نشریه مکانیک سنگ
Journal of Rock Mechanics
دوره دهم، شماره۲، تابستان۱۴۰۵، صفحه۸۱تا۱۰۲
https://doi.org/10.22034/IRSRM.2026.604095.1098



ارزیابی اثر موقعیت لایه زغال‌سنگ بر همگرایی تونل‌های اصلی معدن زغال‌سنگ طبس با استفاده از تحلیل برگشتی فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D)

ندا ولی خانی[۱]، ابراهیم فرخ[۱*]
۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران، ایران.

دریافت : ۱۴۰۵/۰۵/۱۷؛ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱
(* نویسنده مسئول: e.farrokh@aut.ac.ir)

چکیده

بررسی و مدیریت همگرایی تونل‌های معدنی، به دلیل نقش اساسی آن در تأمین ایمنی، حفظ پایداری و بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های نگهداری، از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است. این موضوع در معادن زغال‌سنگ، که با چالش‌های ناشی از توده‌سنگ ناهمگن و شرایط زمین‌شناسی پیچیده مواجه‌اند، اهمیت بیشتری دارد. یکی از چالش‌های اصلی در تونل‌های اصلی معدن زغال‌سنگ پروده طبس، وقوع همگرایی قابل‌توجه و تغییر شکل شدید در برخی مقاطع است که می‌تواند موجب کاهش پایداری تونل و آسیب به سیستم نگهداری شود. در این پژوهش، همگرایی تونل‌های اصلی در محدوده آرک‌های ۲۸۵۰ تا ۳۰۵۰ اسلوپ ۳ معدن زغال‌سنگ پروده طبس با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی در نرم‌افزار *FLAC3D* بررسی شد. با بهره‌گیری از روش تحلیل برگشتی، فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D) کالیبره شد تا میزان همگرایی پیش‌بینی‌شده توسط مدل عددی با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در معدن تطابق یابد. بدین منظور، پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ متناظر با مقادیر مختلف D با استفاده از نرم‌افزار *RocLab* تعیین و در مدل عددی به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که در میان حالت‌های بررسی‌شده، مقدار D=۰/۲ بهترین تطابق را با داده‌های اندازه‌گیری‌شده ایجاد کرد. در این حالت، همگرایی دیواربه‌دیوار در آرک ۲۸۶۹ برابر ۸۳۱ میلی‌متر، در مقایسه با مقدار اندازه‌گیری‌شده ۹۹۶ میلی‌متر، و در آرک ۲۸۷۹ برابر با ۷۵۴ میلی‌متر، در مقایسه با مقدار اندازه‌گیری‌شده ۸۳۵ میلی‌متر به دست آمد که به ترتیب نشان‌دهنده تطابق حدود ۸۳ و ۹۰ درصدی با داده‌های اندازه‌گیری‌شده معدن است. همچنین، بررسی مقاطع مختلف نشان داد که تغییرات همگرایی دیواربه‌دیوار و گسترش زون پلاستیک با تفاوت در شرایط زمین‌شناسی مقاطع، از جمله موقعیت لایه زغال‌سنگ و میزان حضور آن در سطح مقطع تونل، همراه است. در مقاطع بررسی‌شده، حضور لایه‌های زغال‌سنگ با مقاومت کمتر در نواحی دیواره و کف تونل با افزایش جابه‌جایی‌ها و همگرایی بیشتر همراه بود؛ در مقابل، با کاهش سهم زغال‌سنگ در سطح مقطع، میزان همگرایی و گسترش زون پلاستیک نیز کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که کالیبراسیون فاکتور D بر اساس داده‌های واقعی همگرایی و درنظرگرفتن شرایط زمین‌شناسی مقاطع، از جمله ترکیب لایه‌ها و میزان حضور زغال‌سنگ، می‌تواند در بهبود پیش‌بینی رفتار تغییر شکلی تونل‌های زغال‌سنگ و تحلیل آن‌ها برای طراحی سیستم‌های نگهداری مفید باشد.

واژگان کلیدی **همگرایی تونل، معدن زغال‌سنگ طبس، تحلیل برگشتی، مدل‌سازی عددی، فاکتور برهم‌ریختگی (D)، نرم‌افزار *FLAC3D***

۱- مقدمه

ناپایداری تونل‌ها و راهروهای معادن زیرزمینی زغال‌سنگ یکی از مهم‌ترین چالش‌های ژئومکانیکی در عملیات استخراج به شمار می‌رود. با افزایش عمق استخراج و حضور لایه‌های زغال‌سنگ و سنگ‌های دربرگیرنده با مقاومت پایین، رفتار مکانیکی توده‌سنگ پیچیده‌تر شده و تحت‌تأثیر تنش‌های برجا و تنش‌های ناشی از استخراج، احتمال بروز تغییر شکل‌های بزرگ، گسترش ناحیه پلاستیک، ریزش سقف و دیواره‌ها و در نهایت کاهش پایداری حفریات افزایش می‌یابد [۱, ۲].

یکی از چالش‌های جدی در معدن زغال‌سنگ پروده طبس، به‌ویژه در محدوده آرک‌های ۲۸۵۰ تا ۳۰۵۰ اسلوپ ۳، وقوع همگرایی قابل‌توجه و روند افزایشی تغییر شکل در تونل‌های اصلی است. در اثر همگرایی و آماس کف، جابه‌جایی‌های توده‌سنگ پیرامون تونل بخش قابل‌توجهی از مقطع تونل را دربرگرفته و سیستم‌های نگهداری، به‌ویژه قاب‌های کشویی، تحت‌تأثیر تغییر شکل‌های شدید قرار گرفته‌اند. همچنین، آماس قابل‌توجه کف تونل، مشکلات اجرایی در فرایند حمل‌ونقل مواد را به دنبال داشته است. در این محدوده، تونل در لایه زغال‌سنگ حفاری شده و تفاوت قابل‌توجه در ویژگی‌های مقاومتی بین لایه زغال‌سنگ و لایه‌های سیلت‌استون اطراف، موجب بروز رفتار مچاله شوندگی و حرکت توده‌سنگ به سمت فضای تونل شده است. این شرایط، با افزایش تغییر شکل و آسیب به سیستم نگهداری، مشکلات اجرایی و هزینه‌های اضافی را به معدن تحمیل کرده است.

در شرایط سنگ نرم و تنش‌های بالای برجا، رفتار توده‌سنگ اطراف راهروهای زیرزمینی می‌تواند با تغییر شکل‌های گسترده و مستمر همراه باشد. در معادن عمیق، افزایش تنش‌های برجا و وجود سنگ‌های با مقاومت کم موجب می‌شود توده‌سنگ پیرامون تونل پس از حفاری دچار تغییر شکل قابل‌توجه شده و ناحیه آسیب‌دیده و پلاستیک در اطراف تونل توسعه یابد. این تغییر شکل‌ها می‌توانند تحت‌تأثیر عواملی همچون وضعیت تنش، ویژگی‌های مکانیکی و ساختار زمین‌شناسی توده‌سنگ، شرایط هیدرولوژیکی، ابعاد تونل و نحوه حفاری و نگهداری قرار گیرند. در این میان، وجود لایه‌های زغال‌سنگ به‌عنوان لایه‌هایی با مقاومت پایین‌تر و تغییرشکل‌پذیری بیشتر، می‌تواند تمرکز تنش را تشدید کرده و نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان همگرایی و الگوی تغییر شکل تونل ایفا کند [۳-۵]. همگرایی حفریات زیرزمینی یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی رفتار تغییر شکلی و وضعیت پایداری تونل در حین و پس از عملیات حفاری محسوب می‌شود. میزان همگرایی و نرخ تغییرات آن، بازتابی از پاسخ توده‌سنگ پیرامون تونل به آزادشدگی و بازتوزیع تنش‌های ناشی از حفاری بوده و می‌تواند برای ارزیابی روند تغییر شکل و تشخیص شرایط پایدار یا ناپایدار مورداستفاده قرار گیرد. ازاین‌رو، پایش و تحلیل همگرایی، علاوه بر فراهم‌کردن امکان ارزیابی رفتار واقعی تونل، می‌تواند مبنایی برای تشخیص روند ناپایداری و ارزیابی عملکرد سیستم نگهداری در شرایط مختلف زمین باشد [۳, ۵]. باتوجه‌به تأثیر هم‌زمان این عوامل، مدل‌سازی عددی به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل پاسخ مکانیکی توده‌سنگ پیرامون تونل و ارزیابی شرایط پایداری آن مورداستفاده قرار گرفته است. روش‌های عددی مختلف از جمله روش اجزای محدود، روش تفاضل محدود و روش‌های المان مرزی برای بررسی توزیع تنش، جابه‌جایی و نواحی شکست و پلاستیک پیرامون تونل‌های زیرزمینی به کار گرفته شده‌اند. این روش‌ها امکان بررسی رفتار توده‌سنگ تحت شرایط مختلف زمین‌شناسی و تنش و همچنین ارزیابی تأثیر سیستم‌های نگهداری بر پاسخ تونل را فراهم می‌کنند [۳, ۴].

مطالعات مختلفی به بررسی تغییر شکل و ناپایداری راهروهای زیرزمینی در معادن زغال‌سنگ، به‌ویژه در شرایط سنگ نرم و تنش‌های بالا پرداخته‌اند. منگ و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی عددی و مشاهدات میدانی در معدن زغال‌سنگ نانیائوتو، عوامل مؤثر بر تغییر شکل شدید راهرو را بررسی کردند و وجود گسل مجاور، تنش‌های برجای زیاد، بارگذاری و باربرداری ناشی از استخراج و عدم نگهداری کف تونل را از عوامل مؤثر بر همگرایی زیاد گزارش نمودند [۶]. چیان و همکاران نیز

با بررسی عددی و میدانی راهروی عمیق معدن زغال‌سنگ ونجیاپو، تغییر شکل شدید و خزش طولانی‌مدت تونل را بررسی کرده و نشان دادند که نیروی پیش‌تنیدگی کم و طول ناکافی انکرها در گسترش ناحیه شکست و ناپایداری مؤثر بوده است [۷]. ژانگ و همکاران در معدن زغال‌سنگ یواندین، عمق زیاد، مقاومت پایین سنگ و سیستم نگهداری غیرفعال را عوامل اصلی همگرایی زیاد معرفی نمودند [۸]. یانگ و همکاران نیز در بررسی تونل سنگ نرم عمیق معدن زغال‌سنگ چائوهوا، تغییر شکل بزرگ را موردمطالعه قرار داده و تنش انحرافی ناشی از حفاری و ظرفیت باربری ضعیف نگهداری اولیه را علت تغییر شکل بزرگ تونل گزارش کردند [۹].

ازسوی‌دیگر، تحلیل برگشتی مبتنی بر داده‌های تغییر شکل و همگرایی به‌عنوان یکی از رویکردهای مؤثر در روش مشاهده‌گرانه، ابزاری ارزشمند برای برآورد پارامترهای توده‌سنگ و پیش‌بینی رفتار مکانیکی حفریات زیرزمینی محسوب می‌شود [۱۰]. این روش با بهره‌گیری از داده‌های پایش صحرایی نظیر همگرایی، جابه‌جایی سطحی و کرنش، امکان تخمین پارامترهای ژئومکانیکی نظیر مدول تغییر شکل، چسبندگی و زاویه اصطکاک را فراهم می‌کند و می‌تواند اختلاف میان رفتار پیش‌بینی‌شده مدل و رفتار واقعی توده‌سنگ را کاهش دهد [۱۰, ۱۱]. یزدانی و همکاران با استفاده از تحلیل برگشتی مستقیم در تونل نیروگاه سیاه‌بیشه، پارامترهای توده‌سنگ را بررسی کرده و نشان دادند که مدول یانگ حاصل از تحلیل برگشتی می‌تواند نماینده مناسب‌تری از رفتار واقعی توده‌سنگ باشد [۱۰]. لی و همکاران با ترکیب تحلیل برگشتی و شبکه عصبی، تغییر شکل تونل‌های *NATM* را مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. آن و همکاران با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی در *FLAC3D*، به تخمین پارامترهای توده‌سنگ پرداخته و کاهش خطای تخمین پارامترها را گزارش کردند [۱۲]. همچنین شریف‌زاده و همکاران و فخیمی و همکاران از تحلیل برگشتی برای تخمین پارامترهای مقاومتی و تنش‌های برجا در پروژه‌های زیرزمینی استفاده کردند [۱۳, ۱۴]. در میان مطالعات انجام شده در معادن زغال‌سنگ، ماوکوفسکی و همکاران با استفاده از داده‌های همگرایی اندازه‌گیری‌شده در راهروهای اصلی یک معدن زغال‌سنگ در لهستان، تغییرات پارامترهای معیار هوک-براون (m_b و s)، را با توجه به فاصله از جبهه کار استخراج از طریق تحلیل برگشتی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با کاهش فاصله از جبهه کار، مقادیر این پارامترها به‌صورت نمایی کاهش‌یافته و میزان همگرایی در نزدیکی جبهه کار افزایش می‌یابد [۱۵]. اهمیت فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D) در پاسخ تغییر شکلی مدل‌های عددی نیز در برخی مطالعات موردتوجه قرار گرفته است. شیه و همکاران با استفاده از داده‌های ارتعاشات ناشی از حفاری، روشی برای تعیین فاکتور برهم‌ریختگی در ناحیه آسیب‌دیده ناشی از حفاری ارائه کردند و تأثیر تغییرات D بر همگرایی و نشست تونل را بررسی نمودند [۱۶]. تیان و همکاران با استفاده از تحلیل حساسیت و مدل رگرسیون غیرخطی، به بررسی پارامترهای معیار هوک-براون در یک راهروی عمیق معدن زغال‌سنگ پرداختند. آنها نشان دادند که تخمین پارامترهای *GSI* و D معمولاً ماهیتی ذهنی داشته و بر اساس قضاوت‌های تجربی انجام می‌شود. نتایج تحلیل حساسیت پارامترها نشان داد که پس از شاخص *GSI*، فاکتور D بیشترین تأثیر را بر جابه‌جایی تونل دارد، درحالی‌که تأثیر سایر پارامترها نظیر m_i و σ_{ci} ناچیز است [۱۷].

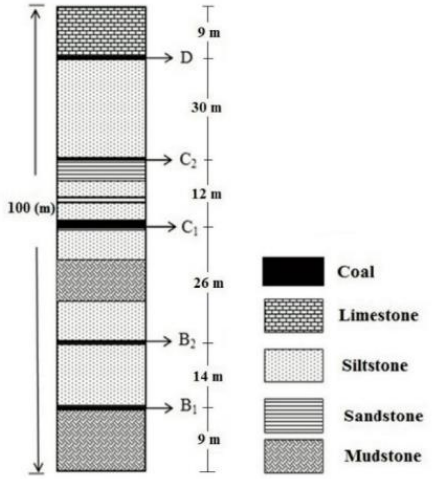
در مطالعات انجام شده در معدن زغال‌سنگ پرده طبس نیز رفتار تغییر شکلی تونل‌ها و نقش لایه زغال‌سنگ موردتوجه قرار گرفته است. عباسی و همکاران با استفاده از مدل‌سازی عددی *FLAC2D* و *FLAC3D*، اثر موقعیت لایه زغال‌سنگ بر جابه‌جایی تونل‌های اصلی معدن پرده طبس را بررسی کردند و نشان دادند که قرارگیری لایه زغال‌سنگ در نیمه بالایی تونل و نزدیک به سقف، نسبت به سایر حالت‌های بررسی شده، با جابه‌جایی کمتر دیواره‌ها همراه است [۱۸]. همچنین شکرچی‌زاده و همکاران با استفاده از مدل‌سازی عددی، همگرایی تونل شماره ۲ معدن زغال‌سنگ طبس را در تراز ۲۴۴۰-۲۴۱۰ بررسی کردند و میزان بالای جابه‌جایی در این محدوده را گزارش نمودند [۱۹]. در مطالعه‌ای دیگر، شکرچی‌زاده و همکاران با استفاده از

مدل‌سازی عددی *FLAC3D*، همگرایی مقطع تونل و جابه‌جایی دیواره، سقف و کف را بررسی کرده و عملکرد یک سیستم نگهداری ترکیبی شامل پیچ‌های انعطاف‌پذیر و پیچ‌های خرپایی را در کاهش همگرایی ارزیابی کردند [۳].

باوجود مطالعات انجام‌شده درباره پایداری و همگرایی تونل‌های معدن زغال‌سنگ پرورده طبس، در مطالعات پیشین، رفتار تغییر شکلی تونل‌ها عمدتاً با استفاده از پارامترهای توده‌سنگ حاصل از طبقه‌بندی‌ها و مطالعات اولیه مدل‌سازی شده است؛ درحالی‌که اختلاف میان تغییر شکل‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل عددی و مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده می‌تواند بر قابلیت پیش‌بینی مدل تأثیرگذار باشد. ازاین‌رو، استفاده از داده‌های واقعی همگرایی برای کالیبراسیون پارامترهای مؤثر بر مقاومت توده‌سنگ و بهبود انطباق مدل عددی با رفتار واقعی تونل اهمیت دارد. در این میان، فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D) به دلیل ارتباط آن با میزان آسیب و برهم‌خوردگی توده‌سنگ ناشی از حفاری و همچنین عدم قطعیت موجود در تعیین آن، می‌تواند گزینه مناسبی برای کالیبراسیون بر اساس داده‌های واقعی همگرایی باشد. بااین‌حال، تعیین مقدار مناسب D از طریق مقایسه مستقیم نتایج مدل عددی با داده‌های واقعی همگرایی در محدوده موردمطالعه معدن پرورده طبس به‌صورت کمی بررسی نشده است. براین‌اساس، هدف اصلی این پژوهش تعیین مقدار مناسب فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D) از طریق تحلیل برگشتی داده‌های واقعی همگرایی و کالیبراسیون مدل عددی تونل‌های اصلی معدن زغال‌سنگ پرورده طبس است. در ادامه، مدل کالیبره‌شده برای بررسی رفتار همگرایی مقاطع مختلف تونل با شرایط متفاوت حضور لایه زغال‌سنگ مورداستفاده قرار می‌گیرد و ارتباط میزان حضور زغال‌سنگ با همگرایی تونل ارزیابی می‌شود.

۲- معدن زغال‌سنگ پرورده طبس

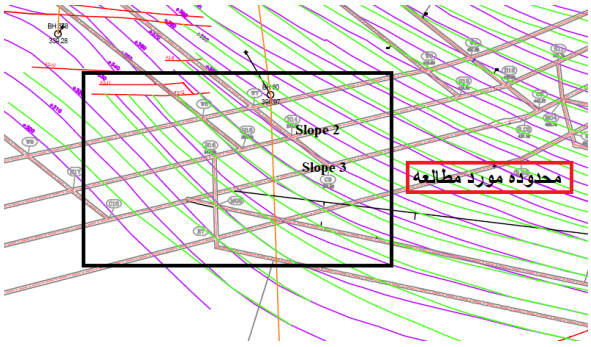
معدن زغال‌سنگ پرورده طبس که اولین معدن زیرزمینی مکانیزه ایران محسوب می‌شود، در سال ۱۳۸۶ راه‌اندازی شده است. این معدن در فاصله ۸۵ کیلومتری شهر طبس در استان خراسان جنوبی واقع شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه از سطح دریا ۷۳۲ و ۱۲۵۲ متر است. از نظر ذخایر، ٪۶۹ زغال کک‌شو، ٪ ۹۹ زغال حرارتی و ٪۷۵ از کل منابع زغال‌سنگ ایران در حوضه زغال‌سنگ طبس قرار دارند. در حوضه طبس سه ناحیه زغال‌سنگ مجزا وجود دارد که شامل ناحیه مزینو، ناحیه نایبند و ناحیه پرورده می‌شود. منطقه پرورده بزرگ‌ترین حوزه زغال کک‌شوی ایران به شمار می‌آید. ذخیره قابل‌استخراج معدن پرورده طبس در بخش مرکزی یک طاقدیس نامتقارن در منطقه‌ای با وسعت ۱۲۰۰ کیلومترمربع واقع شده است. لایه‌های سنگی منطقه به طور عمده از گل‌سنگ و توالی لایه‌های لای‌سنگ و ماسه‌سنگ تشکیل شده‌اند. لایه‌های سنگ‌آهک نیز به‌صورت مقطعی مشاهده شده‌اند. ستون چینه‌شناسی محدوده زغالی پرورده در شکل (۱) نشان داده شده است [۲۰].



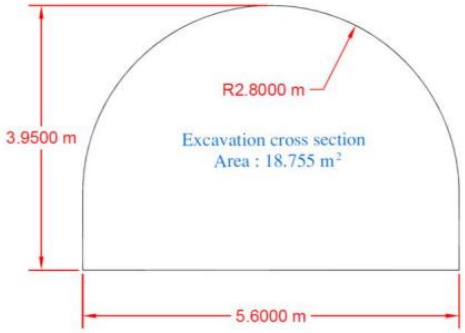
شکل ۱- ستون چینه‌شناسی محدوده زغالی پرورده [۲۰]

در مجموع در منطقه پرورده هفت لایه حاوی زغال‌سنگ شناسایی شده است، که از شرق به غرب به‌تدریج عمق، ضخامت، میزان خاکستر و درجه زغال‌شدگی آنها افزایش می‌یابد. افق اصلی که حاوی لایه‌های زغال‌سنگ با ضخامت بیش از ۸۰ سانتی‌متر می‌باشد، در یک مقطع ۵۰ متری از لایه‌های میانی با متوسط عمق ۳۰۰ متر واقع شده است. لایه C_1 از نظر ضخامت و پایداری، مهم‌ترین

لایه زغال‌سنگ منطقه به شمار می‌آید. ضخامت لایه C_1 از ۱/۸۵ تا ۲/۱۵ با میانگین ۲ متر متغیر بوده و در عمق ۳۲۲ تا ۶۲۲ متری واقع شده است. در این معدن، چهار تونل شیب‌دار اصلی به‌صورت موازی با فاصله ۵۰ متر از یکدیگر حفاری شده‌اند، که برای انتقال پرسنل به کارگاه‌های استخراج و همچنین حمل زغال‌سنگ استخراج‌شده، به کار می‌روند. محدوده موردمطالعه در این پژوهش، اسلوپ شماره ۳ بین آرک ۲۸۵۰ تا ۳۰۵۰ قرار دارد. عمق معدن در محدوده موردمطالعه ۵۶۰ تا ۵۷۰ متر، شیب تونل در این محدوده ۱۴ درجه و شیب لایه‌ها نیز بین ۱۵ تا ۱۸ درجه متغیر است [۲۰]. موقعیت محدوده موردمطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۳) نمایی شماتیک از هندسه تونل را نشان می‌دهد. تونل موردمطالعه دارای مقطع نعل‌اسبی با عرض ۵/۶ متر و ارتفاع ۳/۹۵ متر است [۲۰]. پارامترهای ژئومکانیکی هر لایه سنگی در عمق ۵۷۰ متری برای ماده‌سنگ بر اساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی انجام‌شده توسط دفتر معدن زغال‌سنگ پروده طبس در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۲- موقعیت محدوده موردمطالعه [۲۰]



شکل ۳- مقطع هندسی اسلوپ ۳ معدن [۲۰]

جدول ۱- پارامترهای مقاومتی ماده‌سنگ واحدهای سنگی مختلف در محدوده موردمطالعه [۲۰]

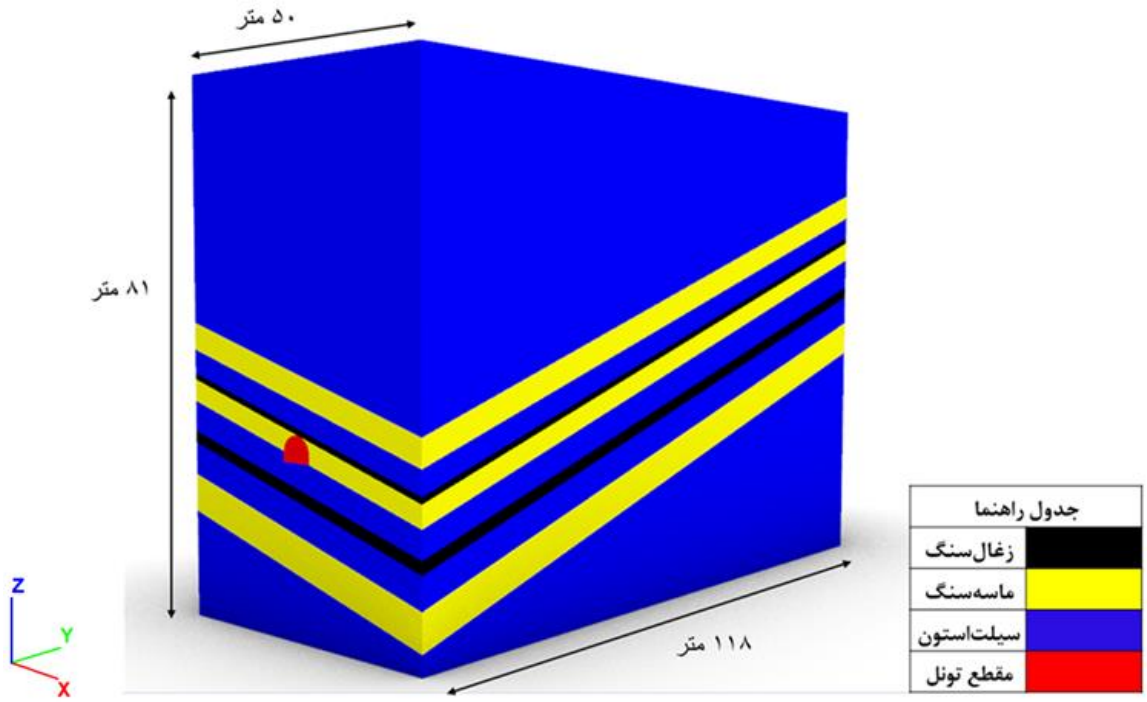
واحد سنگی	مقاومت تک‌محوری ماده‌سنگ (σ_{ci})	چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ ماده‌سنگ (MPa)	GSI	پارامتر m_i	نسبت پواسون
سیلت‌استون	۲۵	۲۷۰۰	۲۸۳۸	۲۸	۷	۰/۲۵
سیلت‌استون ماسه‌ای	۷۳	۲۵۰۰	۲۹۸۷	۲۸	۹	۰/۲۵
زغال‌سنگ	۶	۱۶۰۰	۳۱۶	۲۸	۸	۰/۲۶
ماسه‌سنگ	۷۲/۷۹	۲۷۰۰	۵۲۸۱	۲۸	۹	۰/۲۵

۳- مدل‌سازی عددی

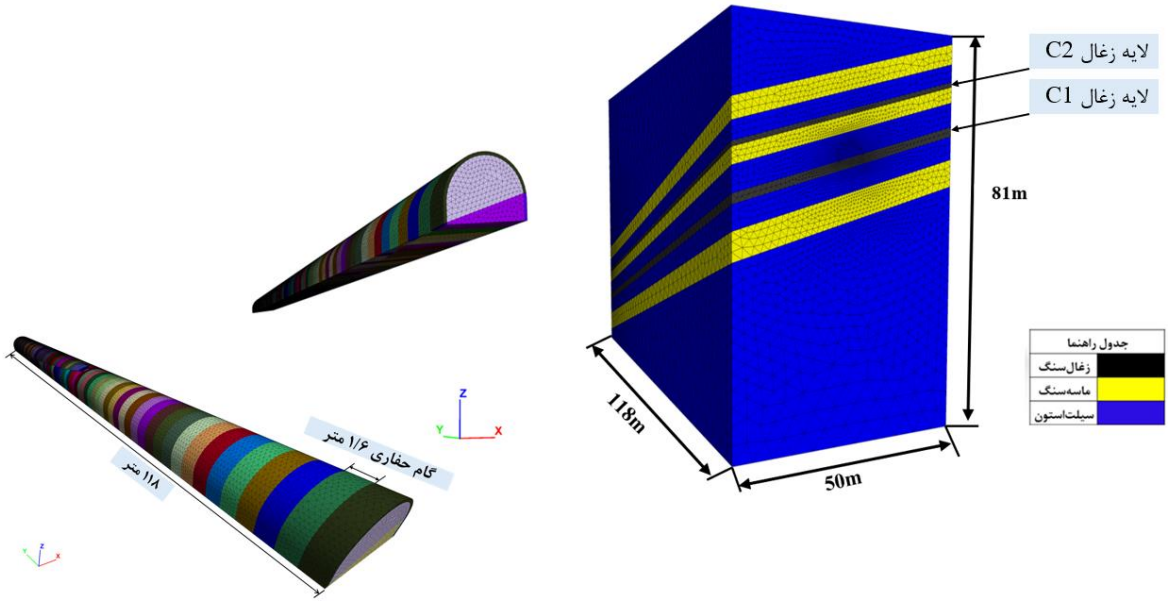
۳-۱- هندسه مدل و مش‌بندی

باتوجه‌به محدودیت اطلاعات ساختاری موجود درباره ناپیوستگی‌ها و ریزشکستگی‌های توده‌سنگ در محدوده موردمطالعه، استفاده از مدل ناپیوسته صریح و تعریف مشخصات هندسی و مکانیکی ناپیوستگی‌ها، از جمله جهت‌گیری، فاصله‌داری، پیوستگی و مقاومت برشی آن‌ها، امکان‌پذیر نبود. ازاین‌رو، باتوجه‌به رویکرد به‌کاررفته در برخی مطالعات پیشین مرتبط با حفریات زیرزمینی معادن زغال‌سنگ [۳, ۲۱-۲۴]، توده‌سنگ به‌صورت یک محیط پیوسته معادل در نظر گرفته شد و مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار $FLAC3D$ انجام گرفت. در

این رویکرد، رفتار مکانیکی توده‌سنگ در قالب پارامترهای معادل محیط پیوسته توصیف می‌شود و اثر ناپیوستگی‌ها به‌صورت صریح در مدل بازنمایی نمی‌شود. نرم‌افزار *FLAC3D* که بر پایه روش عددی تفاضل محدود عمل می‌کند، توانایی بالایی در مدل‌سازی سه‌بعدی هندسه‌های نامنظم و شرایط مرزی پیچیده دارد و اندرکنش بین سازه و محیط سنگی را بادقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی می‌نماید. همچنین در این نرم‌افزار امکان مدل‌سازی مرحله‌به‌مرحله گام‌های حفاری، نصب سیستم‌های نگهداری و تحلیل هم‌زمان توزیع تنش و تغییر شکل وجود دارد. به‌این‌ترتیب، برای ساخت هندسه مدل از نرم‌افزار *Rhinoceros7* استفاده شد. باتوجه‌به تأثیر ابعاد مدل بر دقت نتایج تحلیل عددی، ابعاد مدل به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که از تأثیر مرزهای مدل بر ناحیه موردمطالعه جلوگیری شود. بنابراین، همان‌طور که در شکل (۴) نشان‌داده‌شده است، در راستای محور Y (هم‌راستا با محور پیشروی تونل)، طول مدل برابر با ۱۱۸ متر، در راستای محور X (عمود بر محور پیشروی تونل)، عرض مدل برابر با ۵۰ متر و در راستای محور Z، ارتفاع مدل برابر ۸۱ متر در نظر گرفته شده است. هندسه ساخته‌شده، پس از مش‌بندی به محیط نرم‌افزار *FLAC3D* انتقال‌داده‌شده است. حداقل و حداکثر طول المان‌ها به ترتیب ۰/۳ متر و ۶ متر در نظر گرفته شدند. شبکه تولیدشده شامل ۱۸۶۵۵۹ المان مثلثی و ۸۵۰۶۱ گره بود. همچنین، به‌منظور افزایش دقت محاسبات در محدوده تونل، اندازه المان‌ها در اطراف تونل کوچک‌تر انتخاب شد و با افزایش فاصله از تونل، اندازه آن‌ها افزایش یافت.



شکل ۴- هندسه لایه‌بندی زمین‌شناسی و مقطع تونل در اسلوپ ۳



شکل ۵- مقطع تونل و لایه‌بندی زمین‌شناسی در مدل‌سازی *FLAC3D*

۳-۲- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ

به‌منظور بررسی میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر همگرایی تونل، تحلیل حساسیت تحلیلی با استفاده از روش‌های کارانزاتورس و فرهاست و دانکان-فاما انجام شد. در این تحلیل، اثر پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر، پارامتر m_i، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) و فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D)، با درنظرگرفتن شرایط هندسی و زمین‌شناسی تونل، بر همگرایی محاسبه‌شده بررسی شد. نتایج نشان داد که در میان پارامترهای بررسی‌شده، فاکتور D بیشترین تأثیر را بر همگرایی محاسبه‌شده داشته است. این نتیجه در چارچوب فرضیات مدل تحلیلی و پارامترهای بررسی شده به دست آمد. فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D) در معیار هوک-براون، میزان آسیب و برهم‌خوردگی توده‌سنگ ناشی از حفاری و شرایط اجرایی را منعکس می‌کند و بر پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ تأثیر می‌گذارد. براین‌اساس و باتوجه‌به هدف پژوهش، یعنی کالیبراسیون مدل عددی بر مبنای داده‌های واقعی همگرایی معدن، فاکتور D به‌عنوان پارامتر اصلی تحلیل برگشتی انتخاب شد. بدین‌منظور، مقادیر مختلف D بررسی شدند و پارامترهای مقاومتی متناظر با هر مقدار، با استفاده از نرم‌افزار *RocLab* و بر اساس معیار هوک-براون محاسبه و در مدل عددی اعمال شد تا تأثیر تغییر این پارامتر بر پاسخ مدل عددی و میزان همگرایی آن بررسی شود. برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ، ابتدا مقادیر پارامترهای مقاومتی ماده‌سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، پارامتر m_i، شاخص کیفیت توده سنگ (GSI) و چگالی مطابق جدول (۲) به‌ازای مقادیر مختلف فاکتور برهم‌ریختگی در نرم‌افزار *RocLab* وارد شدند. در مرحله نخست، مقدار D=۰/۳ برای هر سه‌لایه زغال‌سنگ، سیلت‌استون و ماسه‌سنگ در نظر گرفته شد. در مرحله بعد، مقدار D=۰/۱ برای هر سه‌لایه در نظر گرفته شد. در ادامه، به‌منظور بررسی حالت ترکیبی، مقدار D=۰ برای لایه زغال‌سنگ و D=۰/۲۲ برای لایه‌های سیلت‌استون و ماسه‌سنگ اعمال شد. در مرحله نهایی، مقدار D=۰/۲ برای هر سه لایه در نظر گرفته شد. بدین‌ترتیب، پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ برای حالت‌های مختلف D محاسبه شدند که نتایج آنها در جدول‌های (۳) تا (۶) ارائه شده است. لازم به ذکر است، مقدار فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D) در محدوده هر یک از لایه‌های سنگی به‌صورت یکنواخت در نظر گرفته شد. بنابراین، تغییرات مکانی شدت

برهم‌ریختگی ناشی از حفاری، از جمله تفاوت آن در نزدیکی تونل و نواحی دورتر از آن، به‌صورت مستقل در مدل شبیه‌سازی نشد. در ادامه، از مدل رفتاری موهر-کلمب برای مدل‌سازی رفتار توده‌سنگ دربرگیرنده تونل استفاده شد.

جدول ۲- پارامترهای مقاومتی ماده‌سنگ مورد استفاده در نرم‌افزار *RocLab*

واحد سنگی	مقاومت فشاری تک‌محوری (*MPa*)	چگالی (Kg/m^3)	پارامتر m_i	*GSI*
سیلت‌استون	۲۵	۲۷۰۰	۷	
زغال‌سنگ	۶	۱۶۰۰	۸	۲۸
ماسه‌سنگ	۷۲/۷۹	۲۷۰۰	۹	

جدول ۳- پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ با فرض D= ۰/۳ برای هر سه لایه

واحد سنگی	مدول تغییرشکل‌پذیری (*MPa*)	چسبندگی (*MPa*)	زاویه اصطکاک	مقاومت کششی
سیلت‌استون	۱۱۹۷/۸۱	۰/۶۷۵	۱۷/۱۴	۱۰۰۰۰
زغال‌سنگ	۵۶۸/۸۱	۰/۳۹۲	۱۱/۰۴	۲۰۰۰
ماسه‌سنگ	۲۰۴۳/۸۸	۱/۱۳۸	۲۵/۶۸	۲۳۰۰۰

جدول ۴- پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ با فرض D= ۰/۱ برای هر سه لایه

واحد سنگی	مدول تغییرشکل‌پذیری (*MPa*)	چسبندگی (*MPa*)	زاویه اصطکاک	مقاومت کششی
سیلت‌استون	۱۳۳۸/۷۳	۰/۷۷۳	۱۹/۲۴	۱۴۰۰۰
زغال‌سنگ	۶۵۵/۸۴	۰/۴۵۳	۱۲/۵۹	۳۰۰۰
ماسه‌سنگ	۲۲۸۴/۳۳	۱/۲۹۰	۲۸/۲۶	۳۱۰۰۰

جدول ۵- پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ با فرض D= ۰ برای لایه زغال‌سنگ و D= ۰/۲۲ برای لایه سیلت‌استون و ماسه‌سنگ

واحد سنگی	مدول تغییرشکل‌پذیری (*MPa*)	چسبندگی (*MPa*)	زاویه اصطکاک	مقاومت کششی
سیلت‌استون	۱۲۵۴/۱۸	۰/۷۱۵	۱۸/۰۲	۱۱۰۰۰
زغال‌سنگ	۶۹۰/۳۶	۰/۴۸۱	۱۳/۲۹	۳۰۰۰
ماسه‌سنگ	۲۱۴۰/۰۶	۱/۲۰۱	۲۶/۷۷	۲۶۰۰۰

جدول ۶- پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ با فرض $D=$ ۰/۲ برای هر سه لایه

واحد سنگی	مدول تغییرشکل‌پذیری (MPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک	مقاومت کششی
سیلت‌استون	۱۲۶۸/۲۷	۰/۷۲۵	۱۸/۲۳	۱۲۰۰۰
زغال‌سنگ	۶۲۱/۳۲	۰/۴۲۳	۱۱/۸۴	۲۰۰۰
ماسه‌سنگ	۲۱۶۴/۱۱	۱/۲۱۶	۲۷/۰۳	۲۷۰۰۰

۳-۳- شرایط مرزی و تنش‌های اولیه

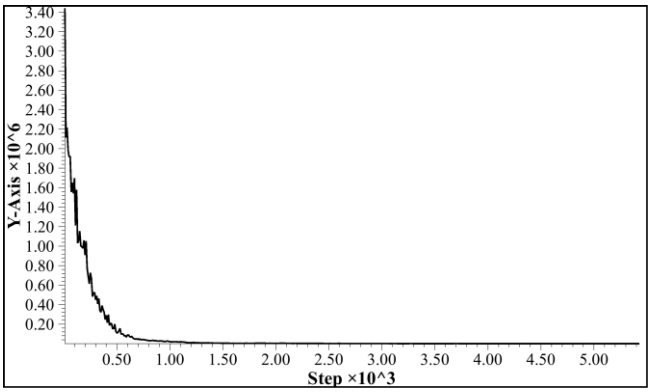
در مرحله بعد، برای اعمال شرایط مرزی مرزهای جانبی مدل نسبت جابه‌جایی‌های افقی، و کف مدل نسبت به جابه‌جایی‌های افقی و قائم ثلبت شده است. در این پژوهش، فرض بر این است که تنش قائم در محدوده موردمطالعه بر اساس وزن روباره و با استفاده از ارتفاع و چگالی لایه‌های بالایی تعیین می‌شود. همچنین، تنش‌های افقی برجا بر مبنای تنش قائم و مطابق فرضیات در نظر گرفته‌شده در مدل تعیین شدند. ازآنجاکه تغییرات عمق روباره در محدوده مدل‌سازی محدود بود، تنش‌های اعمال‌شده در مدل طی فرایند کالیبراسیون ثابت نگه داشته شدند. مقدار تنش‌های افقی نیز با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شوند:

$$\sigma_{yy} \, , \, \sigma_{xx} = k \, \sigma_{zz} \qquad (۱)$$

روابط متعددی برای برآورد ضریب تنش افقی ارائه شده‌اند. در میان این روابط، رابطه (۲) باتوجه‌به لحاظ‌کردن اثر موقعیت جغرافیایی، برای محدوده موردمطالعه مناسب تشخیص داده شد. با استفاده از این رابطه و با درنظرگرفتن عمق روباره حدود ۵۷۰ متر، ضریب تنش افقی در محدوده موردمطالعه برابر با ۱/۱۵ برآورد شد. رابطه مورداستفاده به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۰]:

$$k = \frac{9.5}{\sqrt[3]{z}} \qquad (۲)$$

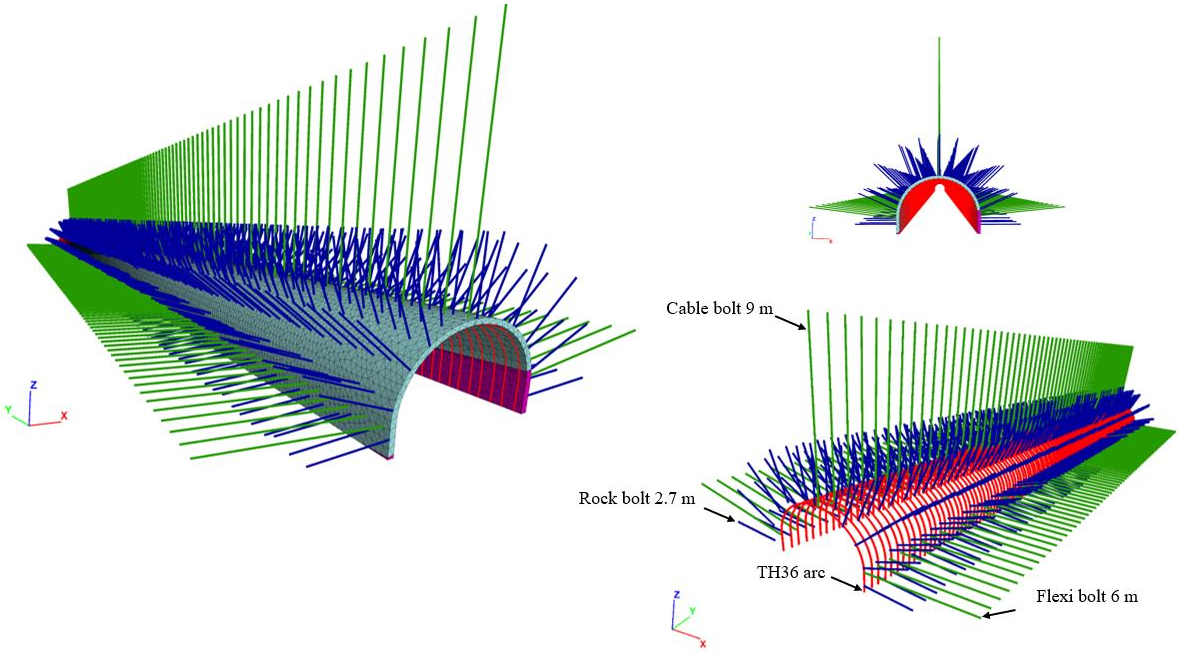
همچنین، باتوجه‌به این که سطح زمین در مدل ساخته‌شده مشخص نمی‌باشد، وزن لایه‌های بالایی محاسبه و به‌صورت تنش قائم به سقف مدل اعمال می‌شود. باتوجه‌به اینکه سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده موردمطالعه در سطحی پایین‌تر از منطقه مورد بررسی قرار دارد، تأثیرات آن در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته است. پس از اعمال شرایط مرزی و شرایط تنش‌های اولیه به مدل و بررسی نیروهای نامتعادل‌کننده، جابه‌جایی و سرعت در نقاط گره بازنشانی شد.



شکل ۶- نیروهای نامتعادل‌کننده در مرحله بعد از تعادل رساندن اولیه

۳-۴- کالیبراسیون مدل عددی با استفاده از تحلیل برگشتی

باتوجه‌به طول گام حفاری ۱/۶ متر، پیشروی تونل در مدل عددی به‌صورت مرحله‌ای شبیه‌سازی شد. در هر مرحله، رهاسازی تدریجی تنش باهدف بازنمایی فرایند حفاری انجام گرفت. سپس سیستم نگهداری نصب شده و حل مدل تا رسیدن به تعادل ادامه یافت. سیستم نگهداری در محدوده مورد بررسی این پژوهش از قاب‌های فولادی کشویی *TH36* با فاصله‌داری ۰/۶ متر، کابل‌انکرهای دوگانه سقف به طول ۹ متر با فاصله‌داری ۱/۱ متر، فلکسی‌بولت‌های انکر دیواره به طول ۶ متر با فاصله‌داری ۱ متر، پیچ‌سنگ به طول ۲/۷ متر با فاصله‌داری ۱ متر و کیسه‌شن با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر تشکیل شده است. برای کابل سقف ۹ متری، ۴ متر بدون باند و ۵ متر باند سیمان و برای فلکسی بولت دیواره ۶ متری، ۲ متر بدون باند و ۴ متر باند رزین در نظر گرفته شده است. در شکل (۷) هندسه و موقعیت پیچ‌سنگ، کابل سقف، فلکسی بولت دیواره و قاب‌های فولادی نصب شده برای مدل‌سازی تونل نشان داده شده است.

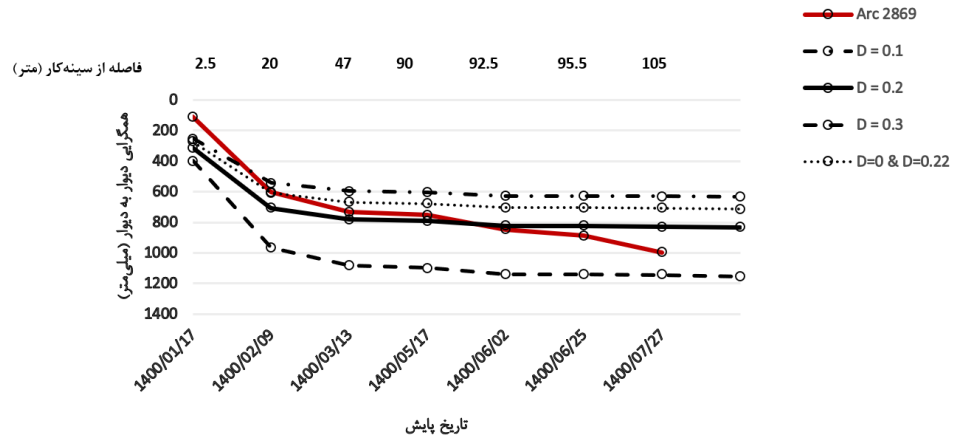


شکل ۷- آرایش سیستم نگهداری شامل پیچ‌سنگ، کابل و فلکسی بولت و قاب‌فولادی نصب شده در دیواره و سقف تونل

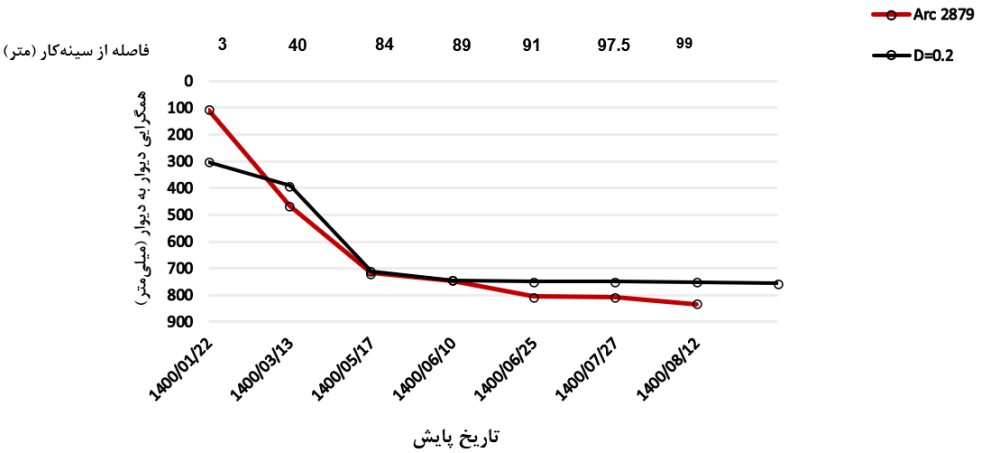
پس از اتمام گام‌های حفاری و نصب سیستم نگهداری در مدل، نتایج همگرایی دیواربه‌دیوار حاصل از مدل عددی با داده‌های همگرایی اندازه‌گیری‌شده در معدن مقایسه شد. باتوجه‌به اینکه اندازه‌گیری‌های انجام شده در معدن، در ارتفاع ۱ متری از کف تونل انجام شده است، در مدل عددی نیز همگرایی دیواربه‌دیوار در ارتفاع ۱ متری از کف تونل محاسبه شد. باتوجه‌به اینکه مدل عددی محدوده آرک‌های ۲۸۵۰ تا ۳۰۵۰ را پوشش می‌داد و داده‌های پایش برجای آرک ۲۸۶۹ در دسترس بود، این مقطع برای کالیبراسیون مدل انتخاب شد. بدین منظور، مقادیر همگرایی دیواربه‌دیوار حاصل از مدل عددی در حالت‌های مختلف فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D) با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در این آرک مقایسه شدند. نتایج نشان داد که با درنظرگرفتن مقدار D برابر ۰/۳ برای هر سه لایه زغال‌سنگ، سیلت‌استون و ماسه‌سنگ، همگرایی محاسبه شده از مقادیر اندازه‌گیری

شده معدن بیشتر بود. با کاهش مقدار D به ۰/۱ برای هر سه لایه، همگرایی پیش‌بینی‌شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده به دست آمد. همچنین در حالتی که D برابر ۰ برای لایه زغال‌سنگ و ۰/۲۲ برای لایه‌های سیلتاستون و ماسه‌سنگ در نظر گرفته شد، مقدار همگرایی محاسبه شده همچنان کمتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده معدن بود. در نهایت، در حالتی که مقدار D برابر ۰/۲ برای هر سه لایه در نظر گرفته شد، همگرایی حاصل از مدل عددی بیشترین تطابق را با داده‌های اندازه‌گیری‌شده نشان داد. در این مقطع، مقدار همگرایی محاسبه‌شده در مدل عددی برابر با ۸۳۱ میلی‌متر و مقدار اندازه‌گیری‌شده در معدن برابر با ۹۹۶ میلی‌متر بود. مقایسه نتایج آرک ۲۸۶۹ در شکل (۸) ارائه شده است.

پس از انتخاب مقدار D=۰/۲، این مقدار بدون کالیبراسیون مجدد در مقطع آرک ۲۸۷۹ اعمال شد تا عملکرد مدل در مقطعی دیگر از همان تونل ارزیابی شود. در این مقطع، مقدار همگرایی محاسبه‌شده در مدل عددی برابر با ۷۵۴ میلی‌متر و مقدار اندازه‌گیری‌شده معدن برابر با ۸۳۵ میلی‌متر بود. مقایسه نتایج آرک ۲۸۷۹ در شکل (۹) نشان داده شده است. براین‌اساس، مقدار منتخب فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D) در میان حالت‌های بررسی شده، برابر با ۰/۲ تعیین شد. میزان انطباق نتایج عددی با داده‌های میدانی در آرک‌های ۲۸۶۹ و ۲۸۷۹، به ترتیب حدود ۸۳ و ۹۰ درصد بود. این نتایج نشان می‌دهند که مقدار انتخاب شده D توانسته است همگرایی دیواربه‌دیوار را در دو مقطع بررسی‌شده با اختلاف نسبتاً محدودی نسبت به اندازه‌گیری‌های میدانی بازتولید کند.



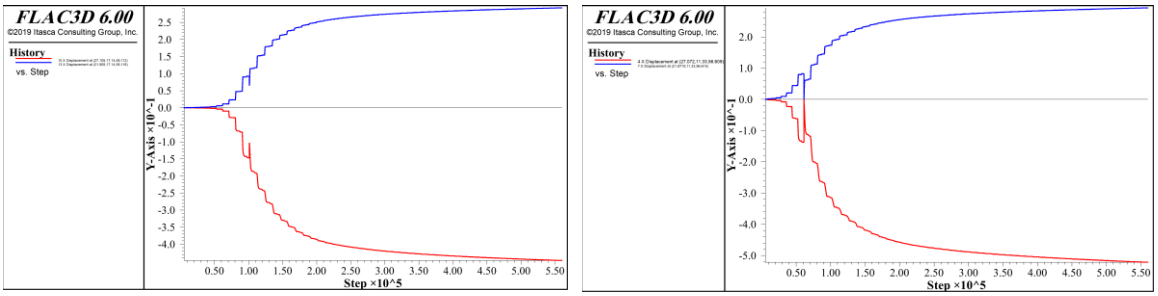
شکل ۸- مقایسه نتایج همگرایی آرک ۲۸۶۹



شکل ۹- مقایسه نتایج همگرایی آرک ۲۸۷۹

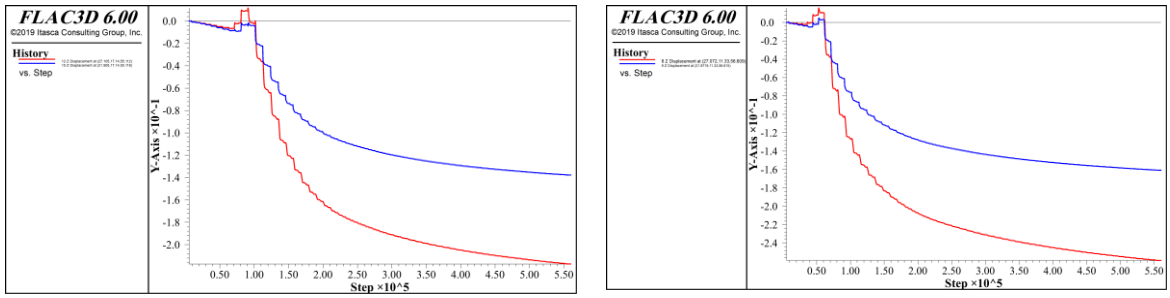
در شـــکل (۱۰)، تغییرات جابه‌جایی افقی دیواره‌های راســت و چپ تونل در آرک‌های ۲۸۶۹ و ۲۸۷۹ نشـان داده شده است. میزان جابه‌جایی در دیواره راست، نسبت به دیواره چپ بیشـتر است که می‌توان آن را به حضور و تراکم بیشـتر لایه‌های زغال‌ســنگ در این ناحیه نســبت داد؛ زیرا مقاومت پایین‌تر زغال‌سنگ نسبت به سنگ‌های دربرگیرنده می‌تواند موجب کاهش مقاومت موضـــعی توده‌ســـنگ و افزایش تغییر شـــکل در این بخش شـــود.

شـکل (۱۱) تغییرات جابه‌جایی قائم دیواره‌های راسـت و چـپ را در آرک‌های ۲۸۶۹ و ۲۸۷۹ نشـــان می‌دهـد. تحلیل روند تغییرات نشـــان می‌دهد که جابه‌جایی قائم در بخش دیواره راســـت به طور قابل‌توجهی بیشـــتر از دیواره چپ اسـت. این تفاوت را می‌توان باتوجه‌به حضـور لایه‌های زغال‌ســـنگ با مقاومت پایین‌تر در این بخش و تأثیر آنها بر رفتار تغییر شـکلی توده‌سـنگ پیرامون تونل تفسیر کرد.



(ب) (الف)

شکل ۱۰- (الف) تغییرات جابه‌جایی افقی دیواره‌های راست و چپ تونل در آرک ۲۸۶۹. (ب) تغییرات جابه‌جایی افقی دیواره‌های راست و چپ تونل در آرک ۲۸۷۹.

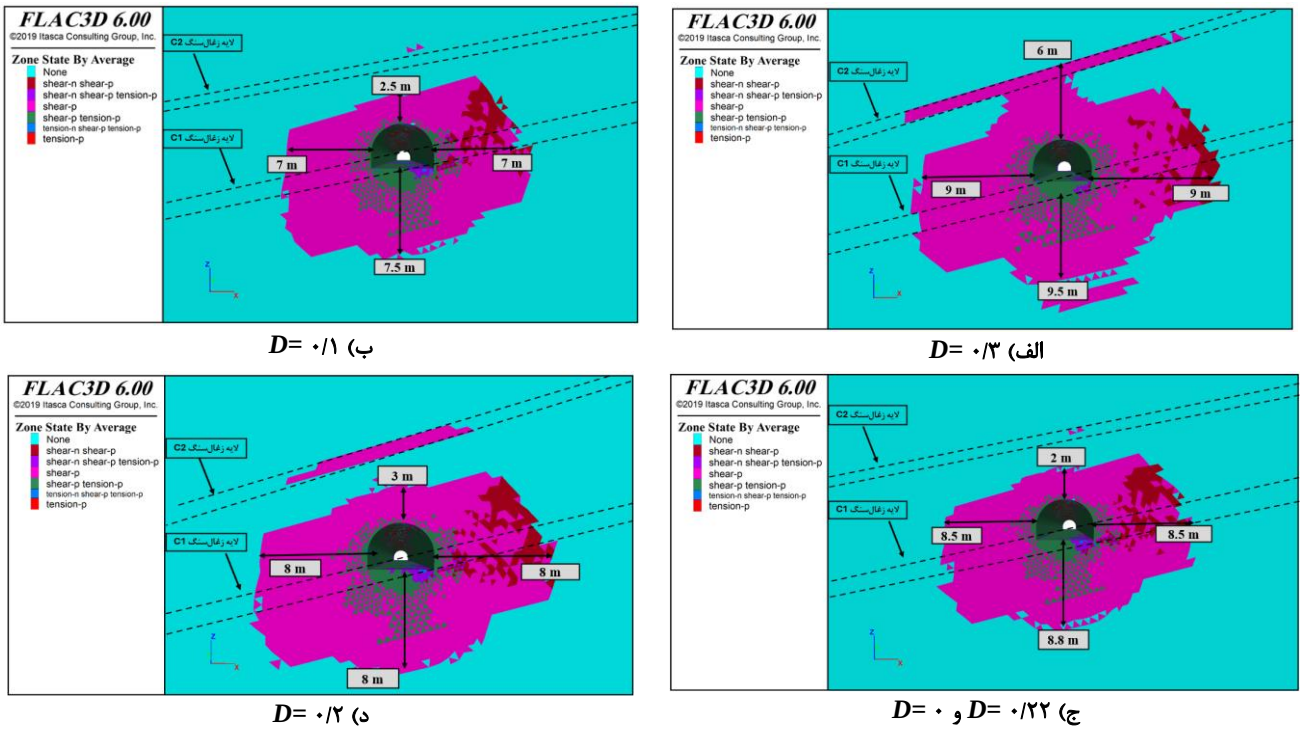


(ب) (الف)

شکل ۱۱- (الف) نمودار تغییرات جابه‌جایی قائم دیواره‌های راست و چپ تونل در آرک ۲۸۶۹. (ب) نمودار تغییرات جابه‌جایی قائم دیواره‌های راست و چپ تونل در آرک ۲۸۷۹

به‌منظور بررسی رفتار توده‌سنگ در حالت‌های مختلف D، توسعه زون پلاستیک در دیواره، سقف و کف تونل نیز بررسی شد. بدین منظور، زون پلاستیک ایجادشده در اطراف تونل برای مقادیر مختلف D استخراج و ابعاد آن در بخش‌های مختلف تونل با یکدیگر مقایسه شد. ناحیه زون پلاستیک اطراف تونل در شکل (۱۲) نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در حالت D =۰/۳ گسترده‌ترین ناحیه پلاستیک در اطراف تونل ایجاد شده است. درحالی‌که در حالت D =۰/۱ زون پلاستیک محدودتر بوده و کمترین گستردگی را نشان می‌دهد. در حالت D =۰/۲ که بیشترین تطابق بین همگرایی مدل عددی و داده‌های اندازه‌گیری‌شده معدن مشاهده شد، گستردگی زون پلاستیک نیز در محدوده‌ای بین دو حالت مذکور قرار دارد. بنابراین، روند تغییرات زون پلاستیک با

تغییر مقدار D با روند تغییرات همگرایی مدل عددی سازگار است. این هماهنگی میان روند تغییرات همگرایی و توسعه زون پلاستیک، سازگاری نتایج عددی را با رفتار مکانیکی موردانتظار توده‌سنگ در مقادیر مختلف D نشان می‌دهد. همچنین بررسی زون پلاستیک نشان می‌دهد که در تمام حالت‌های مورد بررسی، بیشترین گستردگی زون پلاستیک در کف تونل مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تمرکز تنش‌های برشی و شرایط مقاومتی توده‌سنگ در این ناحیه باشد. در مقابل، سقف تونل در تمامی حالت‌ها کمترین ضخامت زون پلاستیک را نشان می‌دهد که بیانگر پایداری نسبی بیشتر سقف در مقایسه با دیواره‌ها و کف تونل است.



الف) D= ۰/۳ ب) D= ۰/۱

ج) D= ۰/۲۲ و D= ۰ د) D= ۰/۲

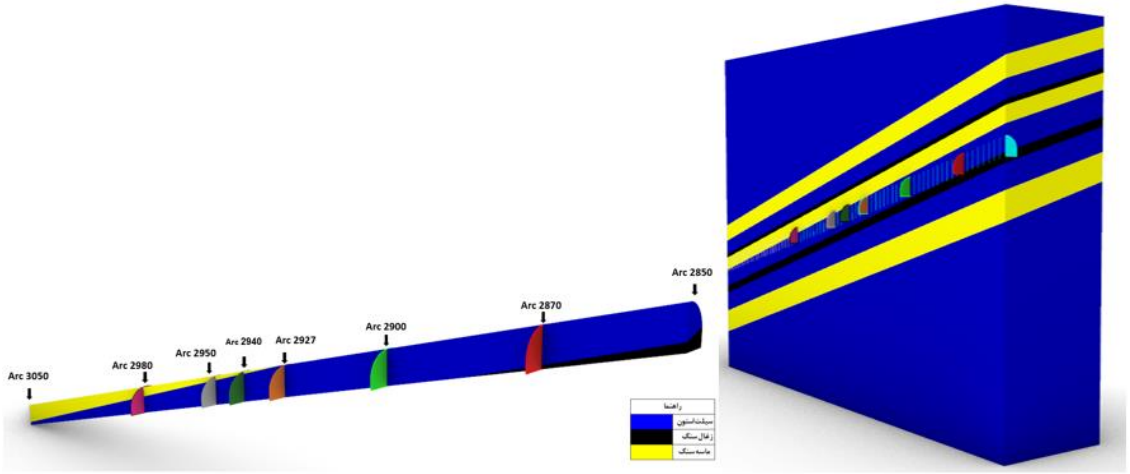
شکل ۱۲- ناحیه زون پلاستیک اطراف تونل پس از اتمام گام‌های حفاری

۳-۵- برآورد همگرایی در مقاطع مختلف در مدل عددی کالیبره شده

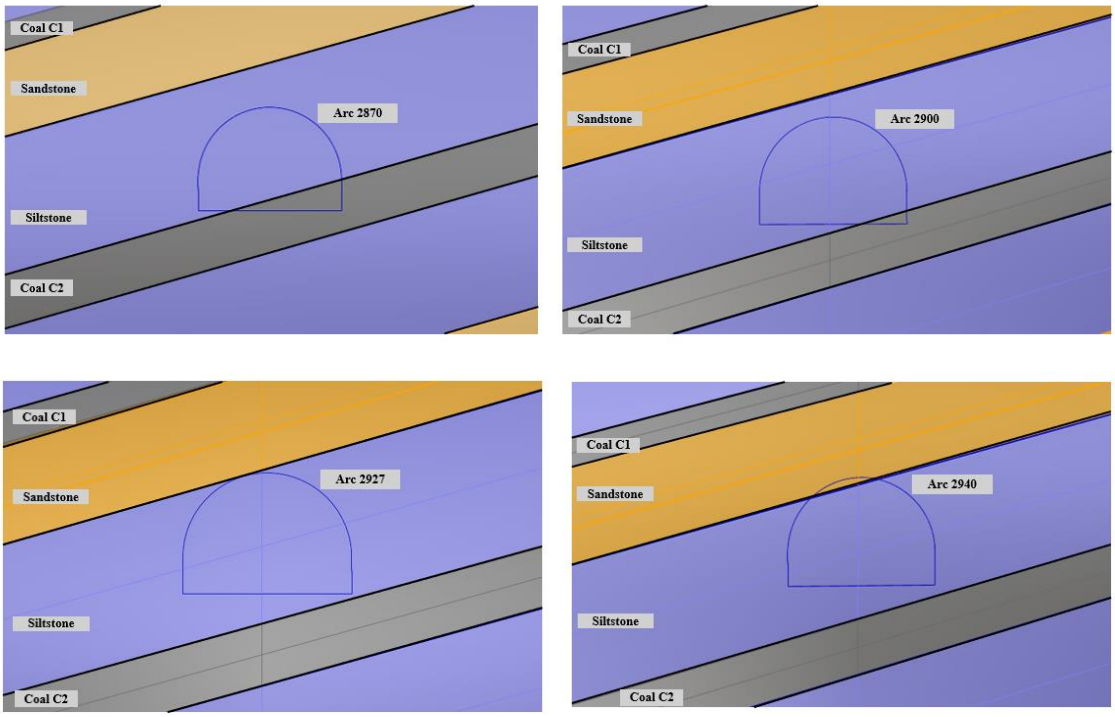
باتوجه‌به تعیین مقدار منتخب فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D) برابر با ۰/۲ از طریق تحلیل برگشتی، در ادامه مدل عددی کالیبره‌شده برای برآورد همگرایی در مقاطع مختلف استفاده شد. مقاطع انتخاب شده در شکل (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در آرک‌های ۲۸۷۰ و ۲۹۰۰، حضور لایه زغال‌سنگ در کف تونل با افزایش میزان همگرایی دیواره‌دیوار و مساحت زون پلاستیک همراه است.

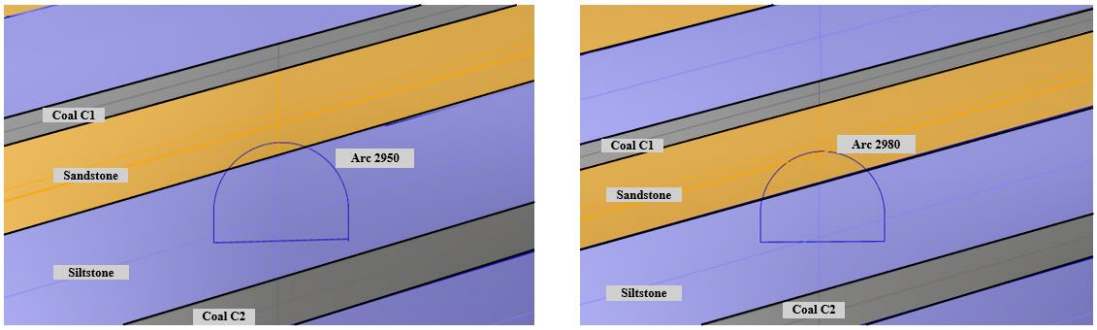
باتوجه‌به تفاوت میزان حضور زغال‌سنگ در این دو مقطع، همگرایی دیواره‌دیوار و مساحت زون پلاستیک در آرک ۲۸۷۰ بیشتر از آرک ۲۹۰۰ به دست آمد. در آرک‌های ۲۹۴۰، ۲۹۵۰ و ۲۹۸۰ نیز افزایش سهم ماسه‌سنگ در سطح مقطع، با کاهش میزان همگرایی دیواره‌دیوار و مساحت زون پلاستیک همراه بود. بنابراین، کمترین میزان همگرایی دیواره‌دیوار و مساحت زون پلاستیک در میان این مقاطع، در آرک ۲۹۸۰ مشاهده شد. مقایسه نتایج مقاطع مختلف در شکل (۱۵) ارائه شده است. در مجموع، نتایج مقاطع بررسی‌شده نشان می‌دهد که تغییرات همگرایی دیواره‌دیوار و مساحت زون پلاستیک با تفاوت در شرایط زمین‌شناسی،

از جمله ترکیب لایه‌های سنگی و میزان حضور زغال‌سنگ در سطح مقطع، همراه است. این یافته‌ها بیانگر رابطه مشاهده‌شده میان شرایط زمین‌شناسی و رفتار تغییر شکلی تونل در مقاطع واقعی موردمطالعه است.

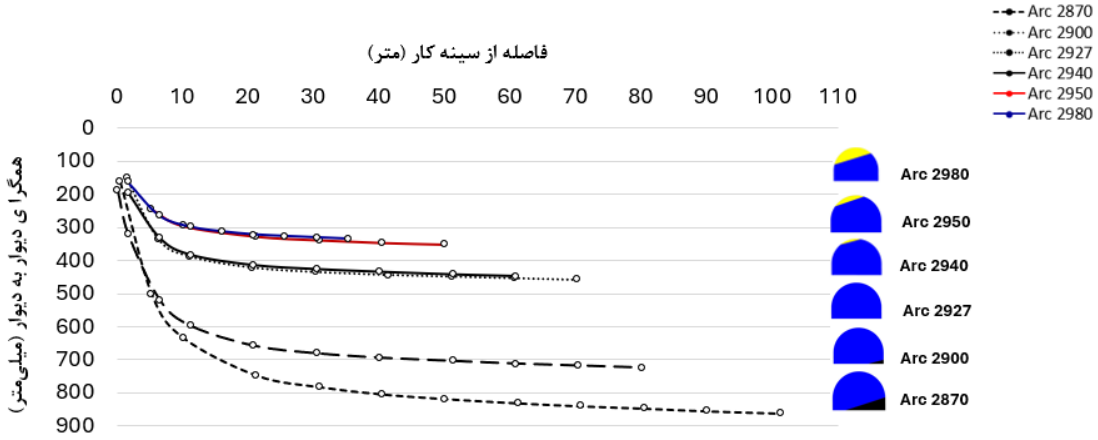


شکل ۱۳- موقعیت سه‌بعدی مقاطع انتخابی در تونل



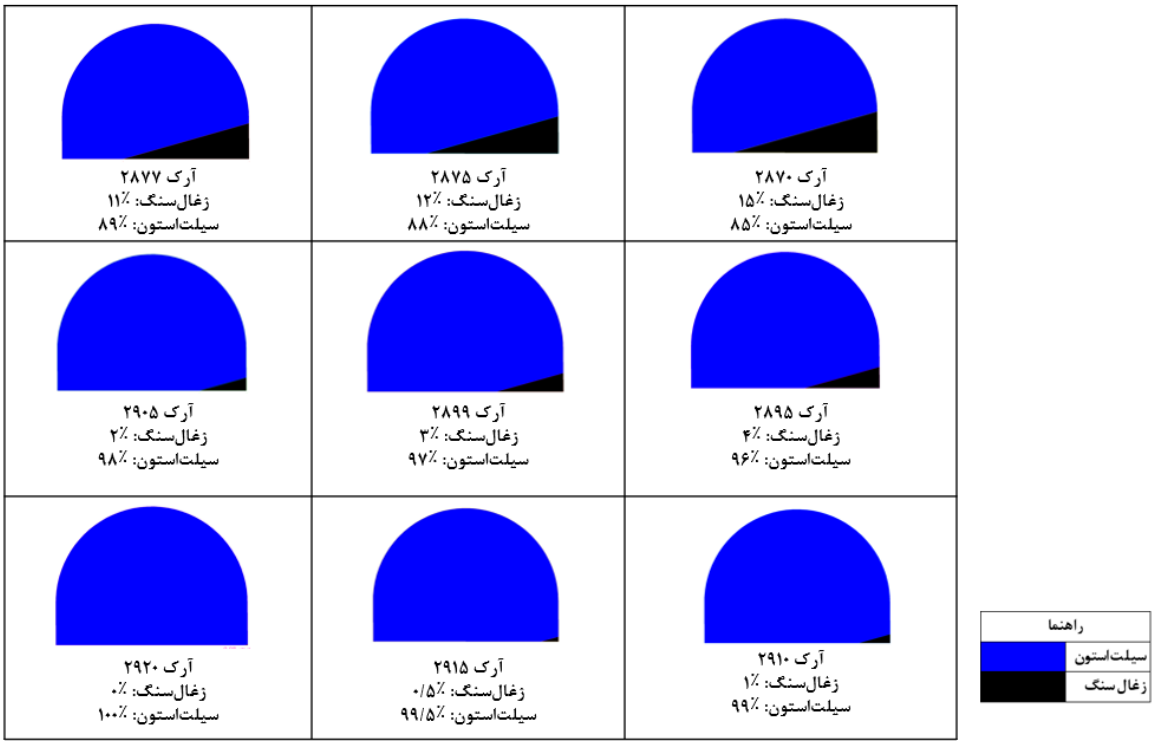


شکل ۱۴- مقاطع انتخاب‌شده همراه با لایه‌بندی

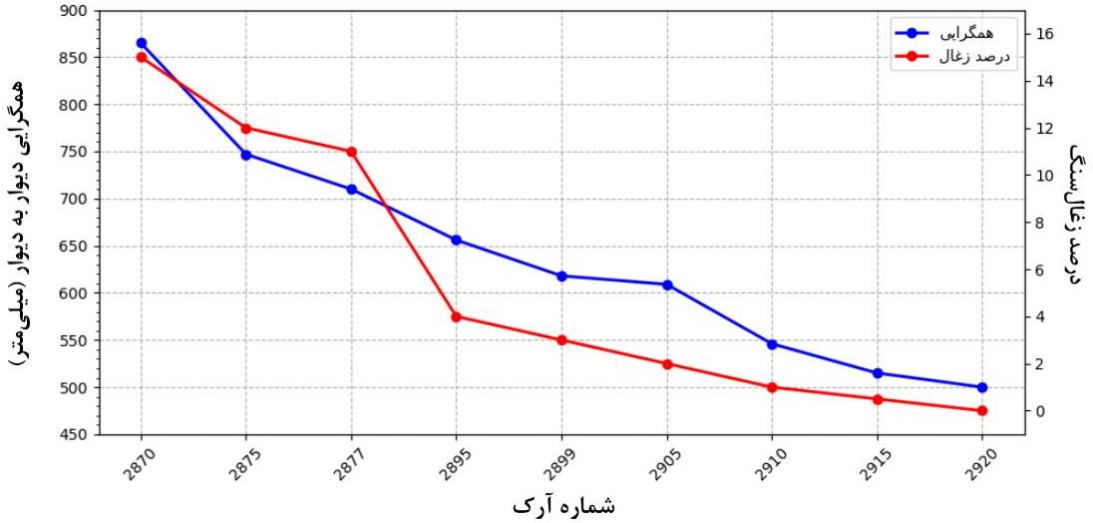


شکل ۱۵- مقایسه نتایج همگرایی دیواربه‌دیوار در مقاطع انتخابی

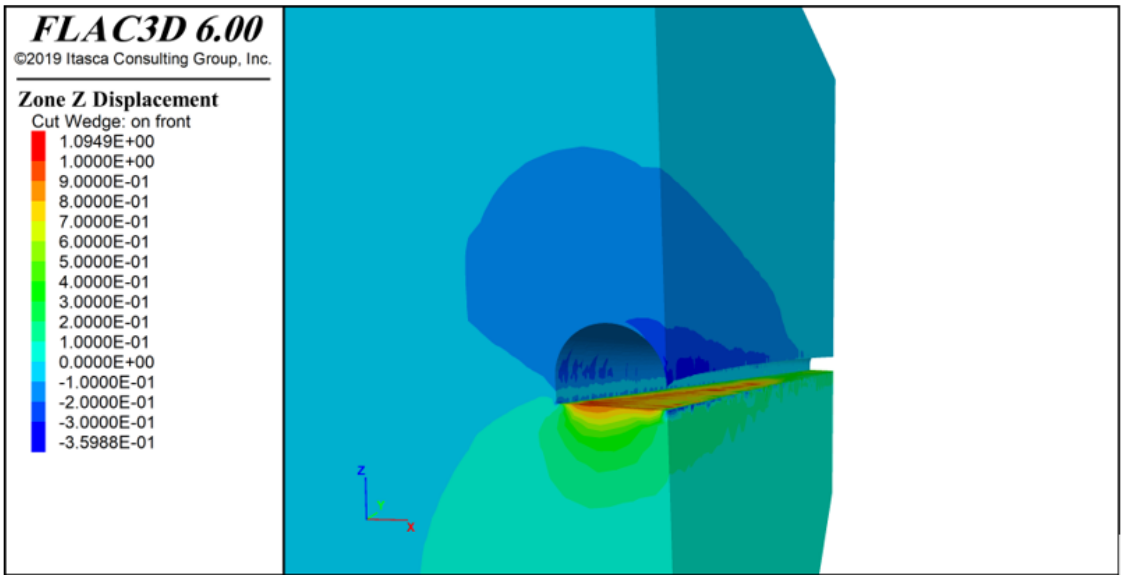
در ادامه، تعدادی از مقاطع دارای لایه زغال‌سنگ در کف تونل، که در شکل (۱۶) نشان داده شده‌اند، بر اساس میزان حضور زغال‌سنگ در سطح مقطع مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس نمودار ارائه‌شده در شکل (۱۷)، سهم زغال‌سنگ از آرک ۲۸۷۰ به‌تدریج کاهش‌یافته و در آرک ۲۹۱۵ به کمترین مقدار رسیده است، به‌طوری‌که در آرک ۲۹۲۰، زغال‌سنگ دیگر در سطح مقطع تونل حضور ندارد. هم‌زمان، همگرایی دیواربه‌دیوار از ۸۵۰ میلی‌متر در آرک ۲۸۷۰ به ۵۰۰ میلی‌متر در آرک ۲۹۲۰ کاهش‌یافته است. از نظر مکانیکی، مقاومت فشاری و برشی کمتر زغال‌سنگ نسبت به سیلت‌استون می‌تواند در رفتار تغییر شکلی توده‌سنگ تأثیرگذار باشد. در مقاطع بررسی‌شده، کاهش سهم زغال‌سنگ با کاهش همگرایی دیواربه‌دیوار همراه بوده است. همچنین، پلات جابه‌جایی ارائه‌شده در شکل (۱۸) نشان می‌دهد که در ناحیه حضور زغال‌سنگ در کف تونل، جابه‌جایی‌های قابل‌توجهی رخ‌داده و مقدار جابه‌جایی در برخی نقاط به حدود ۱ متر می‌رسد. این وضعیت در نتایج مدل‌سازی با گسترش زون پلاستیک همراه است. در مقاطع بعدی نیز، هم‌زمان با کاهش سهم زغال‌سنگ، میزان جابه‌جایی و همگرایی کاهش‌یافته است. این روند، در چارچوب نتایج مدل‌سازی و باتوجه‌به تفاوت در ترکیب زمین‌شناسی مقاطع بررسی‌شده، قابل‌تفسیر است.



شکل ۱۶- موقعیت و درصد سهم لایه‌های زمین‌شناسی در سطح مقطع تونل در آرک‌های مورد بررسی



شکل ۱۷- نمودار همگرایی دیواربه‌دیوار با افزایش درصد زغال‌سنگ در مقاطع



شکل ۱۸- جابه‌جایی قائم پس از حفاری و نصب نگهداری

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از تحلیل برگشتی مبتنی بر داده‌های همگرایی اندازه‌گیری‌شده در تونل‌های اصلی معدن زغال‌سنگ پروده طبس، مقدار منتخب فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ (D) تعیین و مدل عددی سه‌بعدی تونل در نرم‌افزار $FLAC3D$ کالیبره شد. نتایج تحلیل برگشتی نشان داد که در میان حالت‌های بررسی‌شده، مقدار $D = ۰/۲$ برای لایه‌های زغال‌سنگ، سیلت‌استون و ماسه‌سنگ، بهترین تطابق را میان نتایج مدل عددی و داده‌های اندازه‌گیری‌شده همگرایی ایجاد کرد. در این حالت، میزان تطابق نتایج مدل با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در آرک‌های ۲۸۶۹ و ۲۸۷۹، به ترتیب حدود ۸۳ و ۹۰ درصد به دست آمد. این نتایج نشان

می‌دهد که استفاده از داده‌های واقعی همگرایی در فرایند تحلیل برگشتی می‌تواند به انتخاب مناسب فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ و کاهش عدم قطعیت ناشی از تعیین این پارامتر در مدل‌سازی عددی کمک کند و زمینه را برای بهبود پیش‌بینی رفتار تغییر شکلی تونل فراهم سازد.

بررسی نتایج مدل کالیبره‌شده در مقاطع مختلف نشان داد که تغییرات همگرایی دیواربه‌دیوار و گسترش زون پلاستیک با تفاوت در شرایط زمین‌شناسی مقاطع بررسی‌شده، از جمله موقعیت لایه زغال‌سنگ و میزان حضور آن در سطح مقطع تونل، همراه است. در مقاطعی که لایه زغال‌سنگ در کف تونل قرار داشت، کاهش سهم زغال‌سنگ در سطح مقطع با کاهش همگرایی دیواربه‌دیوار همراه بود، به‌طوری‌که همگرایی دیواربه‌دیوار از حدود ۸۵۰ میلی‌متر در آرک ۲۸۷۰ به حدود ۵۰۰ میلی‌متر در آرک ۲۹۲۰ کاهش یافت، از نظر مکانیکی، مقاومت پایین‌تر زغال‌سنگ نسبت به سنگ‌های دربرگیرنده می‌تواند در تبیین این روند نقش داشته باشد.

نتایج این پژوهش در کنار یافته‌های مطالعات پیشین نشان می‌دهد که موقعیت و میزان حضور لایه زغال‌سنگ از عوامل مؤثر بر رفتار تغییر شکلی تونل بوده و باید در تحلیل پایداری و طراحی سیستم‌های نگهداری تونل‌های زغال‌سنگ موردتوجه قرار گیرد. همچنین، مقایسه جابه‌جایی دیواره‌های راست و چپ در آرک‌های ۲۸۶۹ و ۲۸۷۹ نشان داد که جابه‌جایی در دیواره راست بیشتر از دیواره چپ است. این تفاوت می‌تواند باتوجه‌به شرایط زمین‌شناسی و ترکیب لایه‌های موجود در بخش‌های مختلف مقطع، از جمله حضور زغال‌سنگ، تفسیر شود. مقاومت پایین‌تر زغال‌سنگ در مقایسه با سنگ‌های دربرگیرنده می‌تواند موجب کاهش مقاومت موضعی توده‌سنگ و افزایش تغییر شکل در بخش‌های دارای زغال‌سنگ شود. این نتیجه نیز با روند مشاهده‌شده در مقاطع مختلف و نقش حضور زغال‌سنگ در افزایش تغییر شکل تونل سازگاری دارد. بنابراین، اگرچه افزایش همگرایی همراه با حضور بیشتر زغال‌سنگ از نظر مکانیکی قابل‌انتظار است، نتایج مدل کالیبره‌شده روند کمی این تغییرات را در مقاطع مختلف نشان می‌دهد.

بررسی زون پلاستیک نیز روندی سازگار با نتایج همگرایی نشان داد. در مقدار $D=$ ۰/۳، گسترده‌ترین زون پلاستیک و در مقدار $D=$ ۰/۱، محدودترین زون پلاستیک مشاهده شد، درحالی‌که در $D=$ ۰/۲، وضعیت زون پلاستیک با نتایج حاصل از همگرایی و تطابق بهتر مدل با داده‌های واقعی سازگاری بیشتری داشت. همچنین، در تمامی حالت‌های بررسی شده، بیشترین گسترش زون پلاستیک در کف تونل و کمترین ضخامت آن در سقف مشاهده شد که می‌تواند بیانگر حساسیت بیشتر کف و پایداری نسبی بیشتر سقف تونل در شرایط موردمطالعه باشد.

در مجموع، مهم‌ترین دستاورد این پژوهش، تعیین مقدار منتخب فاکتور برهم‌ریختگی توده‌سنگ از طریق تحلیل برگشتی داده‌های واقعی همگرایی و استفاده از آن برای کالیبراسیون مدل عددی تونل است. مدل کالیبره‌شده سپس امکان بررسی کمی رفتار تغییر شکلی مقاطع مختلف و ارزیابی روند تغییر همگرایی در ارتباط با شرایط حضور زغال‌سنگ را فراهم کرد. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای بهبود قابلیت پیش‌بینی مدل‌های عددی در شرایط مشابه مورداستفاده قرار گیرد.

باوجود نتایج به‌دست‌آمده، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی از جمله مدل‌سازی توده‌سنگ به‌صورت محیط پیوسته معادل، به دلیل محدودیت اطلاعات مربوط به ناپیوستگی‌ها و لحاظ‌نکردن اثر آب‌های زیرزمینی و رفتار وابسته به زمان است. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، با فراهم‌شدن داده‌های دقیق‌تر مربوط به ناپیوستگی‌ها، استفاده از مدل‌های ناپیوسته مانند $UDEC$ و $3DEC$ مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، بررسی تأثیر آب‌های زیرزمینی و رفتار وابسته به زمان، از جمله خزش توده‌سنگ، بر رفتار تغییر شکلی و همگرایی تونل می‌تواند به افزایش دقت مدل‌سازی کمک کند.

افزون بر این، استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته‌تر، از جمله مدل‌های رفتاری نرم‌شوندگی، و درنظرگرفتن اثر پارامتر اتساع می‌تواند به بهبود شبیه‌سازی رفتار مکانیکی توده‌سنگ کمک کند. در نهایت، مطالعه رفتار تغییر شکلی لایه‌های زغال‌سنگ در شرایط زمین‌شناسی و هندسی متفاوت می‌تواند زمینه تعمیم نتایج و توسعه مدل‌های پیش‌بینی رفتار تونل‌های زغال‌سنگ را فراهم سازد.

۵- سپاس‌گزاری

از مدیریت و پرسنل محترم معدن زغال‌سنگ پروده طبس که در تأمین داده‌های میدانی همکاری نمودند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

۶- منبع‌ها

[1] Shen, B. (2013). Coal Mine Roadway Stability in Soft Rock: A Case Study. *Rock Mech Rock Eng*(6), 2225-2238. doi:10.1007/s00603-013-0528-y

[2] Q. Wang, R. P. (2017). Study on failure mechanism of roadway with soft rock in deep coal mine and confined concrete support system. *Engineering Failure Analysis*, 155-177. doi:10.1016/j.engfailanal.2017.08.003

[3] Mahdis Shekarchizadeh, M. N. (2025). Numerical Simulation of Appropriate Design for Selecting Tunnel Support Systems in Squeezing Grounds (Tunnel No. 2 in Tabas Coal Mine, Iran). *Advances in Civil Engineering*(1), 4398231. doi:10.1155/adce/4398231

[4] Yang, S.-Q. C.-W.-F. (2017). A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'An coal mine, China. *Engineering Geology*, 89-101. doi:10.1016/j.enggeo.2016.12.012

[5] Mahdevari, S. H. (2013). A dynamically approach based on SVM algorithm for prediction of tunnel convergence during excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 59-68. doi:10.1016/j.tust.2013.05.002

[6] Meng, N. B. (2023). Failure mechanism and control technology of deep soft-rock roadways: Numerical simulation and field study. *Underground Space*, 1-17. doi:10.1016/j.undsp.2023.02.002

[7] Deyu Qian, J. D. (2022). Deformation characteristics and control countermeasures for surrounding rock of deep roadway under mining disturbance: A case study. *Shock and Vibration*(1), 9878557. doi:10.1155/2022/9878557

[8] Hao Zhang, L. Y. (2023). Study on stability control mechanism of deep soft rock roadway and active support technology of bolt-grouting flexible bolt. *Minerals*(3), 409. doi:10.3390/min13030409

[9] Yang, X. W. (2018). A study of the large deformation mechanism and control techniques for deep soft rock roadways. *Sustainability*(4), 1100. doi:10.3390/su10041100

[10] Yazdani, M. S. (2012). Displacement-based numerical back analysis for estimation of rock mass parameters in Siah Bisheh powerhouse cavern using continuum and discontinuum approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41-48. doi:10.1016/j.tust.2011.09.002

[11] Lee, J.-H. A. (2009). Quick prediction of tunnel displacements using Artificial Neural Network and field measurement results. *International Journal of the JCRM*(2), 53-62. doi:10.11187/ijjcrm.5.53

[12] An, J.-S. K.-N.-Y.-S.-I. (2020). Tunnel back analysis based on differential evolution using stress and displacement. *Advances in Civil Engineering*(1), 8156573. doi:10.1155/2020/8156573

[13] Fakhimi, A. S. (2004). Numerical back analysis for estimation of soil parameters in the Resalat Tunnel project. *Tunnelling and Underground Space Technology*(1), 56-67. doi:10.1016/S0886-7798(03)00087-7

[14] Sharifzadeh, M. D. (2012). Design of sequential excavation tunneling in weak rocks through findings obtained from displacements based back analysis. *Tunnelling and underground space technology*,

10-17. doi:10.1016/j.tust.2011.08.003
[15] Małkowski, P. O. (2019). Convergence monitoring as a basis for numerical analysis of changes of rock-mass quality and Hoek-Brown failure criterion parameters due to longwall excavation. *Archives of Mining Sciences*(1), 93-118. doi:10.24425/ams.2019.126274
[16] Xie, X. S. (2024). Evaluation of surrounding rock stability by optimizing Hoek-Brown criterion parameters under blasting loads. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*(12), 516. doi:10.1007/s10064-024-04007-y
[17] Tian, M. H. (2021). Nonlinear regression analysis for deep rock mass parameters of the hoek-brown failure criterion based on the differential evolution. *KSCE Journal of Civil Engineering*(8), 3160-3171. doi:10.1007/s12205-021-1743-9
[18] Abbasi, F. K. (2021). Support Analysis of Main Tunnels in Tabas Mechanized Parvadeh Mine at Intersection with Coal Seam. *Journal of Mining and Environment*(3), 711-724. doi:10.22044/jme.2021.10610.2014
[۱۹] شکرچی‌زاده، م. ن. (۱۴۰۱). تحلیل پایداری و بررسی همگرایی در تراز ۲۴۱۰-۲۴۴۰ تونل اصلی شماره ۲ معدن زغال‌سنگ پروده طبس با استفاده از مدل‌سازی عددی. *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۱۰. doi:10.22060/ceej.2026.23137.8114
[۲۰] فرخ، ا. (۱۴۰۲). *گزارش زمین‌شناسی معدن زغال‌سنگ طبس*.
[21] Zhu, L. L. (2023). Research on floor heave mechanisms and control technology for deep dynamic pressure roadways. *Processes*(2), 467. doi:10.3390/pr11020467
[22] Zhou, X. W. (2022). Research on theory and technology of floor heave control in semicoal rock roadway: Taking longhu coal mine in Qitaihe mining area as an Example. *Lithosphere*, 3810988. doi:10.2113/2022/3810988
[۲۳] تراکمه، ک. ش. (۲۰۲۶). تحلیل پایداری تقاطع دوشاخه حاصل از حفاری تونل دسترسی شماره پنج و تونل شیب‌دار شماره دو در معدن زغال‌سنگ پروده طبس. *مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی*، ۱۱۵-۱۳۱. doi:10.22044/tuse.2025.16187.1502
[24] Lai, X. X. (2020). Research on mechanism and control of floor heave of mining-influenced roadway in top coal caving working face. *Energies*(2), 381. doi:10.3390/en13020381

Journal of Rock Mechanics
Vol. 10, No. 2, PP. 81-102, (2026)

https://doi.org/10.22034/IRSRM.2026.604095.1098

Assessment of the Effect of Coal Seam Position on the Convergence of Main Tunnels at the Tabas Coal Mine Using Back Analysis of the Rock Mass Disturbance Factor (D)

Neda Valikhani[1]; Ebrahim Farrokh[1*]

1- Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 08 August 2026 Accepted: 22 September 2026
(*Corresponding author: e.farrokh@aut.ac.ir)

Keywords

Tunnel convergence
Tabas Coal Mine
Back analysis
Numerical modeling
Rock mass disturbance factor (D)
FLAC3D software

Abstract

The assessment and management of convergence in mine tunnels play an important role in ensuring safety, maintaining stability, and optimizing support system design. This issue is particularly significant in coal mines, where heterogeneous rock masses and complex geological conditions pose substantial challenges. One of the main challenges in the main tunnels of the Parvadeh coal mine in Tabas, Iran, is the occurrence of considerable convergence and large deformations in certain sections, which may reduce tunnel stability and damage the support system. In this study, the convergence of the main tunnels within the range of Arches 2850 to 3050 in Slope 3 of the Parvadeh coal mine was investigated using three-dimensional numerical modeling in FLAC3D. The rock mass disturbance factor (D) was calibrated through back-analysis to improve the agreement between numerically predicted convergence and field measurements. For this purpose, rock mass strength parameters corresponding to different values of D were determined using RocLab and incorporated into the numerical model. The results showed that, among the cases investigated, a value of D = 0.2 provided the best agreement with the measured data. For this case, the calculated wall-to-wall convergence at Arch 2869 was 831 mm, compared with the measured value of 996 mm, while at Arch 2879, the calculated convergence was 754 mm, compared with the measured value of 835 mm. These results correspond to agreement levels of approximately 83% and 90%, respectively. Furthermore, comparisons among different tunnel sections indicated that variations in wall-to-wall convergence and plastic zone extent were associated with differences in geological conditions, including the position of the coal seam and its proportion within the tunnel cross-section. In the sections examined, the presence of lower-strength coal layers along the tunnel walls and floor was associated with greater displacements and higher convergence. Conversely, a reduction in the proportion of coal within the cross-section was accompanied by decreases in convergence and plastic zone extent. These findings indicate that calibrating the rock mass disturbance factor D using field convergence measurements, while accounting for geological conditions such as layer composition and the proportion of coal within the tunnel cross-section, can help improve the prediction of deformation behavior in coal mine tunnels and support the analysis used in support system design.

Introduction

Convergence of underground excavations is considered an important indicator for assessing the deformation behavior and stability conditions of tunnels during and after excavation. The magnitude of convergence and its rate of change reflect the response of the rock mass surrounding the tunnel to the stress release and redistribution induced by excavation and can be used to evaluate deformation trends and identify stable or unstable conditions. In this study, the convergence

Journal of Rock Mechanics
Vol. 10, No. 2, PP. 81-102, (2026)

https://doi.org/10.22034/IRSRM.2026.604095.1098



of the main tunnels in Slope 3 of the Parvadeh Tabas Coal Mine was investigated using numerical modeling.

Methodology and Approaches

In this study, the convergence of the main tunnels in Slope 3 of the Parvadeh Tabas Coal Mine was investigated using three-dimensional numerical modeling in FLAC3D. The rock mass disturbance factor (D) was calibrated through back analysis based on actual convergence measurements. The rock mass strength parameters corresponding to different values of D were determined using RocLab and incorporated into the numerical model. Subsequently, the calibrated model was used to investigate the effect of the position and proportion of the coal seam within the tunnel cross-section on convergence behavior.

Results and Conclusions

The results showed that the optimum value of the disturbance factor (D) was 0.2. At this value, the wall-to-wall convergence at Arc 2869 was 831 mm, compared with the measured value of 996 mm, while at Arc 2879, it was 754 mm, compared with the measured value of 835 mm, corresponding to agreement levels of 83% and 90%, respectively, with the actual mine data.