

تحلیل پایداری تقاطع دوشاخه حاصل از حفاری تونل دسترسی شماره پنج و تونل شیب‌دار شماره دو در معدن زغال‌سنگ پروده طبس

مقاله پژوهشی

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

۱- کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ali.tarakameh@aut.ac.ir

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، satar.mahdevari@aut.ac.ir

۳- استاد؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، k.shahriar@aut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۰۷/۱۳؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

شماره صفحات: ۱۱۵ تا ۱۳۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2025.16187.1502

واژگان کلیدی	چکیده
تحلیل پایداری تونل تقاطع تونل دوشاخه ناحیه پلاستیک روش تفاضل محدود معدن زغال‌سنگ طبس	طراحی و اجرای تونل‌های متقاطع در شبکه آماده‌سازی معادن زیرزمینی اجتناب‌ناپذیر است. از طرف دیگر اطمینان از پایداری تقاطع‌ها در معادن زیرزمینی بسیار مهم است؛ به طوری که ایمنی و پایداری کل معدن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش، پایداری تقاطع دوشاخه حاصل از حفاری تونل دسترسی شماره پنج و تونل شیب‌دار شماره دو در معدن زغال‌سنگ پروده طبس بررسی شده است. به این منظور، جابه‌جایی‌های قائم و محدوده ناحیه پلاستیک اطراف محل تقاطع با استفاده از روش عددی تفاضل محدود تجزیه و تحلیل شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با حفاری تونل دسترسی، تونل شیب‌دار در سمت پایه سنگی با زاویه بسته تحت تنش‌های القایی بیشتری قرار می‌گیرد؛ به طوری که طول ناحیه با جابه‌جایی اضافی در پایه سنگی با زاویه بسته بیشتر از مقدار مشابه در پایه سنگی با زاویه باز است. از طرف دیگر بیشترین مقدار جابه‌جایی اضافی سقف در مقطع دوزنقه‌ای-شکل مرکز تقاطع اتفاق افتاده است. همچنین حفاری تونل دسترسی، باعث گسترش ناحیه پلاستیک در پیرامون تونل شیب‌دار می‌شود و با افزایش فاصله از محل تقاطع، کاهش می‌یابد؛ به طوری که در فاصله حدود ۲۵ متری از محل تقاطع دوشاخه، حفاری تونل دسترسی تأثیر چشم‌گیری در گسترش ناحیه پلاستیک پیرامون تونل شیب‌دار ندارد.

تجهیزات و جریان تهویه، نقشی تعیین‌کننده در بهینه‌سازی چرخه استخراج، کاهش افت انرژی، افزایش بهره‌وری سامانه حمل‌ونقل و افزایش اثربخشی سامانه‌های تهویه ایفا می‌کنند (Mahdevari & Khodabakhshi, 2021). در این میان، تقاطع‌های دوشاخه (Bifurcation tunnels) که در آن‌ها یک مسیر اصلی به دو مسیر فرعی منشعب می‌شود، از اجزای کلیدی شبکه‌های زیرزمینی محسوب می‌شوند و به

۱- مقدمه

در پی گسترش کارگاه‌های معدن شماره یک زغال‌سنگ پروده طبس و افزایش قابل توجه عمق این معدن، نیاز به احداث سازه‌های زیرزمینی، به‌ویژه تونل‌های تهویه و ترابری، در شبکه آماده‌سازی معدن به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. این راهروهای زیرزمینی که معمولاً دارای تقاطع و انشعاب هستند، با فراهم‌سازی مسیرهای کارآمد برای عبور

* تهران؛ میدان ولیعصر (عج)؛ خیابان حافظ؛ پلاک ۳۵۰؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)؛ دانشکده مهندسی معدن؛ کد پستی: ۱۵۹۱۶۳۴۳۱۱

صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵؛ شماره تلفن: ۶۴۵۴۵۹۳۴ ۲۱ ۹۸+

مرتبط است (Singh & Porter, 2001). لیو و همکاران با استفاده از روش المان محدود، تأثیر ساخت یک تونل جدید بر روی سامانه نگهداری فعلی تونل در محل تقاطع را بررسی کردند. در نتیجه این پژوهش مشخص شد که ناحیه تأثیرپذیر از حفاری تونل جدید تا ۲٫۵ برابر قطر تونل از محل تقاطع گسترش می‌یابد (H. Liu et al., 2008). هسیائو و همکاران به‌منظور درک بهتر رفتار توده‌سنگ در تونل‌های دوشاخه، از روش تفاضل محدود استفاده کردند. آن‌ها ۷۵ مدل عددی را با در نظر گرفتن پارامترهایی همچون زوایای مختلف تقاطع و شرایط زمین‌شناسی متنوع تحلیل کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که با کاهش زاویه تقاطع، جابه‌جایی عمودی اضافی سقف در تونل اصلی افزایش می‌یابد. همچنین، آن‌ها دستورالعملی برای نصب سامانه نگهداری در تونل‌های دوشاخه ارائه کردند (Hsiao et al., 2009). برای درک رفتار تونل‌های دوشاخه، لیو و وانگ یک تونل دوشاخه انتقال آب را با استفاده از رویکرد ریز-مدل بررسی کردند. آن‌ها تغییرشکل‌ها و وضعیت تنش‌های القایی پیرامون تونل دوشاخه و همچنین نیروهای داخلی القایی به پوشش بتنی را با در نظر گرفتن چهار شرایط کاری مختلف بررسی کردند (X. Liu & Wang, 2010). گو و همکاران با استفاده از مطالعات میدانی، روش‌های تحلیلی و مدلسازی عددی، مکانیزم تغییرشکل و شکست در تونل‌های دوشاخه معادن زغال‌سنگ زیرزمینی را بررسی کردند و ستون سنگی میانی را به‌عنوان بخش بحرانی تقاطع از منظر پایداری معرفی کردند. سپس سامانه نگهداری پیچ‌سنگ دوجهته (Double-directional control bolt) را به‌عنوان نگهداری اصلی به‌منظور بهبود یکپارچگی و افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی میانی پیشنهاد کردند (Guo et al., 2010). لی و همکاران پایداری تقاطع‌های یک معدن زغال‌سنگ با عمق زیاد را با استفاده از روش عددی تفاضل محدود بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که زاویه بین تنش افقی با محور تونل اصلی و همچنین زاویه محور تقاطع، مهم‌ترین عوامل تأمین پایداری در محدوده تقاطع هستند. در ادامه به‌منظور حفظ پایداری محل تقاطع دوشاخه، سامانه نگهداری میل‌مهار دوسر درگیر (Double-*contro anchor rod*) را به‌عنوان راهکاری برای افزایش ظرفیت نگهداری ستون سنگی میانی پیشنهاد کردند (Li et

دلیل فراهم‌سازی دسترسی هم‌زمان به چندین جبهه کار، در طراحی سامانه‌های آماده‌سازی و بهره‌برداری از اهمیت بالایی برخوردارند. با این حال، پایداری این تقاطع‌ها به‌واسطه تمرکز تنش‌های القایی، پیچیدگی در توزیع تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها و تأثیر هندسه دوشاخه‌ها، با چالش‌های ژئومکانیکی قابل‌توجهی مواجه است. همچنین، ناهمگنی ساختاری و شیب لایه‌های زغال‌سنگ بر نحوه توزیع تنش‌های القایی و گسترش نواحی شکست در فضاهای زیرزمینی تأثیر چشمگیری دارد (Shahbazi et al., 2022). در چنین شرایطی، تمرکز موضعی تنش‌های القایی موجب تغییر رفتار مکانیکی و تشدید تغییرشکل در توده‌سنگ پیرامون می‌گردد که منجر به کاهش پایداری به ویژه در هندسه‌های پیچیده و ناپیوستگی‌های بزرگ می‌شود (Nikadat et al., 2015). از این رو، تحلیل دقیق رفتار مکانیکی توده‌سنگ پیرامون تقاطع‌های دوشاخه و ارزیابی شرایط پایداری آن‌ها، برای طراحی مؤثر سامانه‌های نگهداری و تضمین ایمنی سازه‌های زیرزمینی، امری ضروری تلقی می‌شود (Ren et al., 2023). در این پژوهش به‌منظور ارزیابی پایداری محل تقاطع دوشاخه در معدن زغال‌سنگ پروده طبس، اثر حفاری تونل دسترسی به گالری شماره پنج (MG5) بر رفتار مکانیکی تونل شیب‌دار شماره دو (S2) با استفاده از شبیه‌سازی عددی در محیط نرم‌افزار *FLAC3D* بررسی شده است. به این ترتیب با تمرکز بر شرایط هندسی و ژئومکانیکی معدن زغال‌سنگ طبس، مدل‌سازی عددی تقاطع دوشاخه به همراه نصب سامانه نگهداری انجام شده است.

۲- پیشینه پژوهش

تاکنون پژوهش‌های مختلفی درباره تحلیل پایداری و برآورد تغییرشکل‌های پیرامون محل تقاطع تونل‌های دوشاخه در معادن به روش عددی انجام شده است. سینگ و همکاران تقاطع‌های سه‌راهی معدن زغال‌سنگ را با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی متفاوت، از جمله نسبت تنش افقی به عمودی، عمق و عرض تونل با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که پیشینه تمرکز تنش قائم در میانه گوشه‌های تیز تقاطع رخ می‌دهد و این تمرکز تنش به‌طور مستقیم با افزایش عمق و عرض تونل

تفاضل محدود استفاده کردند. آن‌ها برای افزایش ظرفیت باربری توده‌سنگ پیرامون تقاطع، از میل‌مهارهایی با طول‌های متفاوت که اجزای اصلی سامانه نگهداری را تشکیل می‌دهند، استفاده کردند. بررسی نتایج میدانی نشان داد که گسترش ناحیه پلاستیک از حداکثر طول میل‌مهارهای بلند فراتر نمی‌رود و سامانه پیشنهادی عملکرد رضایت‌بخشی دارد (Sun et al., 2020). چورتیس و کاواداس به‌منظور بررسی اثر ساخت تونل انشعاب بر تونل اصلی از پیش موجود در یک تقاطع صلیبی شکل، از روش المان محدود استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که ناحیه تأثیر از مرکز تقاطع تونل اصلی حدود دو برابر قطر تونل گسترش می‌یابد (Chortis & Kavvadas, 2021). تان و همکاران روش حفاری گسترشی معکوس (Reverse expanding excavation method) را برای احداث تونل‌های دوشاخه با دهانه بسیار بزرگ (۳۰ متر) معرفی کردند. آن‌ها به‌منظور بررسی پایداری محل تقاطع از روش المان محدود استفاده کرده و نتایج آن را با استفاده از پیش‌های میدانی اعتبارسنجی کردند (Tan et al., 2021). ژو و همکاران برای مقابله با شکست و تغییرشکل شدید ستون سنگی میانی در تقاطع دوشاخه معدن زغال‌سنگ، از مطالعات میدانی، روش تحلیلی و شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی استفاده کردند. آن‌ها ستون سنگی میانی را به‌عنوان جزء کلیدی از منظر تمرکز تنش معرفی کردند و به‌منظور افزایش یکپارچگی ستون سنگی و تضمین پایداری ناحیه تقاطع، سامانه نگهداری ترکیبی کابل‌های انکر تزریقی توخالی همراه با کابل‌های انکر با کشیدگی زیاد را پیشنهاد کردند (Xu et al., 2022). سان و همکاران با استفاده از روش تفاضل محدود، تأثیر زوایای مختلف محور تقاطع و ترتیب حفاری تونل اصلی و فرعی در محل تقاطع را بر وضعیت تنش‌های القایی، گسترش ناحیه پلاستیک و جابه‌جایی‌های پیرامون تقاطع دوشاخه بررسی کردند. سپس بر اساس نتایج آن، ترتیب و زاویه محور تقاطع مناسب را پیشنهاد کردند و کابل انکر با نسبت پواسون منفی (Negative poisson's ratio) را به‌عنوان سامانه نگهداری اصلی برای مقابله با تغییرشکل‌های شدید در تقاطع دوشاخه معرفی کردند (Sun et al., 2023). برای درک بهتر اثر حفاری یک تقاطع شهری بر نشست سطحی و رفتار توده‌خاک، سیاد و همکاران از

(Lin et al., 2010) لین و همکاران با استفاده از روش تفاضل محدود، پایداری یک تونل دوشاخه در نیروگاه برق-آبی را با بکارگیری یک روش تحلیل غیرخطی بررسی کردند (Lin et al., 2013). به‌منظور بررسی تغییرشکل‌ها، گسترش ناحیه پلاستیک و نیروهای القایی داخلی وارد بر پوشش بتنی تونل در یک تقاطع، لی و همکاران از روش مدلسازی المان محدود استفاده کردند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که ساخت تونل انشعاب تأثیر چشم‌گیری بر نواحی اطراف محل تقاطع دارد، به‌طوری‌که جابه‌جایی عمودی در تاج تونل به میزان ۲۸ درصد افزایش یافته است. همچنین بر اساس نتایج جابه‌جایی، مشخص شد که عمق ناحیه تأثیر در محل تقاطع تقریباً تا ۲/۴ برابر قطر تونل گسترش می‌یابد. درنهایت بررسی گسترش ناحیه پلاستیک پیرامون محل تقاطع نشان داد که ناحیه پلاستیک در دیواره‌ها و سقف محل تقاطع به‌طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر از سایر مقاطع تونل است (Li et al., 2016). لیو و همکاران با استفاده از روش تفاضل محدود، اثر ساخت یک تونل فرعی با سطح مقطع کوچک را بر تغییرات جابه‌جایی‌های تونل اصلی بررسی کرده و نشان دادند که ناحیه تأثیرپذیر از حفاری تونل فرعی، به میزان ۱/۵ برابر قطر تونل فرعی از محل تقاطع گسترش می‌یابد (Liu et al., 2017). جنیدی و همکاران با استفاده از روش المان محدود، تقاطع تونل اصلی و فرعی را تحت زاویه محور تقاطع ۹۰ درجه بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که ساخت تقاطع موجب تغییرات قابل‌توجهی در نیروهای القایی محوری و گشتاور خمشی در پوشش بتنی تونل اصلی در محل تقاطع می‌شود؛ به‌طوری‌که نیروی القایی محوری کاهش و گشتاور خمشی در دیواره‌های تونل اصلی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله از محل تقاطع، بزرگی نیروی القایی محوری در پوشش بتنی تونل کاهش می‌یابد (Joneidi et al., 2019). گیکاس و نومیکوس با استفاده از روش تفاضل محدود، تأثیر حفاری تونل فرعی بر تونل اصلی را بررسی کردند. آن‌ها ناحیه‌ای با نصب سامانه نگهداری اضافی پیرامون محل تقاطع را پیشنهاد کردند که طول این ناحیه چهار برابر قطر تونل انشعاب است و در امتداد محور تونل اصلی می‌باشد (Gkikas & Nomikos, 2021). به‌منظور درک رفتار توده‌سنگ پیرامون محل تقاطع، سان و همکاران از روش

شهر طبس در استان خراسان جنوبی واقع شده است، در سال ۱۳۸۶ به عنوان اولین معدن مکانیزه ایران به بهره‌برداری رسید. معدن طبس در ناحیه زغال‌دار پروده قرار دارد و در قسمت مرکزی یک تاقدیس نامتقارن با مساحت ۱۲۰۰ کیلومتر مربع واقع شده است (IRITEC, 2003). مرز شمالی معدن به گسل چشمه‌رستم محدود می‌شود که یک گسل معکوس با جابه‌جایی حدود ۷۰۰ متر است. سازندهای سنگی در مجاورت گسل چشمه‌رستم به دلیل چین‌خوردگی و ریزگسل‌های متعدد، دچار تغییرشکل‌های شدیدی شده‌اند (IRITEC, 2003). لایه‌های سنگی ناحیه زغال‌سنگ طبس به صورت عمده از توالی لای سنگ (سیلت‌استون)، ماسه‌سنگ و به صورت مقطعی از سنگ آهک و گل‌سنگ تشکیل شده است. لایه‌های اصلی زغال‌سنگ در یک مقطع ۵۰ متری از لایه‌های میانی قرار گرفته است و در حال حاضر لایه CI از لحاظ ضخامت و پایداری مهم‌ترین لایه زغال‌سنگ این منطقه به شمار می‌رود (Mahdevari & Khodabakhshi, 2021).

برای تعیین پارامترهای ورودی مدل عددی، ابتدا مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و نسبت پواسون بر اساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی انجام‌شده توسط دفتر فنی معدن زغال‌سنگ پروده طبس استخراج شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار RocLab و بر پایه معیار شکست غیرخطی هوک-براون، خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ برآورد شد. پارامترهای اولیه شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، پارامتر m_i شاخص کیفیت توده‌سنگ (GSI) و فاکتور برهم‌ریختگی تنش (D) مطابق جدول ۱، به نرم‌افزار وارد شد. بنابراین پارامترهای

روش اجزای محدود استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که پس از تکمیل ساخت تونل انشعاب، نشست سطحی به میزان ۶۸ درصد افزایش یافته و عمق ناحیه پلاستیک در دیواره‌های جانبی تقاطع گسترش یافته است. همچنین در ادامه با در نظر گرفتن ویژگی‌های مختلف خاک برای ارزیابی اثر آن‌ها بر نشست سطحی یک تحلیل حساسیت انجام شد که نتیجه آن نشان داد افزایش چسبندگی و مدول الاستیسیته موجب کاهش نشست سطحی می‌شود (Siad et al., 2023). روتکل و همکاران با استفاده از روش تفاضل محدود، رفتار توده‌سنگ اطراف یک تقاطع سه‌راهی را بررسی کردند و نشان دادند که با کاهش زاویه تقاطع، جابه‌جایی‌های عمودی توده‌سنگ اطراف تقاطع افزایش می‌یابد (Rotkegel et al., 2024).

مرور ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که اغلب مطالعات عددی پیشین، تقاطع‌هایی با هندسه ساده و شرایط زمین‌شناسی یکنواخت را بررسی کرده‌اند. با توجه به شرایط ژئومکانیکی و هندسه پیچیده معدن زغال‌سنگ پروده طبس، این پژوهش شرایط واقعی محدود مورد مطالعه شامل مقطع‌هایی با هندسه نامنظم، شیب متفاوت تونل S2 و تونل MG5، ناهماهنگی بین راستای حفاری و امتداد لایه‌بندی توده‌سنگ و وجود لایه‌های سنگی متفاوت را در نظر گرفته است. به این ترتیب در این پژوهش، با انجام تحلیل سه‌بعدی یک تقاطع دوشاخه با هندسه نامنظم در معدن پروده طبس، اثر حفاری تونل انشعابی MG5 به‌طور همزمان بر توزیع تنش، مسیر انتقال تنش، جابه‌جایی‌ها و گسترش ناحیه پلاستیک پیرامون تونل اصلی S2 ارزیابی شده است.

۳- معدن زغال‌سنگ پروده طبس

معدن زغال‌سنگ پروده طبس که در ۸۵ کیلومتری جنوب

جدول ۱- پارامترهای مقاومتی ماده‌سنگ مورد استفاده در نرم‌افزار Roclab (Technical Office Report, 2023)

واحد سنگی	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	GSI	پارامتر m_i	نسبت پواسون
لای سنگ	۲۵	۲۷۰۰	۲٫۸۳۸	۲۸	۷	۰٫۲۵
لای سنگ-ماسه‌ای	۷۳	۲۵۰۰	۲٫۹۸۷	۲۸	۹	۰٫۲۵
ماسه‌سنگ	۷۹	۲۷۰۰	۵٫۲۸۱	۲۸	۹	۰٫۲۵
زغال‌سنگ	۶	۱۶۰۰	۰٫۳۱۶	۲۸	۸	۰٫۳۲

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه

واحد سنگی	چگالی (kg/m^3)	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (deg)
لای سنگ	۲۵	۲۷۰۰	۲,۸۳۸	۲۸
لای سنگ-ماسه‌ای	۷۳	۲۵۰۰	۲,۹۸۷	۲۸
ماسه سنگ	۷۹	۲۷۰۰	۵,۲۸۱	۲۸
زغال سنگ	۶	۱۶۰۰	۰,۳۱۶	۲۸

ژئومکانیکی توده سنگ شامل زاویه اصطکاک داخلی، پارامترهای مدل رفتاری موهر-کولمب توسط نرم افزار محاسبه شد که در جدول ۲، ارائه شده‌اند.

۴- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش، پیچیدگی قابل توجه هندسه تقاطع دوشاخه در معدن پروده طبس، همراه با ناهمگونی‌های زمین‌شناسی و تغییرات لایه‌بندی، محیطی با رفتار مکانیکی بسیار نامنظم ایجاد کرده است. از سوی دیگر، کمبود داده‌های دقیق مربوط به برداشت ناپیوستگی‌ها و ریز-گسل‌ها امکان استفاده از مدل‌های ناپیوسته را با محدودیت مواجه می‌سازد. بدین ترتیب، برای بازنمایی واقع‌بینانه رفتار کلی توده سنگ، فرض محیط پیوسته معادل به‌عنوان رویکرد تحلیلی برگزیده شد.

به‌منظور پیاده‌سازی این رویکرد، نرم‌افزار *FLAC3D* به‌عنوان گزینه‌ای مناسب انتخاب شد. این نرم‌افزار 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 با دقت قابل قبول شبیه‌سازی می‌کند. همچنین، امکان مدل‌سازی مرحله‌به‌مرحله گام‌های حفاری، نصب سیستم‌های نگهداری و تحلیل هم‌زمان توزیع تنش، تغییر شکل و گسترش ناحیه پلاستیک در این نرم‌افزار وجود دارد.

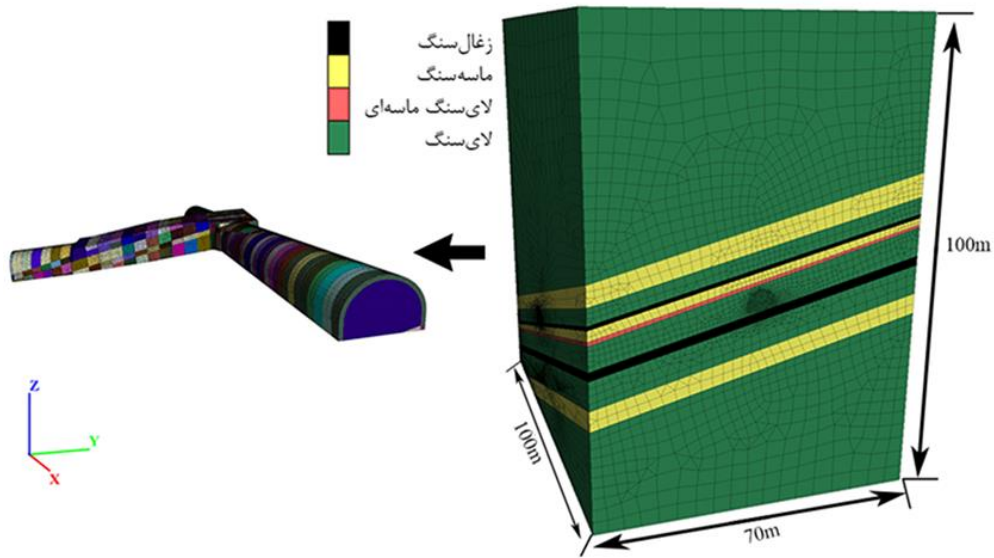
به منظور ارزیابی پایداری رفتار توده سنگ پیرامون تقاطع دوشاخه با مدل‌سازی عددی سازه زیرزمینی، تغییر شکل‌ها و گسترش ناحیه پلاستیک به‌عنوان شاخص‌های کلیدی بررسی شده‌اند. به این ترتیب هندسه مدل با استفاده از نرم‌افزار *Rhinoceros7* ساخته شده است و پس از مش‌بندی خروجی آن به محیط نرم‌افزار تفاضل محدود *FLAC3D* انتقال داده شده است. با توجه به تأثیر قابل توجه ابعاد مدل بر دقت نتایج تحلیل عددی، ابعاد

مدلسازی در این مطالعه با رعایت اصل سنت ونانت (*Saint-Venant's principle*) به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که از تأثیر مرزهای مدل بر ناحیه مورد مطالعه جلوگیری شود. بنابراین همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در راستای محور *Y* (عمود بر امتداد پیشروی تونل)، ابعاد مدل برابر با پنج برابر بیشینه عرض تونل در محل تقاطع در نظر گرفته شده که معادل ۷۰ متر است. در راستای محور *X* (هم‌راستا با جهت پیشروی تونل)، طول مدل برابر با ۱۰۰ متر انتخاب شده است تا رفتار تقاطع‌ها و ناحیه انتقال بین آن‌ها به‌درستی شبیه‌سازی شود. در نهایت، در راستای محور *Z* (راستای قائم)، ارتفاع مدل برابر با ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است؛ به‌طوری‌که ۳۰ متر از آن در زیر تراز کف تونل و ۷۰ متر در بالای سقف تونل قرار دارد تا اندرکنش کف و سقف بلافاصله به‌طور مؤثر لحاظ شود.

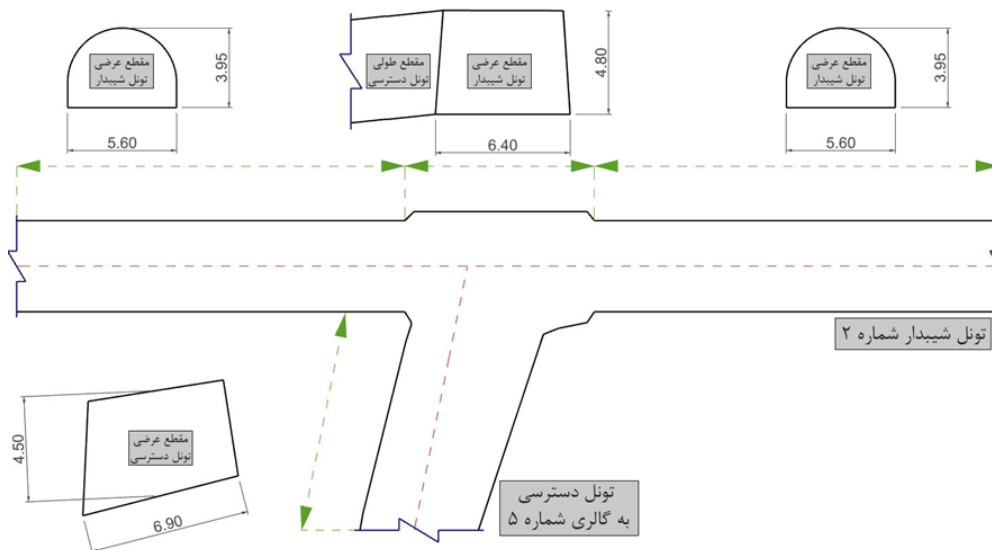
با توجه به اینکه عمق فعلی معدن بالاتر از سطح آب زیرزمینی است، از اعمال آب در فرآیند مدل‌سازی صرف‌نظر شده است. مرزهای جانبی مدل در جهت جابه‌جایی‌های افقی ثابت شده و کف مدل نسبت به جابه‌جایی‌های افقی و عمودی در هر سه جهت ثابت شده است. همچنین در این مدل وزن روباره به‌صورت تنش قائم به مرز بالایی مدل اعمال شده است. در نهایت به منظور شبیه‌سازی رفتار توده سنگ، مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است.

شکل ۲، نمایی شماتیک از هندسه محل تقاطع تونل *S2* با تونل *MG5* را نمایش می‌دهد. تونل *S2* دارای مقطع *D*-شکل با عرض ۵,۶ متر و ارتفاع ۳,۹۵ متر است که در امتداد محور افقی شکل ۲ قرار گرفته است. در محل تقاطع دوشاخه، مقطع تونل *S2* به تدریج با افزایش عرض تونل از سمت دو دیواره چپ و راست، به یک سطح مقطع دوزنقه‌ای-شکل تعریض می‌شود. تونل *MG5*، که نسبت به محور تونل *S2* با زاویه‌ی ۷۸ درجه انحراف دارد، دارای

تحلیل پایداری تقاطع دو شاخه حاصل از حفاری تونل دسترسی شماره پنج و ...، علیرضا تراکمه و ...، ص ۱۱۵-۱۳۱



شکل ۱- هندسه مدل عددی در نرم افزار FLAC3D



شکل ۲- نمای پلان و مقاطع عرضی و طولی تونل‌ها در محل تقاطع دو شاخه

موجود، مدیریت شود.

پس از اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه و نیز بررسی تعادل نیروهای نامتعادل، جابه‌جایی و سرعت در نقاط گره بازنشانی شد. در ادامه روند حفاری در گام‌های ۱/۶ متری انجام و سامانه‌های نگهداری بلافاصله پس از حفاری هر گام در مدل با استفاده از المان‌های ساختاری مدل‌سازی شد. به این ترتیب سامانه نگهداری تونل S2 به صورت پیچ‌سنگ‌های

مقطع دوزنقه‌ای با عرض حدود ۶/۹ متر و ارتفاع ۴/۵ متر بوده و در محل اتصال، بخشی از ابعاد آن در قالب یک مقطع طولی با ارتفاع ۴/۸ متر و عرض ۶/۴ متر نشان داده شده است. در معدن پروده طبرس، آرایش هندسی تقاطع‌های دو شاخه به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده که امکان اتصال سازه‌ای و انتقال بار بین دو تونل فراهم شود و تغییرات ابعادی، هم‌راستا با نیازهای سازه‌ای و محدودیت‌های هندسی

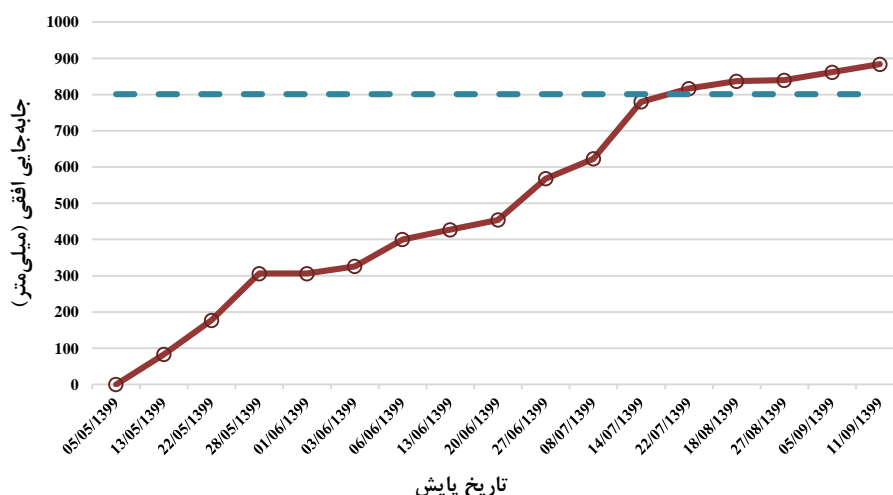
است، در حالی‌که همگرایی افقی بر اساس داده‌های پایش میدانی در مقطع مشابه، برابر با ۸۸۴ میلی‌متر ثبت شده است. اختلاف حدود ۹ درصدی بین این دو مقدار نشان‌دهنده انطباق مناسب مدل عددی با شرایط واقعی و دقت کافی آن در بازنمایی رفتار توده‌سنگ در محل مورد مطالعه است.

در شکل ۴، جابه‌جایی‌های قائم در محل تقاطع پس از اجرای مدل قبل و پس از حفاری تونل *MG5* نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه جابه‌جایی قائم سقف در مقطع دوزنقه‌ای-شکل تونل *S2* قبل از حفاری تونل *MG5* حدود ۲۹۰ سانتی‌متر است که با افزایش فاصله از مرکز تقاطع به تدریج کاهش می‌یابد. پس از حفاری تونل *MG5*، بیشینه جابه‌جایی قائم سقف در مقطع دوزنقه‌ای-شکل با افزایش ۶/۱ سانتی‌متری به مقدار ۳۵/۱ سانتی‌متر می‌رسد که با افزایش فاصله از مرکز تقاطع روند کاهشی دارد.

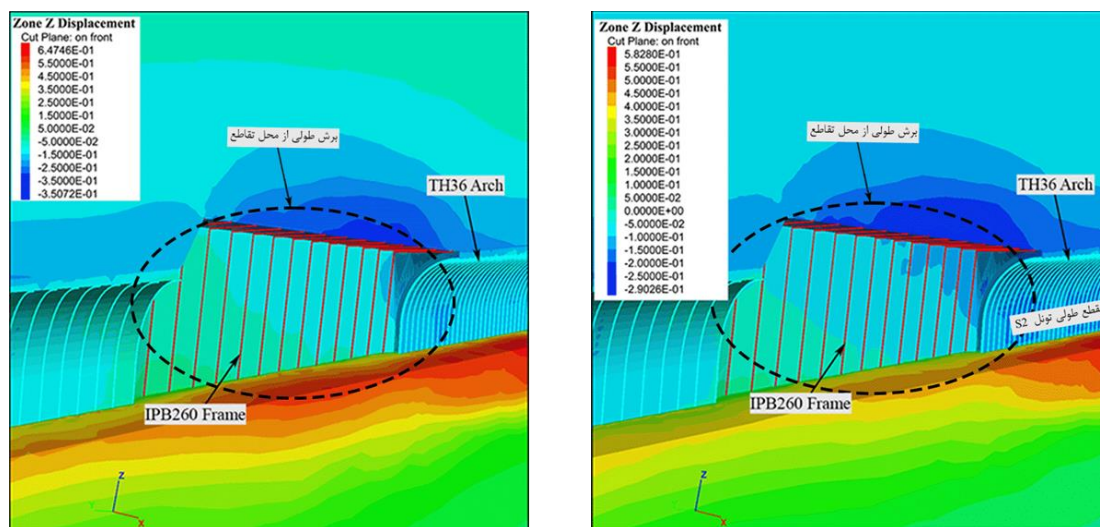
در شکل ۵، نیز نمودار جابه‌جایی قائم اضافی در سقف تونل *S2* در اثر حفاری تونل *MG5* نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تونل *S2* در سمت پایه سنگی با زاویه بسته تأثیر بیشتری از حفاری تونل *MG5* می‌پذیرد؛ به طوری‌که طول ناحیه با جابه‌جایی اضافی در سمت پایه سنگی با زاویه بسته بیشتر از مقدار مشابه در

تمام تزریقی با آرایش شعاعی به طول ۲/۴ متر و قاب‌های فولادی کشویی *TH36* با فاصله‌داری ۶۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای سامانه نگهداری تونل *MG5* و مقطع دوزنقه‌ای-شکل محل تقاطع نیز از پیچ‌سنگ‌های ۳ و ۲/۷ متری به ترتیب در سقف و دیواره و همین‌طور قاب‌های فولادی استفاده شده است.

قبل از اجرای شبیه‌سازی، انجام فرآیند اعتبارسنجی مدل عددی به‌منظور اطمینان از صحت و قابلیت اطمینان نتایج ضروری است. در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی دقت مدل سه‌بعدی، مقادیر جابه‌جایی افقی حاصل از تحلیل عددی با داده‌های پایش میدانی در محل پروژه مقایسه شد. به این ترتیب مقطع عرضی واقع در فاصله ۲۲ متری پیش از محل تقاطع به‌عنوان نقطه مرجع انتخاب شد. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۳، در مراحل اولیه افزایش سریع جابه‌جایی افقی مشاهده شده و متعاقب آن، روند تغییرات با نرخ کاهشی ادامه یافته است. این تغییر در شیب منحنی بیانگر کاهش تدریجی تغییرشکل‌ها و ایجاد تعادل بین توده‌سنگ و سیستم نگهداری می‌باشد. پس از رسیدن تغییرشکل‌ها به حالت پایدار نسبی، مقادیر نهایی جابه‌جایی در هر دو مجموعه داده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که در ارتفاع یک متری از کف تونل، همگرایی افقی معادل ۸۰۱ میلی‌متر به دست آمده



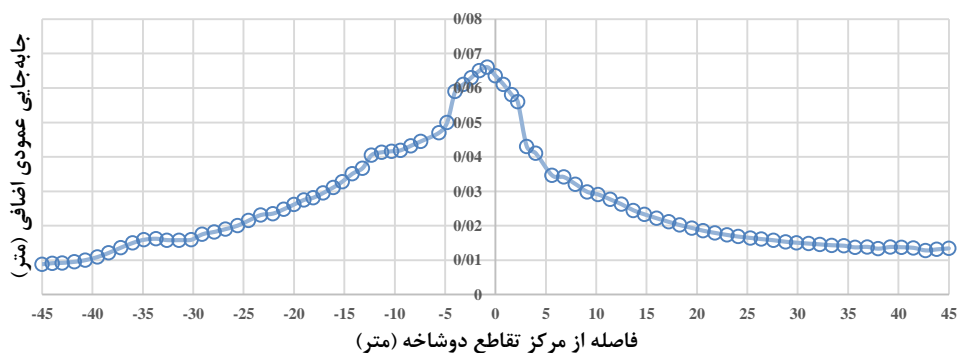
شکل ۳- مقایسه جابه‌جایی افقی به‌دست‌آمده از مدل عددی (خط چین آبی) با داده‌های پایش میدانی (خط قرمز)



ب- پس از حفاری تونل MG5

الف- قبل از حفاری تونل MG5

شکل ۴- جابه‌جایی عمودی تقاطع دوشاخه در تونل S2



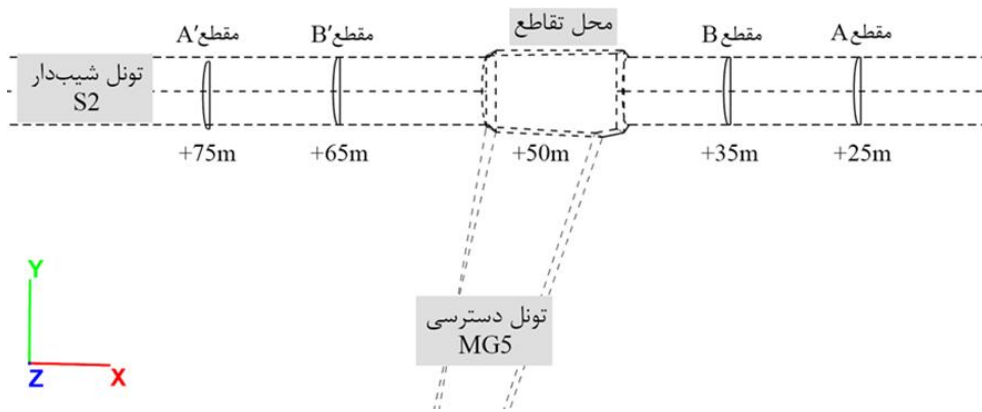
شکل ۵- جابه‌جایی قائم اضافی سقف تونل S2 پس از حفاری تونل MG5

پلاستیک در اطراف محدوده تونل در موقعیت‌های متفاوت است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۷-الف، در مقطع A پیش از حفاری تونل MG5، ناحیه پلاستیک در توده سنگ اطراف تونل دارای توزیع نسبتاً نامتقارن است. پس از حفاری تونل MG5، تغییر محسوس در گستره و الگوی توزیع ناحیه پلاستیک ایجاد نشده است. این رفتار به فاصله نسبتاً زیاد این مقطع از مرکز تقاطع و موقعیت آن در سمت زاویه باز نسبت داده می‌شود که سبب کاهش شدت تأثیرات تنش‌های القایی ناشی از حفاری تونل MG5 شده است. همچنین با توجه به شکل ۷-ب، در مقطع A' پیش از حفاری تونل MG5، ناحیه پلاستیک عمدتاً در بخش‌های دیواره و سقف تونل به صورت نسبتاً یکنواخت ایجاد شده و

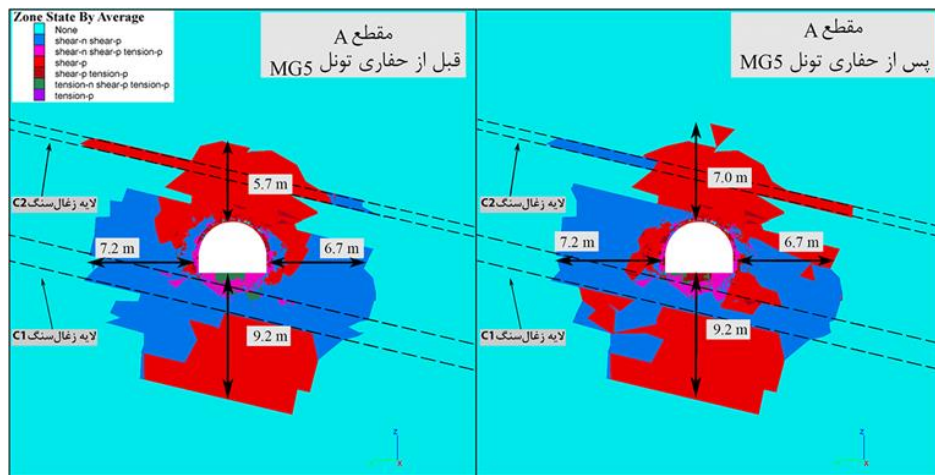
سمت پایه سنگی با زاویه باز است. همچنین بیشترین مقدار جابه‌جایی اضافی سقف در محل ذوزنقه‌ای-شکل و مرکز تقاطع اتفاق افتاده است.

به منظور بررسی تأثیر حفاری تونل MG5 بر گسترش ناحیه پلاستیک تونل S2، مقاطع مختلف با فاصله‌های مشخص از محل تقاطع مطابق شکل ۶ انتخاب شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو مقطع A و B به ترتیب با فاصله ۲۵ و ۱۵ متر از محل تقاطع در سمت پایه سنگی با زاویه باز (قبل از تقاطع) و مقاطع A' و B' با فاصله به ترتیب ۲۵ و ۱۵ متر در سمت پایه سنگی با زاویه بسته (بعد از تقاطع) در نظر گرفته شده است.

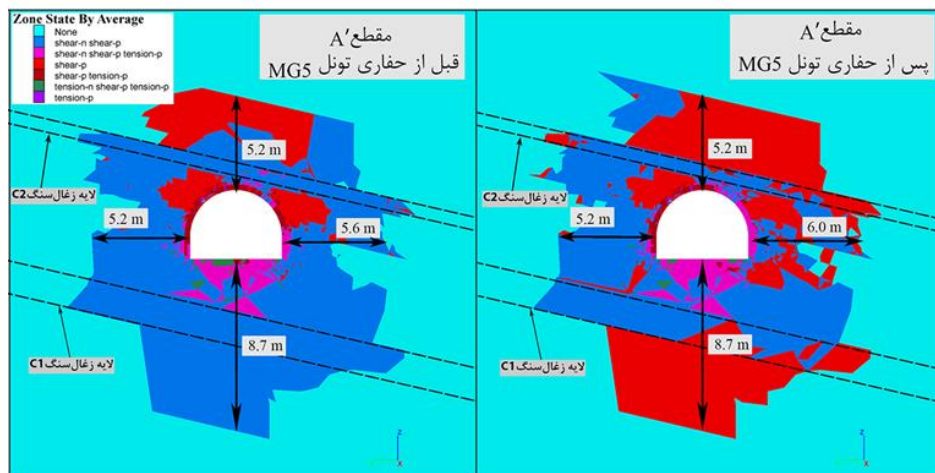
شکل ۷ و شکل ۸، نشان‌دهنده گسترش ناحیه



شکل ۶- موقعیت مقاطع عرضی با فواصل مختلف قبل و بعد از حفاری تونل MG5



(الف)



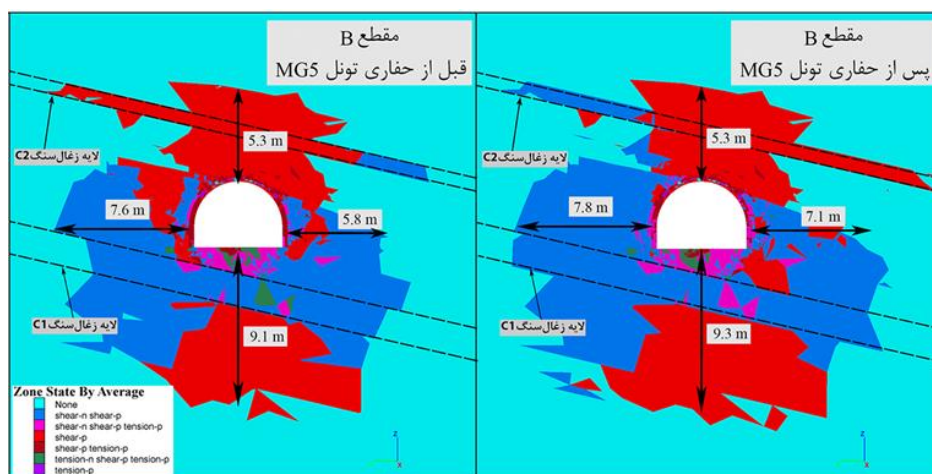
(ب)

شکل ۷- ناحیه پلاستیک در مقاطع عرضی A و A' قبل و بعد از حفاری تونل MG5

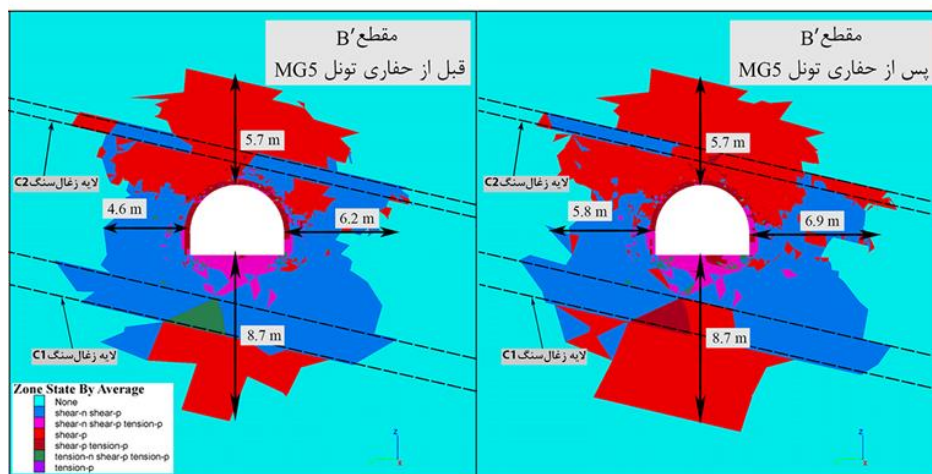
لایه‌بندی است. نتایج مدلسازی پس از حفاری تونل *MG5* نشان داد که افزایش گستره ناحیه پلاستیک در کف و دیواره‌ها (به‌ویژه دیواره مجاور تونل *MG5*) با شدت بیشتری نسبت به مقاطع دیگر رخ داده است. این پدیده ناشی از فاصله کم تا محل تقاطع، تداخل و برهم‌نهی تنش‌های القایی و حضور لایه ضعیف زغال‌سنگ در مجاورت کف تونل است. همان‌گونه که در شکل ۸-ب نمایش داده شده است، گسترش ناحیه پلاستیک در مقطع *B'* نیز دارای توزیع نامتقارن و همسو با امتداد لایه‌های ضعیف زغال‌سنگ است. با این حال، مقایسه مقاطع *B* و *B'* نشان می‌دهد که وسعت ناحیه پلاستیک در مقطع *B'* با وجود قرارگیری در سمت

در کف تونل گستره بیشتری دارد. پس از حفاری، افزایش جزئی در ناحیه پلاستیک دیواره سمت زاویه بسته ایجاد شده که بیانگر تأثیر محدود عملیات حفاری در این موقعیت است. دلیل این محدودیت را می‌توان فاصله قابل‌ملاحظه از مرکز تقاطع و موقعیت قرارگیری در سمت زاویه بسته دانست که انتقال و تمرکز تنش‌های القایی را کاهش داده است.

مطابق شکل ۸-الف، در مقطع *B* به دلیل وجود لایه ضعیف زغال‌سنگ در نزدیکی کف تونل، گسترش ناحیه پلاستیک نسبت به سایر مقاطع بیشتر بوده است. همچنین، توزیع نامتقارن ناحیه پلاستیک ناشی از ناهمگنی‌های



(الف)



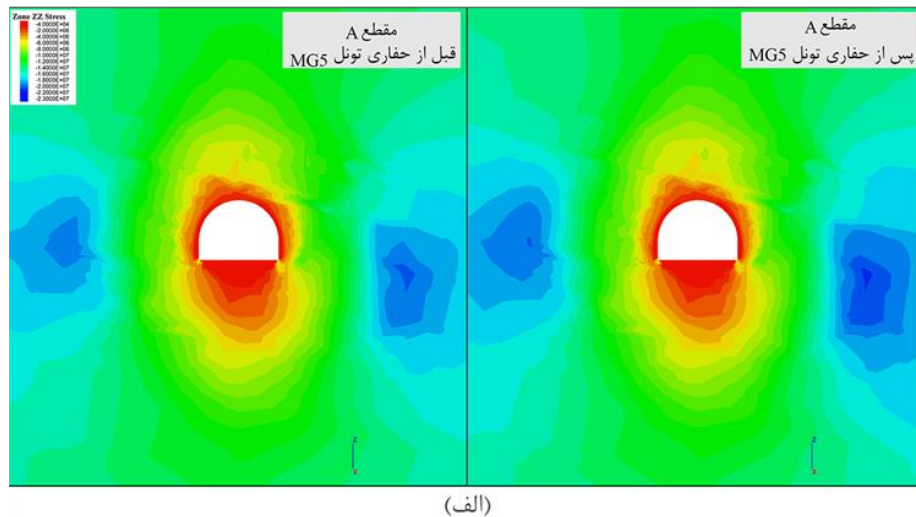
(ب)

شکل ۸- ناحیه پلاستیک در مقاطع عرضی *B* و *B'* قبل و بعد از حفاری تونل *MG5*

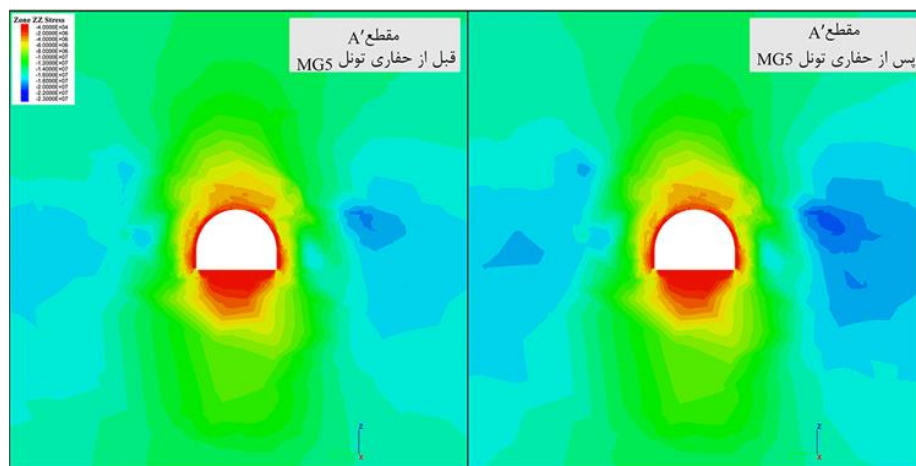
نزدیک‌تر به تقاطع، به‌ویژه مقطع B' در سمت زاویه بسته و همراه با برهم‌نهی تنش‌های القایی و اثر لایه ضعیف زغال‌سنگ در کف تونل مشاهده شده است. در مقابل، در مقاطع دورتر از محل تقاطع شامل A و A' گستره ناحیه پلاستیک تغییرات محدودی داشته و تأثیر حفاری تونل $MG5$ قابل‌توجه نیست. با توجه به اینکه مطالعه تغییرات میدان تنش پیرامون تقاطع تونل‌ها، به‌ویژه بررسی تمرکز و بازتوزیع تنش‌های القایی، از شاخص‌های مهم ارزیابی پایداری و عملکرد سازه‌های نگهداری محسوب می‌شود و تغییر در مسیرهای انتقال تنش و تشدید تمرکز تنش در بخش‌های بحرانی می‌تواند شرایط لازم برای گسترش ناحیه پلاستیک و افزایش تغییرشکل‌های موضعی را فراهم کند.

زاویه بسته، کمتر از مقطع B است که بیانگر اثر غالب وجود لایه ضعیف زغال‌سنگ در کف تونل بر رفتار پلاستیسیته می‌باشد. همچنین پس از حفاری تونل $MG5$ ، مشابه مقطع B افزایش محسوس در گستره ناحیه پلاستیک در دیواره‌ها و کف تونل مشاهده می‌شود.

بررسی مقاطع منتخب نشان می‌دهد حفاری تونل $MG5$ موجب گسترش ناحیه پلاستیک در توده‌سنگ پیرامون تونل $S2$ تا فاصله‌ای در حدود ۲۵ متر از مرکز تقاطع می‌شود. شدت این گسترش به فاصله از محل تقاطع، موقعیت مقطع نسبت به سمت زاویه باز یا بسته و شرایط زمین‌شناسی موضعی از جمله حضور لایه‌های ضعیف در کف تونل وابسته است. بیشترین افزایش پلاستیسیته در مقاطع



(الف)



(ب)

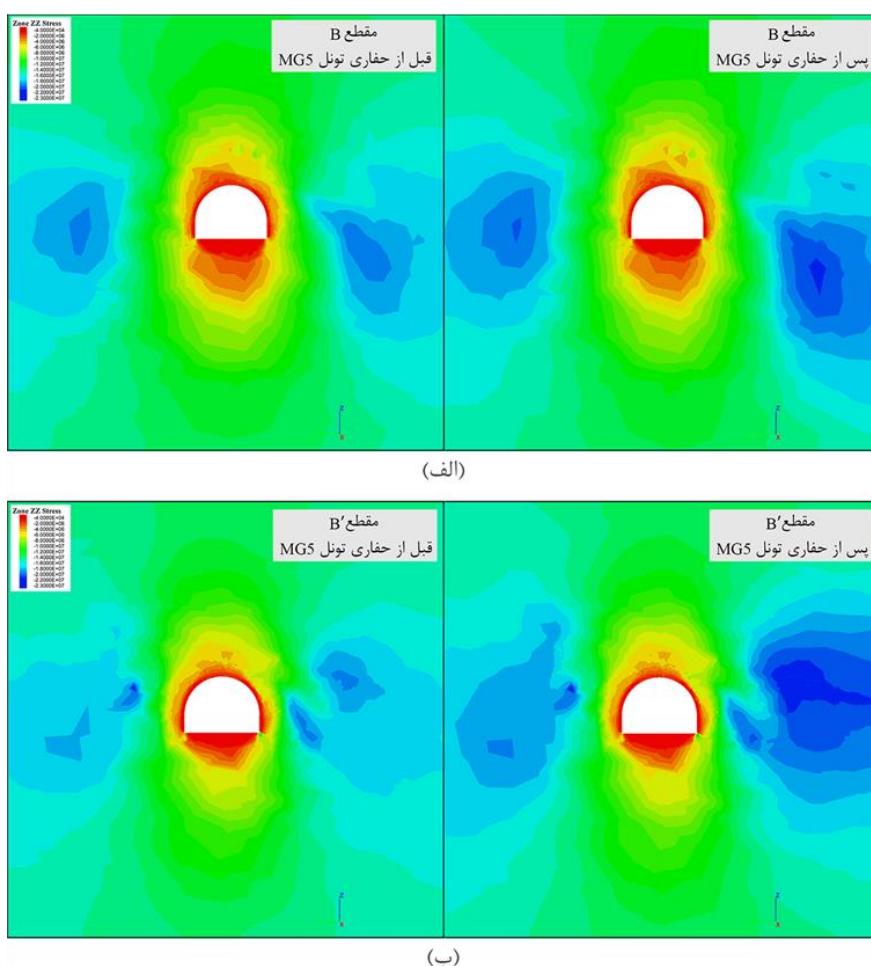
شکل ۹- توزیع تنش‌های القایی قائم در مقاطع عرضی A و A' قبل و بعد از حفاری تونل $MG5$

اساس اصول مکانیک سنگ و تئوری تمرکز تنش، با افزایش فاصله گرادیان تنش‌ها کاهش یافته و اثرات به صورت غیرخطی افت می‌کند.

نتایج توزیع تنش القایی قائم در دو مقطع B و B' نیز در شکل ۱۰، ارائه شده است. مقطع B در فاصله ۱۵ متری قبل از محل تقاطع و در سمت زاویه باز تونل $S2$ قرار دارد و مقطع B' در فاصله ۱۵ متری بعد از محل تقاطع و در سمت زاویه بسته واقع شده است. در مقطع B ، قبل از حفاری تونل $MG5$ ، الگوی توزیع تنش‌های القایی قائم به طور نسبی متقارن بوده و یک ناحیه تمرکز تنش در فاصله حدود پنج متری از دیواره‌ها شکل گرفته است که شدت آن به تدریج در جهت تاج و کف تونل کاهش می‌یابد.

اثر حفاری تونل $MG5$ بر توزیع تنش‌های القایی قائم تونل $S2$ در چهار مقطع A ، B ، A' و B' (شکل ۶) تحلیل شده است.

همانطور که در شکل ۹ مشخص شده است، در مقاطع A و A' که به ترتیب در فواصل ۲۵ متری قبل و بعد از محل تقاطع واقع شده‌اند، حفاری تونل $MG5$ تغییر قابل ملاحظه‌ای در الگوی توزیع تنش قائم القایی پیرامون تونل ایجاد نمی‌کند. با این وجود، افزایش جزئی در مقادیر تنش القایی قائم در دیواره‌های نزدیک به تونل $MG5$ مشاهده شده است. این تغییرات محدود، با یافته‌های مربوط به گسترش ناحیه پلاستیک سازگار بوده و بیانگر آن است که در این فاصله، اثرات حفاری تونل $MG5$ بر توزیع تنش و تغییر شکل توده سنگ بسیار کم و محدود است. همچنین بر



شکل ۱۰- توزیع تنش‌های القایی قائم در مقاطع عرضی B و B' قبل و بعد از حفاری تونل $MG5$

ناحیه متأثر از حفاری تونل $MG5$ در سمت زاویه بسته بیشتر است. حفاری تونل $MG5$ ، باعث گسترش ناحیه پلاستیک در اطراف محدوده تونل $S2$ می‌شود. این گسترش که عمدتاً در دیواره‌های سمت زاویه بسته اتفاق می‌افتد، با افزایش فاصله از محل تقاطع دوشاخه، کاهش می‌یابد؛ به طوری که در فاصله حدود ۲۵ متری از محل تقاطع دوشاخه، حفاری تونل $MG5$ تأثیر چشم‌گیری بر گسترش ناحیه پلاستیک در توده‌سنگ اطراف محدوده تقاطع دوشاخه ندارد. علاوه بر این، تحلیل توزیع تنش‌های قائم القایی نشان داد که حفاری تونل $MG5$ موجب تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در الگوی تنش پیرامون تونل $S2$ می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از بررسی مقاطع منتخب بیشترین شدت تغییرات در سمت پایه سنگی با زاویه بسته مشاهده شده که ناشی از محدودیت مسیرهای انتقال تنش و تمرکز موضعی تنش‌ها است. این شرایط، زمینه گسترش ناحیه پلاستیک و افزایش نیروهای القایی داخلی اعمال‌شده بر سیستم نگهداری را فراهم می‌کند. در مقابل، در فواصل بیش از ۲۵ متر، تغییرات تنش نسبت به قبل از حفاری ناچیز بوده و بیانگر کاهش قابل‌توجه تأثیر حفاری تونل $MG5$ در این نواحی است. در این پژوهش اثر آب زیرزمینی به دلیل قرارگیری معدن در تراز بالاتر از تراز ایستایی در مدل لحاظ نشده است، هرچند پیش‌بینی می‌شود در شرایط اشباع، جابه‌جایی‌ها و گسترش ناحیه پلاستیک افزایش یابد. ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی از قبیل گسل‌ها، درزه‌ها و لایه‌بندی در مدل به‌صورت صریح مدلسازی نشده و اثر آن‌ها به‌طور ضمنی در پارامترهای ژئومکانیکی وارد شده است. همچنین مدل‌سازی سیستم نگهداری بر اساس طرح اجرایی موجود انجام شده و سناریوهای جایگزین در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. این موارد جزء فرضیات این پژوهش بوده‌اند که می‌توانند به عنوان پیشنهاد در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرند.

۶- سپاس‌گزاری

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

پس از حفاری $MG5$ ، تغییر محسوسی در شکل و گستره خطوط هم‌تراز تنش مشاهده شده است؛ به‌گونه‌ای که در سمت دیواره مجاور تونل $MG5$ ، وسعت ناحیه تمرکز تنش و مقادیر آن نسبت به حالت اولیه بیشتر شده است. در مقطع B' ، قبل از حفاری تونل $MG5$ نیز الگوی تنش‌های القایی قائم مشابه مقطع B است که در آن اندکی عدم تقارن ناشی از هندسه زاویه بسته مشاهده شده است. پس از حفاری تونل $MG5$ ، افزایش وسعت و شدت تمرکز تنش در دیواره سمت زاویه بسته به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مقطع B است. این امر بیانگر حساسیت بالاتر این موقعیت به بازتوزیع تنش‌ها و مسیریابی مجدد نیروها پس از حفاری است.

مقایسه دو مقطع نشان می‌دهد که اثر حفاری تونل $MG5$ در موقعیت زاویه بسته (مقطع B') سبب تمرکز تنش شدیدتری نسبت به موقعیت زاویه باز (مقطع B) شده است. بنابراین هندسه زاویه بسته مسیر انتقال بار را محدود کرده و موجب افزایش گرادینان تنش در اطراف دیواره می‌شود. این شرایط می‌تواند گسترش نواحی با پتانسیل تغییرشکل پلاستیک و تشدید نیروهای محوری و گشتاور خمشی در المان‌های نگهداری را در مقطع B' بیشتر از مقطع B به‌دنبال داشته باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر حفاری تونل $MG5$ بر پایداری تونل $S2$ در معدن زغال‌سنگ پروده طبس، جابه‌جایی‌های اضافی قائم، گسترش ناحیه پلاستیک و توزیع تنش‌های القایی قائم اطراف محل تقاطع با روش عددی تفاضل محدود و در محیط نرم‌افزار $FLAC3D$ تجزیه و تحلیل شد. بر اساس نتایج حاصل، جابه‌جایی‌های قائم در سقف تونل $S2$ قبل و بعد از حفاری تونل $MG5$ تغییرات قابل‌توجهی دارد. بیشینه جابه‌جایی قائم سقف تونل $S2$ قبل از حفاری تونل $MG5$ ، ۲۹٫۰ سانتی‌متر است، ولی پس از حفاری تونل $MG5$ به ۳۵٫۱ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. به‌طور کلی افزایش جابه‌جایی‌ها عمدتاً در سمت پایه سنگی با زاویه بسته رخ می‌دهد. همچنین نتایج جابه‌جایی‌های قائم نشان می‌دهد که تونل $S2$ در سمت پایه سنگی با زاویه بسته تأثیر بیشتری از حفاری تونل $MG5$ می‌گیرد و طول

۷- مراجع

- Chortis, F., & Kavvas, M. (2021). Three-Dimensional Numerical Analyses of Perpendicular Tunnel Intersections. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1771–1793. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01587-w>.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01602-0>.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60193-9](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60193-9).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.01.003>.
- IRITEC. (2003). *Tabas Coal Mine Project, detailed design report (Vol. 1)*.
- Joneidi, M., Golshani, A., & Naeimifar, I. (2019). Progressive deformation and mechanical behaviour of intersecting tunnels in soft ground. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 172(4), 285–296. <https://doi.org/10.1680/jgrim.18.00073>.
- 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*, 20(1), 28–34. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60156-3](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60156-3).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.016>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.07.011>.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-2128-y>.
- 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. https://doi.org/10.36487/acg_repo/808_150.
- Liu, X., & Wang, Y. (2010). Three dimensional numerical analysis of underground bifurcated tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(4), 447–455. <https://doi.org/10.1007/s10706-010-9304-x>.
- Mahdevari, S., & Khodabakhshi, M. B. (2021). A hierarchical local-model tree for predicting roof displacement in longwall tailgates. *Neural Computing and Applications*, 33(21), 14909–14928. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06127-y>.

- Nikadat, N., Fatehi, M., & Abdollahipour, A. (2015). Numerical modelling of stress analysis around rectangular tunnels with large discontinuities (fault) by a hybridized indirect BEM. *Journal of Central South University*, 22(11), 4291–4299. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2977-9>.
- 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. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1264140>.
- Rotkegel, M., Nguyen, P. M. V., & Duong, D. H. (2024). Individual-portal support with a pre-tensioned canopy for a coal mine roadway junction. *Studia Geotechnica et Mechanica*. <https://doi.org/10.2478/sgem-2024-0021>.
- Shahbazi, M., Najafi, M., Marji, M. F., & Abdollahipour, A. (2022). Cavity Growth in Underground Coal Gasification Method by Considering Cleat Length and Inclination of Coal with Elasto-Brittle Behavior. *Journal of Mining and Environment*, 13(2), 607–625. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11906.2183>.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02508-3>.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(00\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(00)00027-6).
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8004-y>.
- Sun, X., Zhang, B., Tao, Z., Zhao, C., & Wang, J. (2020). Research on Supporting Measure at Intersection of Inclined Shaft and Major Tunnel in Highway. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2020/8897327>.
- Technical Office Report, (2023), Engineering Report, Tabas Mine.
- 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. <https://doi.org/10.1680/jgeen.20.00222>.
- 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. <https://doi.org/10.1155/2022/1574530>.

Stability analysis of the bifurcated intersection formed by the excavation of access tunnel No. 5 and slope tunnel No. 2 in the Parvadeh coal mine, Tabas

A. Tarakameh¹; S. Mahdevari^{2*}; K. Shahriar³

¹ M.Sc; Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic),
ali.tarakameh@aut.ac.ir

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

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

Received: 19 May 2025; Accepted: 11 Nov 2025

DOI: 10.22044/tuse.2025.16187.1502

Keywords	Extended Abstract
Tunnel stability analysis Bifurcated tunnel intersection Plastic zone Finite difference method Tabas coal mine	Summary The design and construction of intersecting tunnels are inevitable in the development networks of underground mines. Ensuring the stability of these intersections is crucial, as their failure can endanger the safety and overall stability of the entire mine. This study investigates the stability of a bifurcated tunnel intersection formed by the excavation of access tunnel No. 5 and slope tunnel No. 2 in the Parvadeh coal mine, Tabas, Iran.

Introduction

In underground coal mining, tunnel intersections often experience complex stress redistributions, leading to potential instability in surrounding rock masses. The Parvadeh coal mine features multiple intersecting excavations, where stress concentration and plastic deformation can significantly affect operational safety. This research aims to evaluate the mechanical behavior of the rock mass around a bifurcated intersection and to quantify the effects of sequential excavations on ground deformation and plastic zone development.

Methodology and Approaches

A three-dimensional numerical simulation was performed using finite difference method (FDM) to analyze vertical displacements and the extent of the plastic zone surrounding the intersection. The numerical model incorporated geological and geomechanical properties derived from field observations and laboratory tests. Sequential excavation steps were simulated to find out the interaction effects between the access and slope tunnels. Displacement contours and plastic zones were analyzed at various stages to assess the deformation characteristics and potential failure regions.

Results and Conclusions

The simulation results reveal that the excavation of the access tunnel induces additional stress on the slope tunnel, particularly along the closed-angle rock pillar, where higher stress concentrations occur. The length of the zone experiencing excessive displacement in the closed-angle rock pillar was found to be greater

than that in the open-angle side. Moreover, the maximum roof displacement was observed at the trapezoidal-shaped central section of the intersection. Excavation of the access tunnel also led to a noticeable expansion of the plastic zone around the slope tunnel that gradually decreased with increasing distance from the intersection. Beyond approximately 25 m from the bifurcated intersection, the influence of the access tunnel excavation on the plastic zone around the slope tunnel became negligible. These findings provide valuable insights into the design and support of intersecting tunnels in underground coal mines to enhance overall stability and operational safety.
