

مدل‌سازی عددی پایداری محل تقاطع تونل شیب‌دار و تونل دسترسی معدن زغال‌سنگ طبس

علیرضا تراکمه^۱؛ ستار مهدوری^{۲*}؛ کورش شهریار^۳

- ۱- کارشناسی ارشد تونل و فضاهای زیرزمینی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران، ali.tarakameh@aut.ac.ir
۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران، satar.mahdevari@aut.ac.ir
۳- استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران، k.shahriar@aut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱

(نویسنده مسئول: satar.mahdevari@aut.ac.ir)

به دلیل پیچیدگی طرح شبکه تونل‌ها در معادن زیرزمینی، این معادن معمولاً دارای تقاطع‌های متعددی هستند که پایداری آنها اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، پایداری یکی از تقاطع‌های دوشاخه معدن زغال‌سنگ طبس، بررسی شده است. در این راستا، با استفاده از روش عددی تفاضل محدود در محیط نرم‌افزار *FLAC3D*، جابه‌جایی‌ها در محل تقاطع دوشاخه بررسی شدند. سیستم نگهداری تونل شیب‌دار به صورت پیچ‌سنگ‌های تمام تزریقی با آرایش شعاعی به طول ۲/۴ متر و قاب‌های فولادی کشویی با فاصله‌داری ۶۰۰ میلی‌متر تعریف شده است. سیستم نگهداری تونل دسترسی و مقطع دوزنقه-شکل محل تقاطع نیز از پیچ‌سنگ‌های ۳ و ۲/۷ متری به ترتیب در سقف و دیواره و همین‌طور قاب‌های فولادی متشکل از تیرهای *IPB260* و *IPB320* استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بیشینه جابه‌جایی عمودی سقف تونل شیب‌دار قبل از حفاری تونل دسترسی ۲۹/۳ سانتی‌متر است، ولی پس از حفاری تونل دسترسی به ۳۵/۴ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. جابه‌جایی عمودی حاصل از حفاری تقاطع، در تونل شیب‌دار عمدتاً در سمت پایه سنگی سمت زاویه بسته رخ می‌دهد. همچنین با افزایش فاصله از محل تقاطع، جابه‌جایی‌ها کاهش می‌یابد؛ به طوری که نرخ کاهش جابه‌جایی در تونل شیب‌دار سمت زاویه باز بیشتر از سمت زاویه بسته است.

چکیده

تقاطع دوشاخه، تحلیل پایداری، مدل‌سازی عددی، روش تفاضل محدود، معدن زغال‌سنگ طبس

واژگان کلیدی

۱- مقدمه
رو عمق معادن زیرزمینی زغال‌سنگ در حال افزایش بوده و به تبع آن تأمین پایداری فضاهای زیرزمینی و شبکه آماده‌سازی آن پیچیده‌تر خواهد شد. این سازه‌های زیرزمینی که شامل تونل‌ها، راهروها و گالری‌های تهویه و ترابری

با پیشرفت روزافزون فناوری و نیاز صنایع مختلف به انرژی ارزان، زغال‌سنگ همچنان رتبه اول را در تأمین انرژی صنایع به ویژه صنایع فولادسازی و انرژی الکتریسیته دارد [۱]. از این

است. سینگ و همکاران برای تحلیل پایداری تقاطع T-شکل در یک معدن زغال سنگ از روش المان محدود استفاده کردند و عمق، تنش‌های افقی و هندسه تقاطع را به عنوان پارامترهای کلیدی مؤثر بر پایداری تقاطع معرفی کردند [۱۱]. لیو و همکاران با هدف درک تأثیر حفاری تونل انشعاب بر سیستم نگهداری تونل اصلی در یک تونل متقاطع شهری، از روش المان محدود استفاده کردند [۱۲]. سیائو و همکاران برای مطالعه رفتار توده سنگ پیرامون محل تقاطع، ۷۵ مدل عددی را با استفاده از روش تفاضل محدود بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش زاویه تقاطع دوشاخه، جابه‌جایی سقف در محل تقاطع کاهش می‌یابد [۱۳]. لیو و ونگ برای بررسی وضعیت تغییرشکل‌ها و توزیع تنش‌های پیرامون تونل‌های دوشاخه از رویکرد ریز-مدل برای مدلسازی چهار سناریو مختلف به روش المان محدود استفاده کردند [۱۴]. گوا و همکاران به منظور مطالعه مکانیزم‌های شکست و تغییرشکل‌ها در تونل‌های دوشاخه معدن زغال سنگ، از روش عددی تفاضل محدود استفاده کردند و بر تأثیر پایداری پایه میانی در پایداری تقاطع دوشاخه تأکید کردند [۱۵]. لی و همکاران با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، جابه‌جایی‌ها، تنش‌های القایی و ناحیه پلاستیک را در اطراف تقاطع‌های دوشاخه مطالعه کردند و بر اساس آن سیستم نگهداری بولت دوجبهته یا دو سر درگیر را برای تقویت پایداری ستون میانی پیشنهاد نمودند [۱۶]. لین و همکاران از روش تفاضل محدود به منظور تحلیل پایداری یک تونل دوشاخه انتقال آب با سطح مقطع بزرگ و نامتقارن استفاده کردند و سیستم نگهداری پیرامون تونل دوشاخه را بر مبنای روش تحلیلی غیرخطی طراحی کردند [۱۷]. گلشنی و همکاران با استفاده از روش المان محدود تحلیل پایداری تونل متقاطع بزرگراه حکیم تهران را بررسی کردند و بر اساس نتایج حاصل ایجاد انشعاب در این تونل باعث افزایش ۲۹ درصدی نشست سطح زمین شده است [۱۸]. لی و همکاران با استفاده از روش المان محدود، تغییرشکل‌ها، ناحیه پلاستیک و تنش‌های القایی اطراف یک تونل متقاطع در محیط شهری را مطالعه کردند و بر اساس نتایج آن جابه‌جایی سقف در محل تقاطع ۲۸ درصد افزایش را نسبت به مقطع تونل نشان می‌دهد. همچنین با افزایش فاصله از محل تقاطع، جابه‌جایی سقف به طور پیوسته کاهش می‌یابد. از طرف دیگر شکست‌های ناشی

می‌شوند، نقش حیاتی در اجرای عملیات استخراج معادن زغال سنگ دارند [۲]. از طرف دیگر بر اساس طرح معدن و نوع کاربری سازه زیرزمینی، در بسیاری از موارد احداث تقاطع به دلیل مسائل فنی و عملیاتی، بهینه‌سازی مسیرها، دسترسی بهتر به منابع معدنی و کاهش هزینه‌های اجرایی اجتناب‌ناپذیر است [۳]. تونل‌های متقاطع در معدن زغال سنگ علاوه بر افزایش کارایی عملیات استخراج معدن، سبب کاهش حجم ترافیک، بهبود جریان انتقال مواد معدنی، بهبود عملکرد سیستم تهویه و افزایش ایمنی کارکنان معدن می‌شوند. بنابراین اطمینان از پایداری تقاطع‌ها در سازه‌های زیرزمینی بسیار مهم است زیرا آن‌ها نقش به‌سزایی در اجرای موفق چرخه عملیات استخراج معدن دارند [۴]. هنگامی که یک تقاطع در سازه‌های زیرزمینی ایجاد می‌شود، برهم‌کنش تنش‌های القایی ناشی از حفاری تونل‌های متقاطع، باعث برهم‌نهی تمرکز تنش‌های القایی در محل تقاطع شده که توزیع تنش‌های القایی در مقایسه با مقطع یک تونل منفرد پیچیده‌تر می‌شود [۵]. این موضوع با توجه به هندسه متفاوت هر کدام از تونل‌ها، موجب تغییرشکل‌های بیش از حد مجاز می‌شود و در صورت عدم کنترل به موقع منجر به ناپایداری سازه خواهد شد [۶].

بررسی سوابق تحقیق نشان می‌دهد که روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی مختلفی برای تحلیل پایداری و برآورد تغییرشکل‌ها در توده سنگ پیرامون تونل‌ها ارائه شده است [۷]. روش‌های تجربی اثر برهم‌کنش بین دو تونل متقاطع را در نظر نمی‌گیرند و تنها توصیه‌هایی پیرامون کاهش امتیاز توده سنگ یا تقویت موضعی سیستم نگهداری ارائه می‌کنند؛ درحالی که رفتار تونل‌های متقاطع تحت تأثیر عوامل گوناگونی از جمله هندسه تونل‌ها، زاویه تقاطع، شرایط زمین‌شناسی و گام‌های حفاری است [۸]. از طرف دیگر یافتن یک راه‌حل تحلیلی جامع برای بررسی توزیع تنش‌های پیرامون تقاطع‌های زیرزمینی با توجه به شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی و نیز هندسه نامنظم و پیچیده در محل تقاطع غیرممکن است [۹]. بنابراین در حال حاضر روش‌های عددی مناسب‌ترین راه حل برای شبیه‌سازی دقیق‌تر جابه‌جایی‌ها و تنش‌های القایی اطراف سازه‌های زیرزمینی می‌باشند [۱۰]. تاکنون پژوهش‌های مختلفی درباره تحلیل پایداری و برآورد تغییرشکل‌های پیرامون تونل‌های دوشاخه انجام شده

تقاطع، به تدریج افزایش می‌یابد [۲۷]. ژو و همکاران به منظور جلوگیری از ناپایداری و وقوع تغییر شکل‌های زیاد در محل تقاطع دوشاخه معدن زغال‌سنگ، کابل‌هایی با پیش‌تنیدگی زیاد و مقاومت ثابت را به عنوان سیستم نگهداری اصلی پیشنهاد کردند [۲۸]. سان و همکاران با تحلیل پایداری یک تقاطع Y-شکل به روش تفاضل محدود نشان دادند که با افزایش زاویه تقاطع، جابه‌جایی عمودی سقف در محل تقاطع کاهش می‌یابد. همچنین افزایش زاویه تقاطع باعث کاهش شعاع ناحیه پلاستیک می‌شود. آن‌ها در ادامه به منظور کنترل پایداری سازه در محل تقاطع، برای اولین بار کابل انکر با نسبت پواسون منفی^۱ را به عنوان سیستم نگهداری اصلی معرفی کردند. [۲۹]. سیاد و همکاران به منظور بررسی تأثیر حفاری تونل انشعاب عمود بر لایه بر تونل اصلی، از مدل‌سازی المان محدود استفاده کردند. در نتایج این تحقیق مشخص شد که با حفاری تونل انشعاب، نشست سطح زمین حدود ۶۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین گسترش ناحیه پلاستیک در دیواره‌های محل تقاطع نسبت به مقطع معمولی تونل بیشتر می‌شود [۳۰]. مطالعه پاسخ لرزه‌ای و مکانیزم شکست تونل‌های دوشاخه نشان می‌دهد که با افزایش شدت زمین‌لرزه، دیواره میانی آسیب‌پذیرترین بخش سازه نسبت به نقاط دیگر تونل می‌باشد [۳۱].

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که در اکثر پژوهش‌ها سطح مقطع تونل‌ها هندسه ساده و یا دایروی داشته‌اند؛ در حالی که در تحقیق حاضر سطح مقطع تونل‌ها به ویژه در محل تقاطع، هندسه پیچیده‌ای دارند. این تقاطع در اثر برخورد تونل شیب‌دار شماره دو^۲ (S2) با تونل دسترسی به گالری شماره پنج^۳ (MG5) معدن زغال‌سنگ پروده طبس ایجاد شده است. از طرف دیگر هر دو تونل این معدن شیب‌دار بوده (۱۵ و ۶ درجه) و شیب آنها نسبت به لایه‌بندی توده‌سنگ نیز متفاوت می‌باشد؛ به طوری که جبهه‌کار تونل در مقاطع مختلف لایه‌بندی متفاوتی دارد. در چنین شرایطی سیستم نگهداری فولادی از نوع قاب IPB پیشنهاد می‌شود که مدلسازی چنین شرایطی فقط با روش‌های عددی امکان‌پذیر است. بنابراین به منظور تحلیل پایداری توده‌سنگ پیرامون دوشاخه، از روش تفاضل محدود در محیط نرم‌افزار

از تنش‌های القایی کششی و فشاری در آستر تونل و در فاصله ۵ متری از مرکز تقاطع رخ خواهد داد [۱۹]. قارونی نیک و فرمهینی فراهانی پایداری تونل متقاطع Y-شکل پنستاک را با استفاده از روش تفاضل محدود بررسی کردند که بر اساس آن بیشترین جابه‌جایی و تنش القایی در مرکز تقاطع مشاهده شد [۲۰]. لیو و همکاران با بررسی تأثیر حفاری تونل دسترسی بر میزان جابه‌جایی‌های تونل اصلی، نشان دادند که طول ناحیه تأثیر در تونل اصلی به اندازه ۱/۵ برابر قطر تونل دسترسی گسترش خواهد یافت [۲۱]. ژو و همکاران با هدف بررسی تأثیر پارامترهای توده‌سنگ و سیستم نگهداری در میزان جابه‌جایی‌ها و ناحیه اغتشاش توده‌سنگ، از روش عددی المان مجزا برای تحلیل پایداری تقاطع‌های دوشاخه استفاده کردند [۲۲]. تان و همکاران برای تحلیل پایداری یک تونل دوشاخه بزرگراهی با هدف درک رفتار توده‌سنگ و سیستم نگهداری در مراحل مختلف حفاری از روش المان محدود استفاده کردند [۲۳]. کورتیس و کاوآداس با استفاده از روش المان محدود، تأثیر ساخت تونل انشعاب، بر روی یک تونل را با بررسی تأثیر پارامترهایی مانند قطر تونل انشعاب، عمق تقاطع، نسبت تنش‌های افقی به قائم، مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ بر روی نیروهای محوری القایی در محل تقاطع مطالعه کردند [۲۴]. مدل‌سازی تأثیر حفاری تونل انشعاب بر پایداری تونل اصلی نشان می‌دهد که پس از حفاری تونل انشعاب، سیستم نگهداری بتنی در تاج تونل اصلی به علت نیروهای کششی قابل توجه دچار ترک خوردگی می‌شود؛ در حالی که دیواره‌های تونل اصلی در محدوده تقاطع تحت تأثیر نیروهای فشاری قرار دارند [۲۵]. ژو و همکاران پایداری یک تقاطع با سطح مقطع بزرگ در معدن زغال‌سنگ را با استفاده از مشاهدات میدانی، مطالعه درون گمانه‌ای و مدل‌سازی تفاضل محدود بررسی کردند که بر اساس آن تمرکز تنش القایی در محل تقاطع بیش‌تر از نقاط دیگر تونل است. همچنین ناحیه پلاستیک در محل تقاطع توزیع نامتقارنی دارد [۲۶]. تان و همکاران با تحلیل پایداری تقاطع‌ها در یک معدن زغال‌سنگ عمیق به روش تفاضل محدود نشان دادند که تمرکز تنش‌های القایی، تغییرشکل‌ها و شکست در محل تقاطع دوشاخه شدیدتر از مقاطع دیگر است و با کاهش زاویه

³ Main Gate 5 access (MG5)

¹ Negative Poisson's Ratio

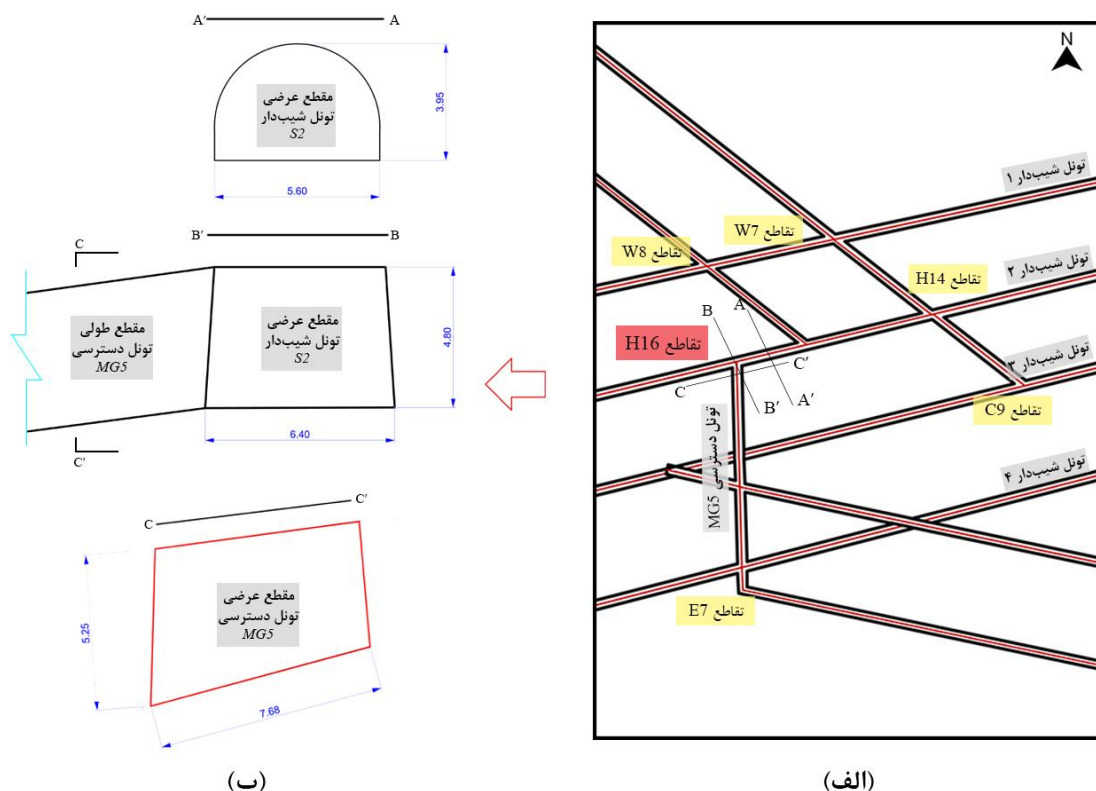
² Slope 2 (S2)

سنگ آهک و گل‌سنگ تشکیل شده است. لایه‌های اصلی زغال‌سنگ در محدوده ۵۰ متری از لایه‌های میانی قرار گرفته است که در حال حاضر لایه *CI* از لحاظ ضخامت و پایداری مهم‌ترین لایه زغال‌سنگ این منطقه به شمار می‌رود [۲]. همانطور که در شکل ۱-الف مشخص شده است، تقاطع دوشاخه *H16* از اتصال تونل شیب‌دار *S2* و تونل دسترسی *MG5* ایجاد می‌شود که در عمق ۵۷۰ متری از سطح زمین در معدن زغال‌سنگ پروده طبس واقع شده است. سطح مقطع تونل *S2* یک مقطع *D*-شکل می‌باشد که در محل تقاطع دوشاخه، با تعریض از طرفین به یک مقطع دوزنقه-شکل (شکل ۱-ب) تغییر می‌کند. سپس با حفاری یک مقطع دوزنقه-شکل نامتقارن از سمت چپ دیواره تونل *S2*، حفاری تونل دسترسی *MG5* تحت زاویه ۷۸ درجه انجام می‌شود. زاویه شیب تونل شیب‌دار *S2* و تونل دسترسی *MG5* نسبت به خط افق، به ترتیب حدود ۱۵ و ۶ درجه است. خواص ژئومکانیکی لایه‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه نیز در جدول ۱ خلاصه شده است.

FLAC3D استفاده شده است و پایداری سیستم نگهداری و میزان تغییرشکل‌ها در مقاطع مختلف بررسی شده است.

۲- معدن زغال‌سنگ پروده طبس

معدن زغال‌سنگ پروده طبس که در ۸۵ کیلومتری جنوب شهر طبس در استان خراسان جنوبی واقع شده است، در سال ۱۳۸۶ به عنوان اولین معدن مکانیزه ایران به بهره‌برداری رسید. معدن طبس از نظر زمین‌شناسی در ناحیه زغال‌سنگ پروده قرار دارد که در قسمت مرکزی یک تاقدیس نامتقارن در مساحت ۱۲۰۰ کیلومترمربع واقع شده است [۳۲]. از نظر ساختمان زمین‌شناسی، مرز شمالی معدن به گسل چشمه رستم محدود می‌شود که یک گسل معکوس با جابه‌جایی حدود ۷۰۰ متر است. سازندهای سنگی در مجاورت گسل چشمه رستم به دلیل چین‌خوردگی و ریزگسل‌های متعدد، دچار تغییرشکل‌های شدیدی شده است [۳۲]. لایه‌های سنگی ناحیه زغال‌سنگ طبس به صورت عمده از توالی لای سنگ (سیلت‌استون)، ماسه‌سنگ و به صورت مقطعی از



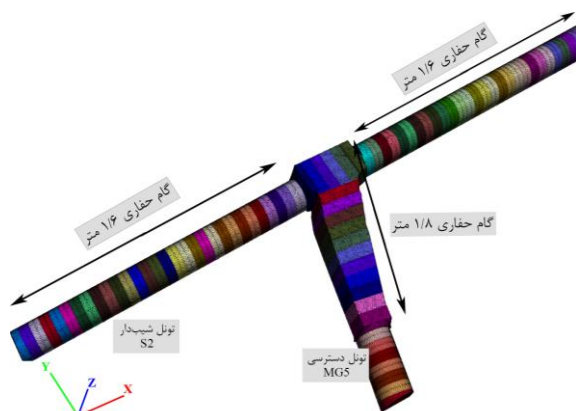
شکل ۱- الف) موقعیت سه‌بعدی تقاطع دوشاخه *H16* و ب) مقاطع عرضی و طولی تونل‌ها در محل تقاطع

جدول ۱ - خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه [۳۳]

واحد سنگی	چگالی (kg / m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	نسبت پواسون
لای سنگ	۲۴۰۰	۱/۲۶۸	۰/۷۲	۱۸/۲۳	۰/۲۸
لای سنگ ماسه‌ای	۲۶۰۰	۲/۱۶۷	۱/۲۱	۲۷/۰۵	۰/۲۸
ماسه سنگ	۲۷۰۰	۱/۱۶۴	۱/۲۱	۲۷/۰۳	۰/۲۸
زغال سنگ	۱۶۰۰	۰/۶۲۱	۰/۴۲	۱۱/۸۴	۰/۳۲

ناشی از وزن لایه‌های روباره به صورت فشار قائم به مرز بالایی مدل اعمال شده است و نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر ۱/۱۵ در نظر گرفته شده است که با توجه به آن، تنش‌های اولیه برجا به مدل اعمال می‌شود. همچنین برای شبیه‌سازی رفتار توده سنگ پیرامون تونل، از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. پس از اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه، تعادل نیروهای نامتعادل کننده بررسی شد و سپس جابه‌جایی و سرعت در نقاط گرهی بازنشانی شد. در ادامه به میزان یک گام، حفاری در مدل انجام شد و سیستم‌های نگهداری بلافاصله پس از حفاری مدل با استفاده از المان‌های ساختاری اختصاص داده شده در نرم‌افزار، مدل‌سازی می‌شود.

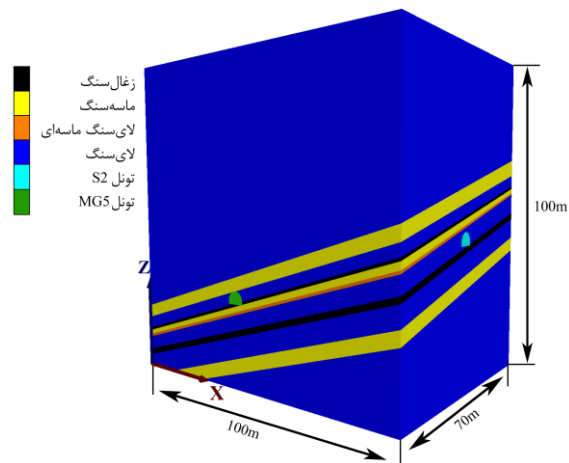
همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی در معدن زغال‌سنگ پروده طبس، مدل عددی با در نظر گرفتن گام‌های حفاری ۱/۶ متر در تونل S2 و ۱/۸ متر در تونل MG5 و محل تقاطع، ساخته شده است. ترتیب حفاری نیز در محل تقاطع H16 به صورت حفاری تونل S2 تا انتها و سپس حفاری تونل دسترسی MG5 می‌باشد.



شکل ۳ - نمای سه بعدی و مراحل حفاری تونل S2 و MG5

۳- مدل‌سازی

در این تحقیق به منظور ساخت هندسه مدل از محیط نرم‌افزار Rhinoceros7 استفاده شده است و در ادامه با استفاده از افزونه Griddle، مش‌بندی مدل انجام شد. سپس به منظور شبیه‌سازی عددی، به محیط نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D انتقال داده شده است. برای اینکه شرایط مدل‌سازی به شرایط واقعی نزدیک باشد، ابعاد مدل به گونه‌ای انتخاب شده است که شرایط مرزی کمترین تأثیر را بر رفتار کلی مدل داشته باشند؛ بنابراین ابعاد مدل در جهت‌های X، Y و Z به ترتیب برابر ۱۰۰، ۷۰ و ۱۰۰ متر تعیین شده است (شکل ۲).



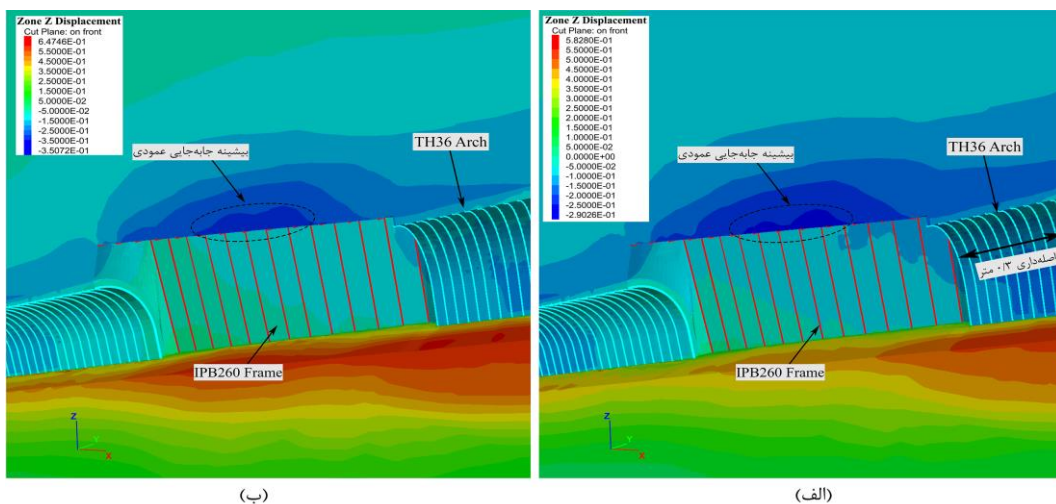
شکل ۲ - هندسه مدل عددی در نرم‌افزار FLAC3D

برای اعمال شرایط مرزی، مرزهای جانبی مدل عددی نسبت به جابه‌جایی‌های افقی، و کف مدل نسبت به جابه‌جایی‌های افقی و قائم ثابت شده است. همچنین تأثیر آب‌های زیرزمینی در تحلیل عددی در نظر گرفته نشده و تنها تنش‌های برجا به‌عنوان شرایط اولیه لحاظ شده است. تنش

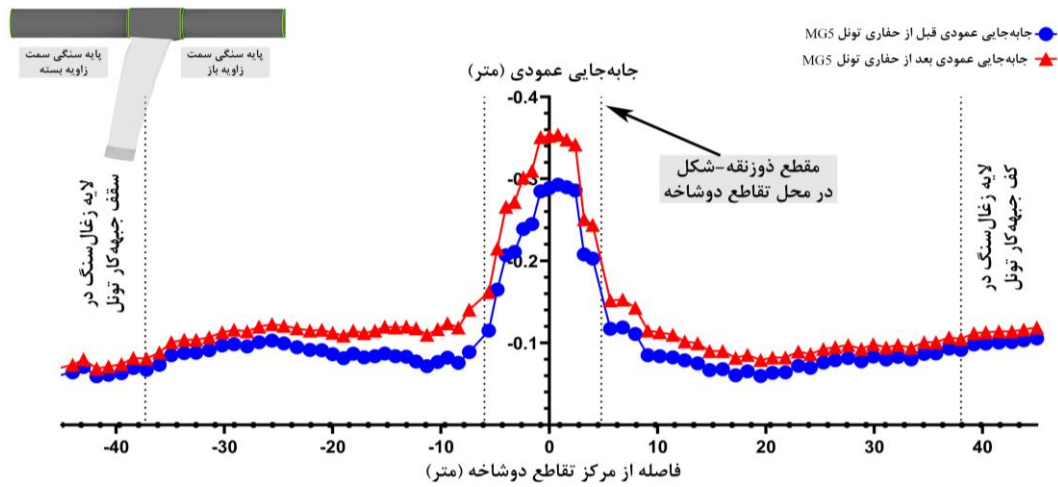
۴- تحلیل پایداری

به منظور تحلیل پایداری محل تقاطع تونل‌های S2 و MG5 سیستم نگهداری تونل شیب‌دار S2 به صورت پیچ‌سنگ‌های تمام تزریقی با آرایش شعاعی به طول ۲/۴ متر و قاب‌های فولادی کشویی TH36 با فاصله‌داری ۶۰۰ میلی‌متر تعریف شده است. سیستم نگهداری تونل دسترسی MG5 و مقطع دوزنقه-شکل محل تقاطع نیز از پیچ‌سنگ‌های ۳ و ۲/۷ متری به ترتیب در سقف و دیواره و همینطور فریم‌های فولادی متشکل از تیرهای IPB260 و IPB320 استفاده شده است. پس از اجرای مدل، جابه‌جایی‌های عمودی در محل تقاطع قبل و پس از حفاری تونل MG5 در شکل ۴ ارائه شده است. نمودار جابه‌جایی‌های عمودی نیز در سقف تونل S2 با در نظر گرفتن موقعیت آنها نسبت به تقاطع در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشینه جابه‌جایی عمودی سقف در مقطع دوزنقه-شکل تونل S2 قبل از حفاری تونل MG5 حدود ۲۹/۳ سانتی‌متر است که با افزایش فاصله از مرکز تقاطع به تدریج کاهش می‌یابد. پس از حفاری تونل MG5، بیشینه جابه‌جایی عمودی در مقطع دوزنقه-شکل با افزایش ۶/۱ سانتی‌متری به مقدار ۳۵/۴ سانتی‌متر می‌رسد که با افزایش فاصله از مرکز تقاطع روند کاهشی دارد. از طرف دیگر جابه‌جایی‌های عمودی تونل S2 قبل از حفاری تونل

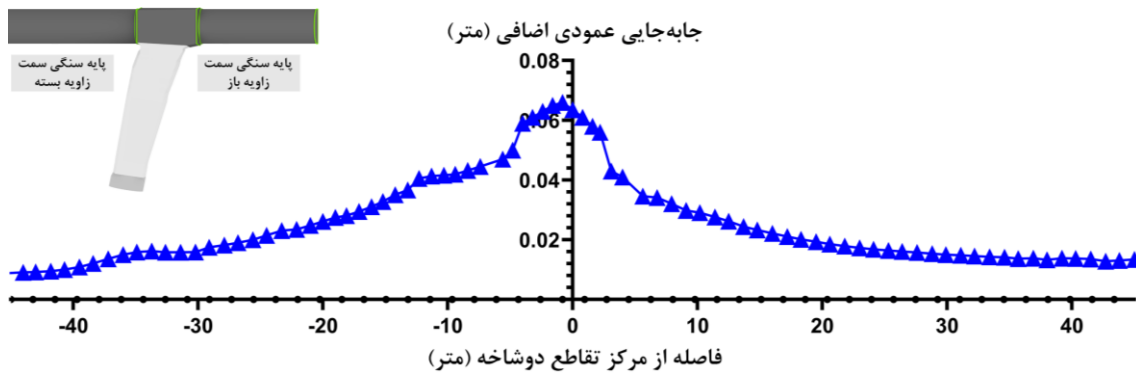
MG5 توزیع نسبتاً متقارنی نسبت به مرکز تقاطع در هر دو سمت پایه سنگی دارد؛ اما پس از حفاری تونل MG5، جابه‌جایی عمودی سقف در تونل S2 و در سمت پایه سنگی با زاویه بسته نسبت به مقطع مشابه در سمت زاویه باز افزایش بیشتری دارد. در شکل ۶ نمودار این جابه‌جایی عمودی اضافی در سقف تونل S2 در اثر حفاری تونل MG5 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تونل S2 در سمت پایه سنگی زاویه بسته تأثیر بیشتری از حفاری تونل MG5 می‌پذیرد؛ به طوری که طول ناحیه با جابه‌جایی اضافی بیشتر، در سمت زاویه بسته بیشتر از مقدار مشابه در سمت زاویه باز است. همچنین بیشترین مقدار جابه‌جایی اضافی سقف در محل دوزنقه-شکل و مرکز تقاطع اتفاق افتاده است. بررسی نتایج جابه‌جایی‌های افقی در دیواره‌های سمت راست و سمت چپ تونل S2 نشان می‌دهد که در محدوده پیرامون تقاطع، جابه‌جایی افقی در دیواره سمت چپ بسیار بیشتر از مقدار متناظر در دیواره سمت راست است (شکل ۷)؛ در حالی که با افزایش فاصله از محل تقاطع، جابه‌جایی‌های افقی اضافی در دیواره سمت راست بیشتر از دیواره سمت چپ است. نمودار جابه‌جایی عمودی سقف در تونل MG5 نیز در شکل ۸ حاکی از کاهش جابه‌جایی‌ها با افزایش فاصله از محل تقاطع است؛ به طوری که در فاصله حدود ۱۰ متری از محل تقاطع، جابه‌جایی عمودی حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.



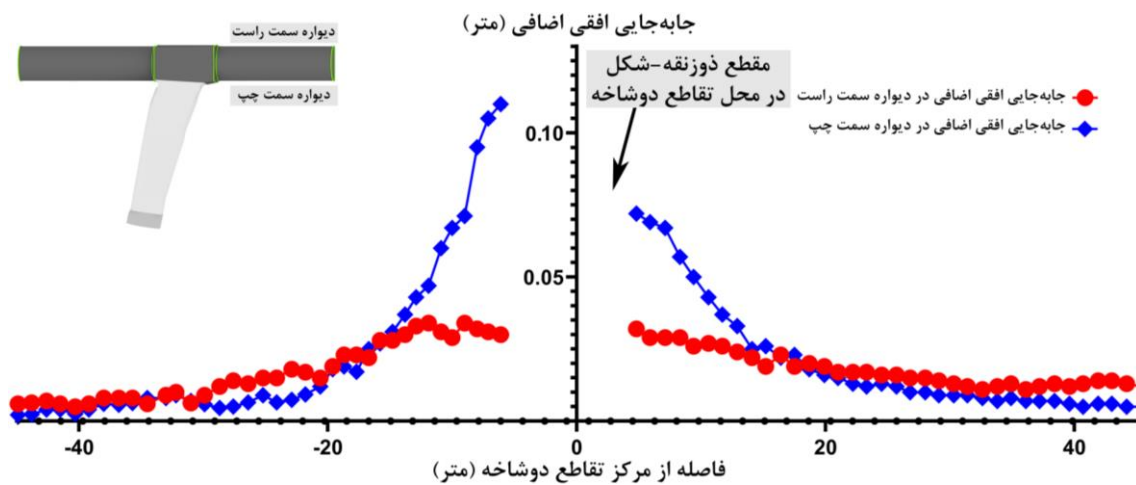
شکل ۴ - جابه‌جایی عمودی تقاطع دوشاخه در تونل S2 (الف) قبل از حفاری تونل MG5 (ب) پس از حفاری تونل MG5



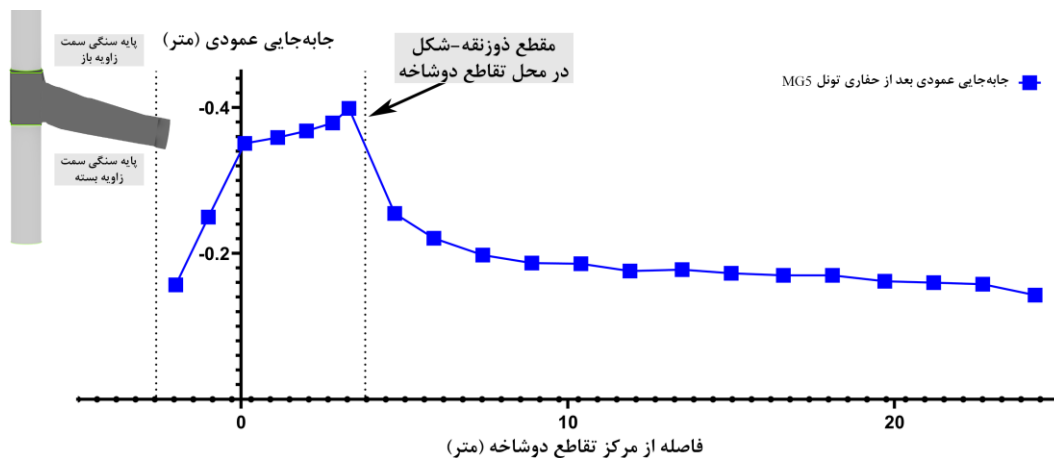
شکل ۵- نمودار جا به جایی‌های عمودی تونل S2 قبل و پس از حفاری تونل MG5



شکل ۶- جا به جایی عمودی اضافی سقف پس از حفاری تونل S2



شکل ۷- نمودار جا به جایی‌های افقی اضافی تونل S2 قبل و پس از حفاری تونل MG5



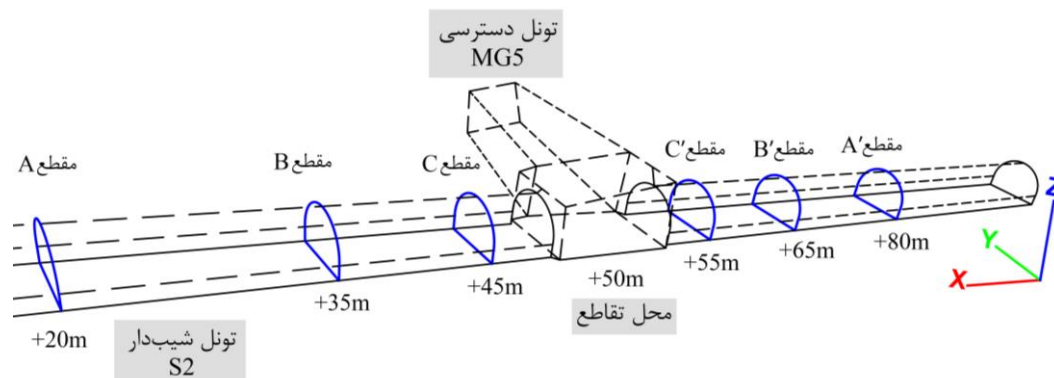
شکل ۸ - نمودار جابه‌جایی‌های عمودی های تونل MG5

جابه‌جایی به صورت متقارن به اندازه ۲۷ سانتی‌متر، در فاصله یک‌متری از کف تونل ۱۴ سانتی‌متر، در شانه سمت چپ تونل ۱۱ سانتی‌متر و در تاج تونل حدود ۹ سانتی‌متر است. به‌طور کلی می‌توان گفت که جابه‌جایی‌های شدید در قسمت پاشنه مقطع A متأثر از وجود لایه ضعیف زغال‌سنگ CI می‌باشد. همچنین پس از حفاری تونل $MG5$ ، میزان جابه‌جایی‌ها در هر دو مقطع A و A' به میزان یک تا دو سانتی‌متر افزایش می‌یابد که با رنگ آبی مشخص شده است.

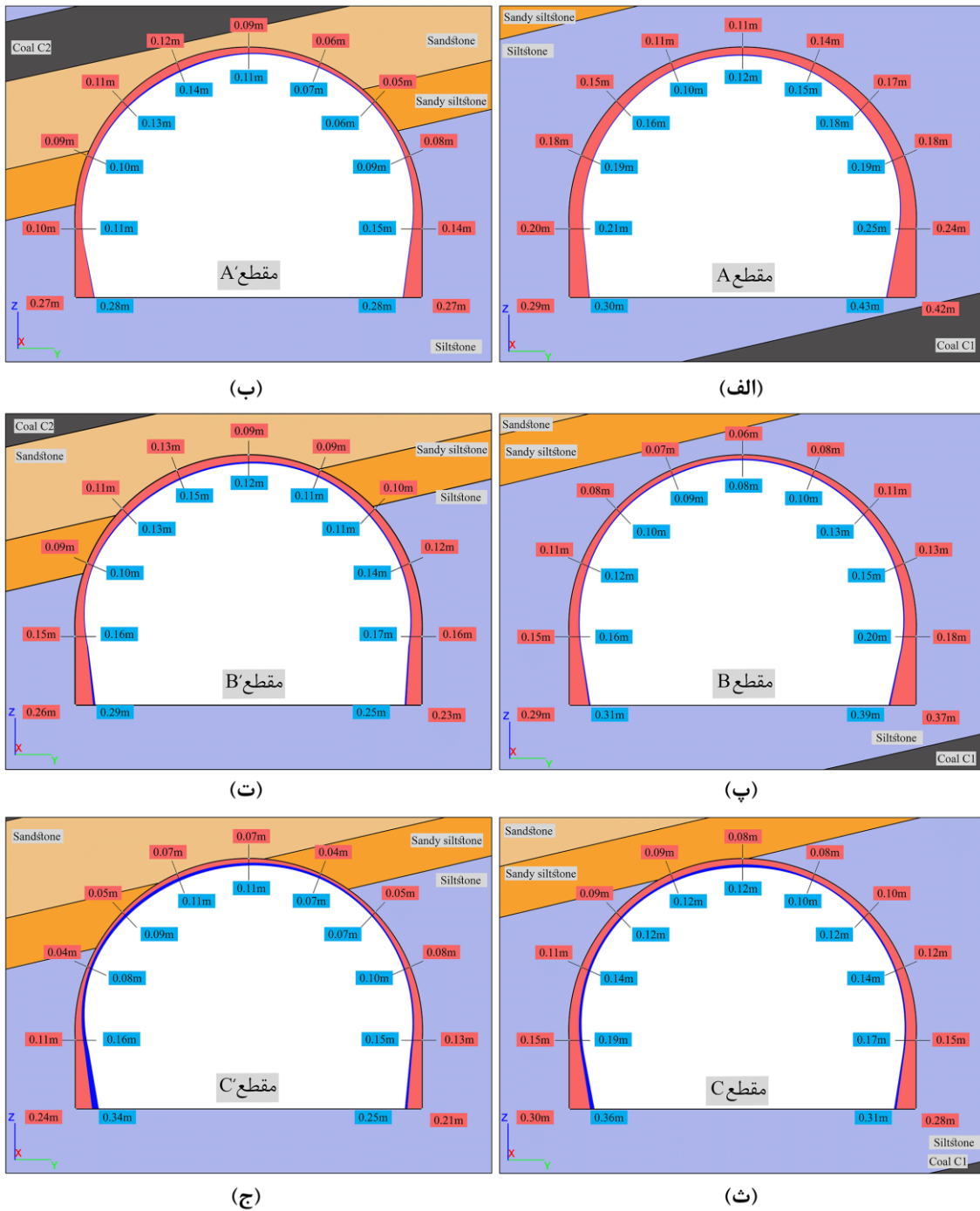
در مقطع B با فاصله ۱۵ متری از محل تقاطع (شکل ۱۰-پ و ت)، مشخص می‌شود که مانند مقطع قبل پایداری سیستم نگهداری قبل از حفاری تونل $MG5$ به صورت نامتقارن بوده و بیشترین جابه‌جایی در قسمت پاشنه سمت راست تونل ۳۷ سانتی‌متر، در فاصله یک متر بالاتر از کف تونل ۱۸ سانتی‌متر، در قسمت شانه سمت راست تونل ۱۱ سانتی‌متر و در تاج تونل ۶ سانتی‌متر است.

به منظور بررسی پایداری سیستم نگهداری در تونل $S2$ ، نقاط نشانه در مقاطع مختلف و با فاصله‌های مشخص از محل تقاطع در شکل ۹ مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، سه مقطع A ، B و C به ترتیب با فاصله ۳۰، ۱۵ و ۵ متر از محل تقاطع در سمت زاویه باز (قبل از تقاطع) و مقاطع A' ، B' و C' با فاصله به ترتیب ۳۰، ۱۵ و ۵ متر در سمت زاویه بسته (بعد از تقاطع) در نظر گرفته شده است.

با در نظر گرفتن مقطع A در فاصله ۳۰ متری از محل تقاطع (شکل ۱۰-الف و ب)، مشخص می‌شود که پایداری سیستم نگهداری قبل از حفاری تونل $MG5$ به صورت نامتقارن است؛ به طوری که بیشترین میزان جابه‌جایی در پاشنه سمت راست مقطع حدود ۴۲ سانتی‌متر، در ارتفاع یک‌متری از کف تونل ۲۴ سانتی‌متر، در قسمت شانه تونل ۱۷ سانتی‌متر و در تاج تونل ۱۱ سانتی‌متر می‌باشد. در حالی که در مقطع A' ، در قسمت پاشنه تونل بیشترین میزان



شکل ۹ - موقعیت مقاطع عرضی در فواصل مختلف از تقاطع قبل و بعد از حفاری تونل MG5



شکل ۱۰- پایداری سیستم نگهداری در مقاطع مختلف تونل S2 قبل و بعد از حفاری تونل MG5

حفاری تونل MG5، میزان جابه‌جایی‌ها در مقطع B به یک تا دو سانتی‌متر و در مقطع B' تا سه سانتی‌متر افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن مقطع C در فاصله ۵ متری از محل تقاطع (شکل ۱۰-ث و ج)، مشخص می‌شود که مانند مقاطع

در حالی که در مقطع B'، بیشترین جابه‌جایی در قسمت پاشنه تونل ۲۶ سانتی‌متر، در فاصله یک متر بالاتر از کف تونل ۱۶ سانتی‌متر، در قسمت شانه سمت چپ تونل ۱۱ سانتی‌متر و در تاج تونل ۹ سانتی‌متر است. همچنین پس از

عمدتاً در سمت پایه سنگی زاویه بسته رخ می‌دهد. همچنین نتایج جابه‌جایی‌های عمودی نشان می‌دهد که تونل S2 در سمت پایه سنگی زاویه بسته تأثیر بیشتری از حفاری تونل MG5 می‌پذیرد و طول ناحیه متأثر از حفاری تونل MG5 در سمت زاویه بسته بیشتر است. جابه‌جایی‌های عمودی در تونل MG5 با افزایش فاصله از محل تقاطع با سرعت نسبتاً زیادی نسبت به تونل S2 کاهش می‌یابد؛ به طوری که در فاصله حدود ده متری از تقاطع، جابه‌جایی عمودی تقریباً ۵۰ درصد کاهش یافته و پس از آن شیب نمودار جابه‌جایی تقریباً ثابت می‌شود. بررسی نتایج جابه‌جایی در مقاطع مختلف با فواصل مشخص از تقاطع نشان می‌دهد که پس از حفاری تونل MG5 در محدوده تقاطع و به ویژه در سمت زاویه بسته جابه‌جایی اضافی در دیواره سمت چپ (پایه حائل زاویه بسته بین دو تونل) رخ می‌دهد. این در حالی است که در تونل MG5 با توجه به هندسه نامتقارن و عدم وجود سیستم نگهداری در کف تونل، جابه‌جایی‌ها از این قانون تبعیت نکرده و دیواره سمت زاویه باز جابه‌جایی اضافی بیشتری را نشان می‌دهد.

۶- سپاس‌گزاری

از مدیریت و پرسنل محترم معدن زغال‌سنگ پرونده برای همکاری در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

قبل پایداری سیستم نگهداری قبل از حفاری تونل MG5 به صورت نامتقارن بوده و بیشترین جابه‌جایی در قسمت پاشنه سمت چپ تونل ۳۰ سانتی‌متر، در فاصله یک متر بالاتر از کف تونل ۱۵ سانتی‌متر، در قسمت شانه سمت راست تونل ۱۰ سانتی‌متر و در تاج تونل ۸ سانتی‌متر است. در حالی که در مقطع C، بیشترین جابه‌جایی در قسمت پاشنه سمت چپ تونل ۲۴ سانتی‌متر، در فاصله یک متر بالاتر از کف تونل ۱۳ سانتی‌متر، در قسمت شانه تونل به صورت متقارن به اندازه ۵ سانتی‌متر و در تاج تونل ۷ سانتی‌متر است. همچنین پس از حفاری تونل MG5، میزان جابه‌جایی‌ها در مقطع C به میزان دو تا شش سانتی‌متر و در مقطع C' به میزان دو تا ده سانتی‌متر افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی عددی تفاضل محدود در محیط نرم‌افزار FLAC3D تحلیل پایداری تقاطع دوشاخه H16 در معدن زغال‌سنگ پرونده طبس انجام شده است. نتایج این تحقیق به شرح ذیل خلاصه شده است:

جابه‌جایی‌های عمودی در سقف تونل S2 قبل و بعد از حفاری تونل MG5 تغییرات قابل‌توجهی دارد. بیشینه جابه‌جایی عمودی سقف تونل S2 قبل از حفاری تونل MG5، ۲۹/۳ سانتی‌متر است، ولی پس از حفاری تونل MG5 به ۳۵/۴ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. به‌طور کلی افزایش جابه‌جایی‌ها

منبع‌ها

- [1] <https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels/coal>.
- [2] Mahdevari, S., & Khodabakhshi, M. B. (2021). A hierarchical local-model tree for predicting roof displacement in longwall tailgates. *Neural Computing and Applications*. doi: 10.1007/s00521-021-06127-y
- [3] Ren, Y., Zhou, S., Jia, J., Yuan, Q., Zhou, Z., Liu, M., & He, H. (2023). Construction stability analysis of intersection tunnel in city under CRD method. *Frontiers in Earth Science*, 11. doi: 10.3389/feart.2023.1264140
- [4] Gerçek, H. (1986). Stability considerations for underground excavation intersections. *Mining Science and Technology*, 4(1), 49–57. doi: 10.1016/S0167-9031(86)90194-5
- [5] Zhou, P. Y., Wang, J. B., Song, Z. P., Cao, Z. L., & Pei, Z. M. (2022). Construction Method Optimization for Transfer Section Between Cross Passage and Main Tunnel of Metro Station. *Frontiers in Earth Science*, 10. doi: 10.3389/feart.2022.770888
- [6] Bian, K., Liu, J., Xiao, M., & Liu, Z. (2016). Cause investigation and verification of lining cracking of bifurcation tunnel at Huizhou Pumped Storage Power Station. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 54, 123–134. doi: 10.1016/j.tust.2015.10.030
- [7] Kumar, P., & Kumar Shrivastava, A. (2022). Experimental and numerical analysis of deformation behaviour of tunnels under static loading conditions. *Sustainable Energy Technologies and*

- Assessments*, 52, 102057. doi: 10.1016/j.seta.2022.102057
- [8] Hsiao, F.-Y., Yu, C.-W., & Chern, J.-C. (2005). Modeling the behaviors of the tunnel intersection areas adjacent to the ventilation shafts in the Hsuehshan tunnel. *World Long Tunnel*, 81–90.
- [9] Chen, C. N., & Tseng, C. T. (2010). 2D tunneling chart from redistributed 3D principal stress path. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 305–314. doi: 10.1016/j.tust.2010.01.003
- [10] Spyridis, P., & Bergmeister, K. (2015). Analysis of lateral openings in tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 376–395. doi: 10.1016/j.tust.2015.08.005
- [11] Singh, R. N., Porter, I., & Hematian, J. (2001). Finite element analysis of three-way roadway junctions in longwall mining. *International Journal of Coal Geology*, 45(2–3), 115–125. doi: 10.1016/S0166-5162(00)00027-6
- [12] Liu, H., Small, J., & Carter, J. (2008). Effects of Tunnelling on Existing Support Systems of Intersecting Tunnels in the Sydney Region. *Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium*, 113–126. doi: 10.36487/ACG_repo/808_150
- [13] Hsiao, F. Y., Wang, C. L., & Chern, J. C. (2009). Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1), 14–21. doi: 10.1016/j.tust.2008.01.003
- [14] Liu, X., & Wang, Y. (2010). Three dimensional numerical analysis of underground bifurcated tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(4), 447–455. doi: 10.1007/s10706-010-9304-x
- [15] Guo, Z., Shi, J., Wang, J., Cai, F., & Wang, F. (2010). Double-directional control bolt support technology and engineering application at large span Y-type intersections in deep coal mines. *Mining Science and Technology*, 20(2), 254–259. doi: 10.1016/S1674-5264(09)60193-9
- [16] Li, G., He, M., Zhang, G., & Tao, Z. (2010). Deformation mechanism and excavation process of large span intersection within deep soft rock roadway. *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 28–34. doi: 10.1016/S1674-5264(09)60156-3
- [17] Lin, P., Zhou, Y., Liu, H., & Wang, C. (2013). Reinforcement design and stability analysis for large-span tailrace bifurcated tunnels with irregular geometry. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 189–204. doi: 10.1016/J.TUST.2013.07.011
- [18] Golshani, A., Joneidi, M., & Majidian, S. (2015). 3D numerical modeling for construction of tunnels intersections-case study of Hakim tunnel. *15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability*, 2(43), 1523–1527. doi: 10.3208/jgssp.IRN-15
- [19] Li, Y., Jin, X., Lv, Z., Dong, J., & Guo, J. (2016). Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 22–33. doi: 10.1016/j.tust.2016.02.016
- [20] Gharouni Nik, M., & Farmahini Farahani, A. (2016). Assessment the Stability of Tunnels in Y Shaped Intersections with Regard to the Intersection Angles, Case Study: Penstock Tunnels of Rudbar Dam. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(2), 191–198. doi: 10.22060/ceej.2016.655
- [21] Liu, H. liang, Li, S. cai, Li, L. ping, & Zhang, Q. qing. (2017). Study on deformation behavior at intersection of adit and major tunnel in railway. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2459–2466. doi: 10.1007/s12205-017-2128-y
- [22] Zhou, D., Ding, W., Xie, D., & Chen, S. (2020). Reinforcement Analysis of Bifurcated Highway Tunnels with Large Section of Different Surrounding Rock Grades in Tiger Leaping Gorge. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 741(1), 012015. doi: 10.1088/1757-899X/741/1/012015
- [23] Tan, Z., Zhou, Z., Kong, H., Zhao, B., & Zhao, J. (2021). Single excavation face method for super-large-span bifurcated tunnels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 174(4), 406–418. doi: 10.1680/jgeen.20.00222
- [24] Chortis, F., & Kavvasdas, M. (2021). Three-Dimensional Numerical Analyses of Perpendicular Tunnel Intersections. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1771–1793. doi: 10.1007/s10706-020-01587-w
- [25] Gkikas, V. I., & Nomikos, P. P. (2021). Primary Support Design for Sequentially Excavated Tunnel Junctions in Strain-Softening Hoek–Brown Rock Mass. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1997–2018. doi: 10.1007/s10706-020-01602-0

- [26] Xie, S., Wu, Y., Chen, D., Liu, R., Han, X., & Ye, Q. (2022). Failure analysis and control technology of intersections of large-scale variable cross-section roadways in deep soft rock. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1), 19. doi: 10.1007/s40789-022-00479-z
- [27] Tan, Y., Wang, H., Fan, D., Liu, X., & Wang, X. (2022). Stability analysis and determination of large-section multi-chamber group in deep coal mine. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8(1), 14. doi: 10.1007/s40948-021-00312-y
- [28] Xu, H., Zhang, Y., Yang, J., Li, J., Sun, X., & Xie, C. (2022). Study on the Constant Resistance Coupling Support Technology for Rock Column at the Intersection Point of Deep Soft Rock Large Section Roadway: A Case Study in China. *Shock and Vibration*, 2022, 1–12. doi: 10.1155/2022/1574530
- [29] Sun, X. ming, Qi, Z. min, Zhang, Y., Miao, C. yu, Zhao, C. wei, & He, M. chao. (2023). Failure mechanism and control countermeasures of surrounding rock at deep large section chamber intersection in the Wanfu Coal Mine. *Journal of Mountain Science*, 20(7), 2058–2075. doi: 10.1007/s11629-023-8004-y
- [30] Siad, I., Akchiche, M., & Spyridis, P. (2023). Numerical Simulation of the Effect of Cross Passage Excavation on Surface Settlement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(7), 4071–4082. doi: 10.1007/s10706-023-02508-3
- [31] Jiang, J., Tao, R., Hesham El Naggat, M., Liu, H., & Du, X. (2024). Seismic performance and vulnerability analysis for bifurcated tunnels in soft soil. *Computers and Geotechnics*, 167, 106065. doi: 10.1016/J.COMPGE0.2024.106065
- [32] IRITEC (2003) *Tabas Coal Mine Project, detailed design report* (Vol. 1).
- [33] David, Y. (2023). Engineering Report. In *Global Clinical Engineering Journal* (Vol. 5, Issue 3). doi: 10.31354/globalce.v5i3.154



Numerical Modeling of the Stability of Intersection Resulted from Slope Tunnel and Access Tunnel in Tabas Coal Mine

Alireza Tarakameh¹; Satar Mahdevari^{2*}; Kourosch Shahriar³

1- MSc, Tunnel and Underground Spaces Engineering, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran, ali.tarakameh@aut.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran, satar.mahdevari@aut.ac.ir

3- Professor, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran, k.shahriar@aut.ac.ir

Received: 21. April. 2023; Accepted: 23. August .2023
(Corresponding author: satar.mahdevari@aut.ac.ir)

Keywords

**Bifurcation intersection
Stability analysis
Numerical modeling
Finite difference method
Tabas coal mine**

Final English Extended Abstract

Summary

The depth of underground coal mines is increasing, and consequently ensuring the stability of underground spaces and the development networks will become more complex. These underground structures, which include tunnels, roadways, and ventilation and transportation galleries, play a vital role in mining operations. On the other hand, based on the mine design and the applicability of the underground structures, the construction of intersections is inevitable due to technical and operational issues, route optimization, better access to mineral resources, and reduction of operational costs. In addition to increasing the efficiency of mining operations, intersections in coal mines reduce traffic volume,

improve the flow of mineral transportation, improve the performance of the ventilation system, and increase the safety of mine workers. Therefore, ensuring the stability of intersections in underground structures is very important because they play a significant role in the successful implementation of the mining operation cycle.

Introduction

Due to the complexity of the tunnel network design in underground mines, these mines usually have multiple intersections, the stability of which is of great importance. When an intersection is created in underground structures, the interaction of induced stresses causes the superposition of stress concentrations at the intersection, which makes the distribution of induced stresses more complex than that of a single tunnel. Due to the different geometry of each tunnel, this causes deformations exceeding the allowable limits and, if not controlled in time, will lead to structural instability. In this research, the stability of one of the bifurcation intersections of the Tabas coal mine has been investigated.

Methodology and Approaches

In this regard, the displacements at the junction have been investigated using the finite difference numerical method in the FLAC3D software environment. The support system of the slope tunnel was defined as fully injected bolts with a radial arrangement of 2.4 m long and steel frames with a spacing of 600 mm. The support system of the access tunnel and the trapezoidal-shaped cross-section of the intersection were also defined by 3 and 2.7 m bolts in the roof and wall, respectively, as well as steel frames consisting of IPB260 and IPB320 beams.

Results and Conclusions

The obtained results showed that the maximum vertical displacement at the roof of slope tunnel is 29.3 cm before excavating the access tunnel, but it increases to 35.4 cm after excavating the access tunnel. The vertical displacement resulting from the intersection excavation in the slope tunnel mainly occurred on rock pillar in the closed angle side. Also, by increasing the distance from the intersection, displacements would decrease; so that the displacement reduction rate in the slope tunnel on the open angle side was higher than on the closed angle side.