.org/10.1007/s42461-024-00994-4>.
- Paul, A., Singh, A., Loui, P., Ajoy, P., Singh K., & Khandelwal, M. (2011). Validation of RMR-based support design using roof bolts by numerical modeling for underground coal mine of Monnet Ispat, Raigarh, India—a case study, *Arabian Journal of Geosciences*, 5, 1435–1448. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0313-8>.
- Tang, B., Cheng, S., Yeboah, M., Cheng, H., Tang, Y., & Wang, C. (2023). Strength of fabricated enclosed roadway support structure for TBM-excavated coal mine roadways: Experimental and numerical study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 131, 104779. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104779>.
- Tang, B., Yeboah, M., Cheng, H., Tang, Y., Yao, Z., Wang, C., Rong, C., Wang, Z., & Liu, Q. (2021). Numerical study and field performance of rockbolt support schemes in TBM-excavated coal mine roadways: A case study, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 115, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104053>.
- Tabas Mine Technical Office, Rock Mechanics Department, (2019), Rock Mechanics Reports, Tabas Parvadeh Coal Company.

Comparison of proposed Q and MRMR support systems for mining tunnel intersections using numerical modeling (A case study: W3 intersection of Parvadeh Mine No. 1)

P. Ghahremani Saghay¹; M. Noroozi^{2*}

1- MSc Graduated in Mining Exploitation, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, p.ghahremani.tabriz@gmail.com

2- Assistant Professor; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, mehdi.noroozi@shahroodut.ac.ir, mnoroozi.mine@gmail.com

Received: 10 Jul 2024; Accepted: 11 Feb 2025
DOI: 10.22044/tuse.2025.14764.1489

Keywords

Support system design
MRMR method
Q method
Numerical modeling
W3 intersection of Parvadeh Mine

Extended Abstract

Summary

The main goal of this research is to compare the proposed support systems of the MRMR and Q empirical methods for coal mine tunnel intersections and to estimate the efficiency of these geo-mechanical classification methods in providing the stability of the intersections. For this purpose, the MRMR and

Q geo-mechanical classification methods have been used to design the support system, and numerical modeling was used to analyze and compare these systems. The results show that the support system proposed by the Q method is more conservative than the MRMR method and its application leads to fewer displacements at the intersections.

Introduction

One of the most sensitive regions in underground spaces is the tunnel intersection, which is comparatively less stable. It is necessary to choose the appropriate method for designing the support system of the intersections depending on the conditions of the region. Based on the literature review, no study has been conducted so far on comparing the support systems proposed by the RMR and Q methods for the intersection of coal mine tunnels and estimating the efficiency of these geo-mechanical classification methods. The main objective of this paper is to choose the most appropriate empirical method for designing the support system of the intersection of coal mine tunnels.

Methodology and Approaches

Focusing on the W3 intersection of the Parvadeh Mine No. 1 in Tabas area as a case study, the necessary information has been collected through field surveys and laboratory tests. Based on the collected information and using the MRMR and Q geo-mechanical classification methods, the rock mass has been classified. Then, according to the obtained scores, suitable support systems have been designed for the W3 intersection. Subsequently, the designed support systems were modeled using the finite element method with the help of FLAC3D software. In order to validate the prepared numerical models, the current state of the intersection with the existing support system was modeled. The obtained displacement values were compared with the displacement values taken from the displacement gauge installed on site. The results show that the data obtained from the modeling are in acceptable agreement with the data taken from the mine displacement gauge. Finally, the prepared models based on the proposed support systems of each of the empirical design methods (Q and MRMR) were analyzed.

Results and Conclusions

Based on the results of numerical modeling, an appropriate empirical method has been selected for designing a safe support system at coal mine tunnel intersections. The results show that the proposed support system of the Q method is

more conservative than the MRMR method and its application at intersections leads to fewer displacements.
