



مقاله پژوهشی

تحلیل پایداری تقاطع تونل های شیب دار و دسترسی در معدن زغال سنگ طبس با استفاده از روش عددی تفاضل محدود

علیرضا تراکمه^۱، ستار مهدوری^{۱*}، کورش شهريار^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت: ۳۰ مهر ۱۴۰۳، بازنگری: ۰۶ خرداد ۱۴۰۴، پذیرش: ۰۷ خرداد ۱۴۰۴)

چکیده

به علت پیچیدگی طرح شبکه تونل ها در معادن زیرزمینی معمولاً در این معادن تقاطع های مختلفی وجود دارد که پایداری آن ها اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق، پایداری یکی از تقاطع های دوشاخه معدن زغال سنگ پروده طبس که در اثر تقاطع تونل شیب دار شماره دو و تونل دسترسی به گالری شماره پنج ایجاد می شود، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور توزیع تنش های القایی، شدت تمرکز تنش و گستردگی ناحیه پلاستیک با استفاده از روش عددی تفاضل محدود در محیط نرم افزار FLAC3D بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصل، در محدوده بین تونل شیب دار و تونل دسترسی، بیشینه تنش القایی قائم معادل ۲۵/۵ مگاپاسکال در سمت چپ تقاطع دوشاخه رخ داده است. همچنین بر اساس کانتورهای تمرکز تنش در محدوده بین تونل شیب دار و تونل دسترسی، تمرکز تنش در سمت چپ تقاطع دوشاخه در نزدیکی تونل شیب دار تا ۱/۶۵ و در نزدیکی تونل دسترسی تا ۱/۷۱ افزایش می یابد. در سقف تونل دسترسی با دور شدن از محل تقاطع، سطح تنش ها روند افزایشی دارد که ناشی از سطح مقطع غیرمردور و عریض آن است. بر اساس منحنی تنش های برشی نیز شدت تمرکز تنش برشی در پایه سنگی سمت چپ بیشتر است. بیشینه مقدار تنش برشی در گوشه سمت چپ و راست تقاطع دوشاخه به ترتیب معادل ۷/۱۱ و ۷/۹۸ مگاپاسکال است. به علت وجود لایه هایی با مقاومت متفاوت، گسترش ناحیه پلاستیک در فواصل مختلف از تقاطع تقریباً نامتقارن است و وجود لایه زغال سنگ در کف، منجر به تشدید گستردگی ناحیه پلاستیک و به تبع آن ناپایداری کف و بالازدگی آن می شود.

کلمات کلیدی

تقاطع دوشاخه، تحلیل پایداری، تنش های القایی، ناحیه پلاستیک، روش تفاضل محدود، معدن زغال سنگ پروده طبس

*عهده دار مکاتبات: satar.mahdevari@aut.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2025.22282.1646

۱- مقدمه

با پیشرفت روزافزون جامعه، نیاز به احداث سازه‌های زیرزمینی به‌ویژه در حین آماده‌سازی شبکه معادن زیرزمینی به‌طور گسترده‌ای افزایش یافته است. بر اساس نوع کاربرد سازه عمرانی و یا طرح معدن، برخی از تونل‌ها به‌ناچار به‌صورت متقاطع حفاری می‌شوند. یکی از انواع تونل‌های متقاطع، تونل دوشاخه^۱ است که با توجه به شرایط پیچیده هندسی و تنش‌های القایی، تحلیل پایداری آن اهمیت ویژه‌ای دارد [۱]. عرض دهانه تونل‌های دوشاخه در محل تقاطع نسبت به مقطع تونل معمولاً بیشتر است که باعث افزایش جابه‌جایی‌ها و کاهش پایداری سازه در محل تقاطع می‌شود؛ بنابراین هرگونه ناپایداری در محل تقاطع تونل‌ها، پایداری کل سازه را تحت تأثیر قرار داده و از لحاظ مهندسی بسیار حائز اهمیت است [۲].

تاکنون پژوهش‌های مختلفی درباره تحلیل پایداری و برآورد تغییرشکل‌ها در توده‌سنگ یا خاک پیرامون تونل‌های دوشاخه انجام شده است که روش‌های عددی از بین انواع روش‌های معرفی شده پرکاربردتر و متداول‌تر هستند [۳]. سنگ و همکاران با استفاده از روش عددی المان محدود و در نظر گرفتن پارامترهایی همچون نسبت تنش‌های افقی به قائم، میزان جابه‌جایی‌ها و تنش‌های القایی، یک الگو برای طراحی سیستم نگهداری در تقاطع‌های سه‌راه^۲ در معادن زغال‌سنگ ارائه کردند [۴]. سیائو و همکاران برای مطالعه رفتار مکانیکی توده‌سنگ پیرامون محل تقاطع تونل‌های دوشاخه، از روش عددی تفاضل محدود برای در نظر گرفتن شرایط مختلف تونل‌سازی از جمله شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی زمین، امتیاز توده‌سنگ، عمق و زوایای مختلف محور تقاطع استفاده کردند و بر اساس تغییر زاویه تقاطع و پایداری توده‌سنگ، الگویی برای نصب سیستم نگهداری اضافی در محدوده ناپایدار محل تقاطع ارائه کردند [۵]. لیو و ونگ یک تونل انتقال آب را با رویکرد ریز-مدل^۳ و روش المان محدود الاستو-ویسکوپلاستیک مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج مدل با واقعیت نشان می‌دهد که این روش می‌تواند برای تخمین تغییرشکل‌ها و توزیع تنش پیرامون تونل‌های دوشاخه نتایج دقیق‌تری ارائه کند [۶]. گوا و همکاران با بررسی چندین تونل متقاطع در معادن عمیق زغال‌سنگ چین، تغییرشکل توده‌سنگ در محل تقاطع

دوشاخه با دهانه عریض را بررسی کردند. آن‌ها با توجه به ویژگی‌های مختلف تغییرشکل و فرآیندهای شکست در تقاطع‌های با دهانه عریض، مکانیزم‌ها و فرآیند شکست در محل تقاطع را با روش تفاضل محدود مدل‌سازی کرده و بر اهمیت پایه سنگی میانی به‌عنوان ناحیه حیاتی برای حفظ پایداری کل سازه تأکید کردند. آن‌ها تقویت این ستون میانی و حفظ یکپارچگی آن را مهم‌ترین عامل برای پایداری تقاطع‌های دوشاخه در معادن زیرزمینی دانسته و سیستم نگهداری بولت دوجهته یا دو سر درگیر^۴ را برای تقویت پایداری ستون میانی معرفی کردند [۷]. لی و همکاران به‌منظور درک رفتار مکانیکی توده‌سنگ و کنترل جابه‌جایی‌ها پس از حفاری تقاطع‌های دوشاخه در معادن زغال‌سنگ، از روش عددی تفاضل محدود استفاده کردند و زاویه برخورد انشعاب‌ها در محل تقاطع دوشاخه و زاویه بین تنش افقی و محور تونل را به‌عنوان عوامل اصلی مؤثر در پایداری تقاطع‌های دوشاخه معرفی کردند [۸]. لین و همکاران پایداری تقاطع دوشاخه در یک تونل انتقال آب واقع در یک ایستگاه برق-آبی را بررسی کردند. به‌این‌ترتیب که ابتدا عوامل اصلی پایداری شامل تغییرشکل‌های بسیار زیاد، تمرکز تنش و رهایی تنش^۵ را مطالعه کردند؛ سپس یک روش تحلیل پایداری غیرخطی برای طراحی سیستم‌های نگهداری تونل‌های دوشاخه با مقطع بزرگ و هندسه‌های پیچیده ارائه دادند. این روش مبتنی بر نتایج روش عددی تفاضل محدود حاصل از حل تنش‌های نرمال در آستر بتنی است [۹]. قارونی نیک و فرمهبینی فراهانی پایداری یک تقاطع Y-شکل در نیروگاه آبی سد رودبار را با استفاده از روش عددی تفاضل محدود بررسی کردند و بر اساس نتایج آن، محدوده نیازمند نصب نگهداری اضافی در محل تقاطع و تأثیر زاویه برخورد انشعاب‌ها در پایداری تقاطع را تعیین کردند [۱۰]. گلشنی و همکاران به‌منظور بررسی پایداری انشعاب تونل بزرگراه حکیم تهران، از روش عددی المان محدود استفاده کردند. بر اساس نتایج حاصل، ایجاد انشعاب در این تونل باعث افزایش نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر سیستم نگهداری تونل اصلی و همچنین افزایش ۲۹ درصدی نشست سطح زمین می‌شود [۱۱]. لیو و همکاران با مدل‌سازی عددی رفتار توده‌سنگ اطراف تقاطع T-شکل، نشان دادند که حفاری تونل دسترسی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر گسترش ناحیه پلاستیک تونل اصلی دارد؛ به‌طوری‌که با

پنج^۴ (تونل دسترسی MG5) ایجاد شده است، به‌عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام این پژوهش تحلیل پایداری سازه در محل تقاطع دوشاخه از طریق مطالعه میدان تنش‌های القایی، شدت تمرکز تنش و گسترده‌گی ناحیه پلاستیک پیرامون محل تقاطع است.

۲- معدن زغال‌سنگ پروده طبس

معدن زغال‌سنگ پروده طبس به‌عنوان اولین معدن مکانیزه ایران، در سال ۱۳۸۶ راه‌اندازی شده است و ظرفیت تولید سالانه آن حدود ۲٫۵ میلیون تن زغال‌سنگ خام است. این معدن در فاصله ۸۵ کیلومتری شهر طبس در استان خراسان جنوبی واقع شده است. ساختمان زمین‌شناسی ناحیه پروده از چند گسل بزرگ با راستای شرقی-غربی تشکیل شده است که به‌وسیله گسل‌های کوچک‌تر به مناطق مجزا تفکیک می‌شود [۱۹]. منطقه زغال‌خیز پروده از سمت غرب به گسل کل‌مرد و از سمت شرق به گسل نایبند محدود شده است که در راستای شمالی-جنوبی گسترش یافته‌اند. سنگ‌های منطقه اغلب از توالی لایه‌های لای‌سنگ (سیلت‌استون) و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. همچنین لایه‌های سنگ‌آهک نیز به‌صورت مقطعی قابل مشاهده است. لایه‌های اصلی زغال‌سنگ در ناحیه پروده طبس شامل لایه‌های B1، B2، C1، C2 و D است که لایه C1 از لحاظ ضخامت و پایداری مهم‌ترین لایه زغال‌سنگ این منطقه به شمار می‌رود [۲۰]. در شکل ۱ ستون زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است. سطح مقطع تونل در محدوده تقاطع دوشاخه به‌طور عمده از ماسه‌سنگ، لای‌سنگ و لای‌سنگ-ماسه‌ای تشکیل شده است و لایه زغال‌سنگ C2 نیز در سقف مشاهده شده است. فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه در جدول ۱ خلاصه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص شده است، تقاطع دوشاخه H16 یک تقاطع با سطح مقطع عریض و هندسه نامتقارن است که در عمق ۵۷۰ متری تونل شیب‌دار S2 را به تونل دسترسی MG5 تحت زاویه ۷۸ درجه متصل می‌کند. با توجه به طرح معدن و نیز عملیات استخراج معدن، سازه‌های مختلفی در اطراف تقاطع دوشاخه H16 وجود دارد که با حفاری هر تونل، تنش برجای منطقه دچار اغتشاش شده و موجب همپوشانی تنش‌های القایی می‌شود. همچنین عمق زیاد این تقاطع دوشاخه باعث ایجاد تنش‌های برجای

حفاری تونل دسترسی ناحیه پلاستیک اطراف تونل اصلی تا ۱٫۵ برابر قطر تونل دسترسی توسعه می‌یابد [۱۲]. ژو و همکاران باهدف بررسی تأثیر پارامترهای توده‌سنگ و سیستم نگهداری پیچ‌سنگ در میزان جابه‌جایی‌ها و ناحیه اغتشاش توده‌سنگ، از روش عددی المان محدود برای تحلیل پایداری تقاطع‌های دوشاخه استفاده کردند [۱۳]. مدل‌سازی تأثیر حفاری تونل انشعاب بر روی پایداری تونل اصلی نشان می‌دهد که پس از حفاری تونل انشعاب، سیستم نگهداری بتنی در تاج تونل اصلی در اثر نیروهای کششی نسبتاً شدید دچار ترک خوردگی شده است؛ درحالی‌که در محدوده دیواره تونل اصلی در نزدیکی تقاطع، تحت تأثیر نیروهای فشاری قرار می‌گیرد [۱۴]. ژو و همکاران پایداری یک تقاطع دوشاخه در معدن زغال‌سنگ را با استفاده از مشاهدات میدانی، درون گمانه‌ای، آزمایش‌های تنش برجا و مدل‌سازی تفاضل محدود بررسی کردند و سپس سیستم نگهداری متشکل از کابل‌های انکر تزریقی توخالی همراه با کابل‌های انکر با کشیدگی زیاد را به‌عنوان سیستم نگهداری اصلی معرفی نمودند [۱۵]. ژو و همکاران به‌منظور جلوگیری از ناپایداری و وقوع تغییرشکل‌های زیاد در محل تقاطع‌های دوشاخه معادن زغال‌سنگ، از مشاهدات میدانی و روش‌های تحلیلی و عددی استفاده کردند. بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی برای کنترل پایداری ستون سنگی میانی در محل تقاطع، از سیستم نگهداری انکر مقاومت ثابت با کنترل دوگانه که در آن کابل‌هایی با پیش‌تنیدگی زیاد و مقاومت ثابت به‌عنوان سیستم نگهداری اصلی به کار می‌رود، استفاده کردند [۱۶]. سان و همکاران برای رفع مشکل همگرایی شدید در محدوده تقاطع‌های دوشاخه در یک معدن زغال‌سنگ عمیق، پس از تحلیل عددی تفاضل محدود و انتخاب زاویه تقاطع و ترتیب حفاری بهینه، برای اولین بار کابل انکر با نسبت پواسون منفی^۶ را به‌عنوان سیستم نگهداری اصلی معرفی کردند [۱۷]. جیانگ و همکاران با استفاده از روش عددی المان محدود ویژگی‌های پاسخ لرزه‌ای و مکانیزم شکست تونل‌های دوشاخه را در محیط شهری بررسی کردند که نتایج حاصل حاکی از آسیب‌پذیری شدید دیواره میانی تقاطع‌های دوشاخه با افزایش شدت زمین‌لرزه است [۱۸].

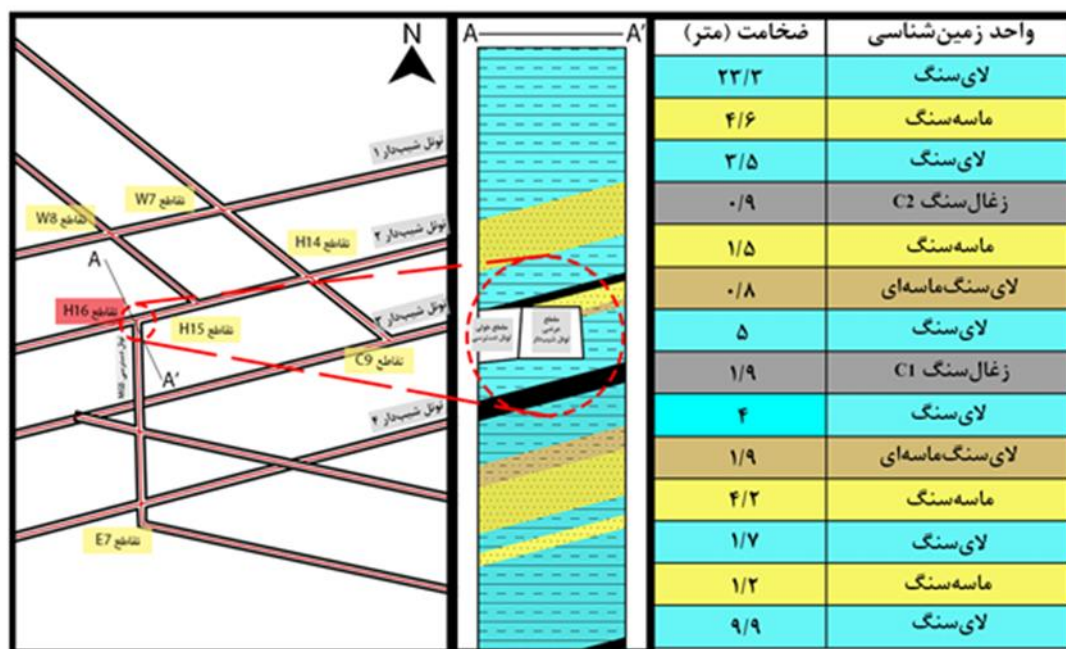
در این تحقیق، پایداری یکی از تقاطع‌های دوشاخه معدن زغال‌سنگ پروده طبس که در اثر تقاطع تونل شیب‌دار شماره دو^۷ (تونل شیب‌دار S2) و تونل دسترسی به گالری شماره

مقطع دوزنقه‌ای-شکل تعریض می‌شود که عرض آن به ۶٫۹ متر افزایش می‌یابد. پس از پایان عملیات حفاری تونل شیب‌دار در محل تقاطع، ادامه حفاری تونل شیب‌دار و تونل دسترسی به صورت هم‌زمان شروع می‌شود.

در محل تقاطع، هندسه تونل دسترسی از یک مقطع دوزنقه‌ای با اضلاع نامنظم تشکیل شده است که با افزایش فاصله از محل تقاطع، به صورت پیوسته سطح مقطع این تونل کاهش می‌یابد؛ به طوری که در ابتدا به یک مقطع دوزنقه‌ای با اضلاع منظم و پس از کاهش عرض تونل به مقدار ۵٫۶ متر به مقطع D-شکل تبدیل می‌شود. مراحل و ترتیب حفاری قبل، حین و بعد از تقاطع در شکل ۳ نشان داده شده است.

نسبتاً زیاد شده است که مقدار تنش قائم تا ۱۵ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر ۱٫۱۵ و سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز محدوده مورد مطالعه است. از طرف دیگر زاویه شیب تونل شیب‌دار S2 نسبت به خط افق حدود ۱۵ درجه و زاویه شیب تونل دسترسی MG5 نسبت به خط افق حدود ۶ درجه است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هندسه تونل شیب‌دار S2 از یک مقطع D-شکل تشکیل شده است که عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۵٫۶ و ۳٫۹۵ متر است. در محل تقاطع دوشاخه، مقطع تونل شیب‌دار به تدریج با افزایش عرض تونل از سمت دو دیواره چپ و راست، به یک سطح



شکل ۱: موقعیت سه‌بعدی تقاطع دوشاخه H16 و ستون زمین‌شناسی آن.

جدول ۱: خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه [۲۱]

واحد سنگی	چگالی (kg/m^3)	مدول تغییر شکل‌پذیری (GPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	نسبت پواسون
لای سنگ	۲۴۰۰	۱٫۲۶۸	۰٫۷۲	۱۸٫۲۳	۰٫۲۵
لای سنگ-ماسه‌ای	۲۶۰۰	۲٫۱۶۷	۰٫۲۱	۲۷٫۰۵	۰٫۲۵
ماسه سنگ	۲۷۰۰	۲٫۱۶۴	۱٫۲۲	۲۷٫۰۳	۰٫۲۵
زغال سنگ	۱۶۰۰	۰٫۶۲۱	۰٫۴۲	۱۱٫۸۳	۰٫۳۲

۳- تحلیل پایداری محل تقاطع دوشاخه

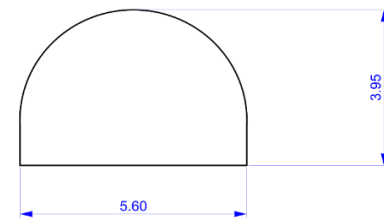
۳-۱- فرآیند مدل‌سازی

در این تحقیق از مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود در محیط نرم‌افزار FLAC3D استفاده شده است. برای اینکه شرایط مدل‌سازی به شرایط واقعی زمین نزدیک باشد، ابعاد مدل انتخابی به نحوی تعیین شده است که شرایط مرزی اعمال شده در رفتار کلی مدل کمترین تأثیر را داشته باشد؛ بنابراین ابعاد مدل در جهت‌های X، Y و Z به ترتیب ۱۰۰، ۷۰ و ۱۰۰ متر تعیین شده است (شکل ۴).

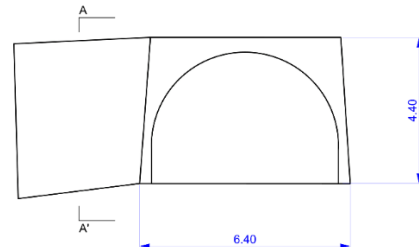
با توجه به اینکه بیشینه عرض تونل در محل تقاطع ۶٫۹ متر است، طبق اصل سنت و نانت ابعاد مدل در جهت محور Y، پنج برابر عرض تونل در هر دو سمت و در مجموع برابر ۷۰ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد مدل در جهت محور X و هم‌سو با جهت پیشروی تونل برابر ۱۰۰ متر است؛ به طوری که محل تقاطع در مرکز این محور قرار گرفته است. در نهایت ابعاد مدل در جهت محور Z برابر با ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است که به منظور لحاظ اندرکنش کف و سقف بلافاصله، به ترتیب ۳۰ متر از کف مدل و ۷۰ متر از سقف مدل لحاظ شده است. همچنین تأثیر آب‌های زیرزمینی در تحلیل عددی اعمال نشده و فقط تنش‌های برجا به‌عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شده است. در این مدل وزن روباره به‌صورت تنش قائم به مرز بالایی مدل اعمال شده و مرزهای جانبی مدل نسبت به جابه‌جایی افقی و همچنین مرز کف مدل نسبت به جابه‌جایی افقی و قائم ثابت شده است. همچنین نسبت تنش افقی به قائم معادل ۱/۱۵ و مدل رفتاری موهر-کولمب برای شبیه‌سازی وضعیت توده‌سنگ پیرامون سازه در نظر گرفته شده است.

۳-۲- سیستم نگهداری

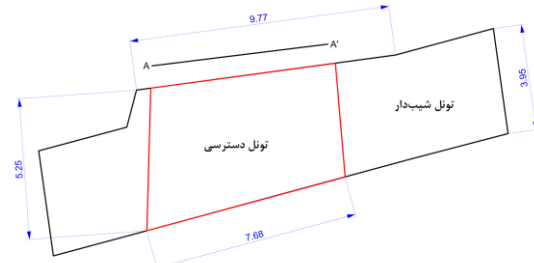
سیستم نگهداری تونل شیب‌دار متشکل از پیچ‌سنگ با قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۲٫۴ متر در یک آرایش منظم و با فاصله‌داری یک متر است که به‌صورت تمام‌طول با رزین تزریق شده و همراه با وایر مش نصب می‌شود. همچنین از قاب‌های فولادی کشویی TH36 با فاصله‌داری ۸۰۰ میلی‌متر برای تأمین پایداری تونل شیب‌دار S2 استفاده می‌شود؛ به صورتی که حدفاصل بین قاب فولادی و دیواره تونل با مواد پرکننده پوشانده می‌شود. با نزدیک شدن تونل شیب‌دار به محل تقاطع، به علت افزایش عرض دهانه و سطح مقطع تونل،



الف) مقطع عرضی D-شکل تونل شیب‌دار



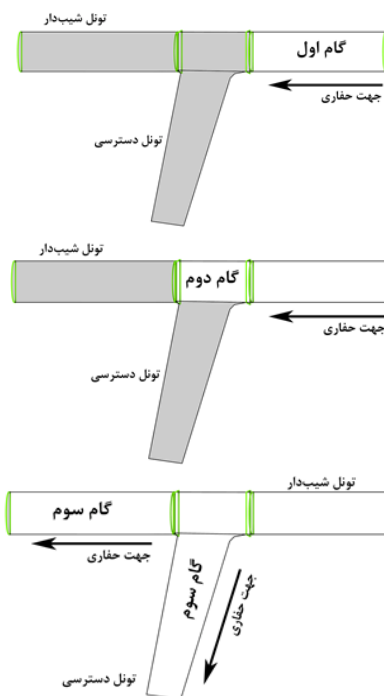
ب) مقطع عرضی دوزنقه‌ای محل تقاطع



ج) مقطع طولی تونل شیب‌دار

شکل ۲: مقاطع عرضی و طولی تونل‌ها در محل تقاطع دوشاخه

H16



شکل ۳: ترتیب و مراحل حفاری تونل‌ها در محل تقاطع دوشاخه H16 (دید از بالا).

شده است و المان ساختاری Cable برای مدل‌سازی کابل و فلکسی‌بولت‌ها استفاده شده است. در نهایت برای مدل‌سازی قاب‌های فولادی از المان Beam استفاده شده است.

جدول ۲: مشخصات سیستم نگهداری پیشنهادی [۲۱]

پارامتر	واحد	کابل‌انکر	فلکسی‌بولت	پیچ‌سنگ
قطر	(mm)	۴۲	۲۱٫۷	۲۲
طول	(m)	۹	۶	۲٫۴
مقاومت کششی	(kN)	۵۹۰	۴۹۰	۳۱۰
مقاومت فشاری	(kN)	-	-	۲۵۰
پیش‌تنیدگی	(kN)	۲۵۰	-	-
کرنش مجاز	(%)	-	-	۱۸
طول ناحیه انکراژ	(m)	۵	۴	۲٫۴
مواد تزریق		دوغاب	رزین	رزین

۳-۳- اعتبارسنجی مدل عددی

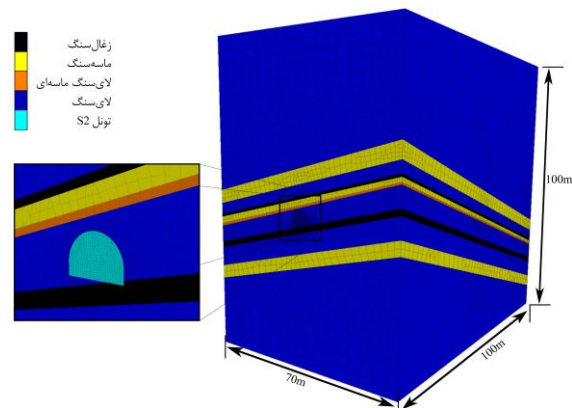
اعتبارسنجی مدل عددی برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی مسائل ژئوتکنیکی امری ضروری است که می‌تواند به بهبود دقت نتایج شبیه‌سازی عددی و قابلیت اطمینان آن کمک کند. در این تحقیق، به منظور اعتبارسنجی مدل عددی، نتایج جابه‌جایی‌ها در یکی از مقاطع عرضی در فاصله ۲۲ متری قبل از محل تقاطع در مدل عددی با نتایج میدانی حاصل از پایش جابه‌جایی‌ها در همین مقطع مقایسه شده است.

همان‌طور که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود، جابه‌جایی افقی نهایی مدل عددی در این مقطع و در موقعیت یک متری از کف تونل، معادل ۸۰۱ میلی‌متر است که با نتایج داده‌های میدانی حاصل از پایش رفتار توده‌سنگ پیرامون تونل در همین مقطع که بیشینه آن معادل ۸۸۴ میلی‌متر است (شکل ۶-ب)، تطابق نسبتاً خوبی دارد و مقدار خطای حدود ۹٫۳۸ درصد را نشان می‌دهد.

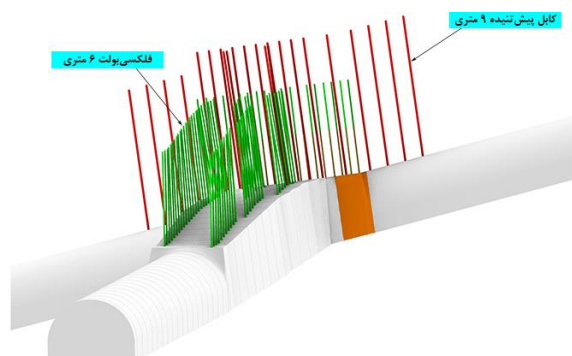
۳-۴- تحلیل تنش‌های القایی قائم

ابرنگاره^۹ توزیع تنش‌های قائم در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع تنش قائم با فاصله از دیواره سمت راست تونل شیب‌دار ابتدا افزایش یافته و در فاصله حدود ۱۴ متری از مرکز تقاطع شروع به کاهش می‌کند و سپس ثابت می‌شود. بیشینه تنش قائم در ناحیه تمرکز تنش به ۲۱٫۵ مگاپاسکال می‌رسد. با مقایسه منحنی‌های تراز در پیرامون

از سیستم نگهداری تقویت‌شده استفاده می‌شود؛ به طوری که در تونل شیب‌دار تا شعاع ۹ متری از مرکز تقاطع، پیچ‌سنگ‌هایی با طول ۲٫۷ متر و با آرایش متراکم‌تر نصب می‌شود. در محل تقاطع، انکرهای پیش‌تنیده ۹ متری، فلکسی‌بولت‌های ۶ متری و پیچ‌سنگ‌هایی با فاصله‌داری ۸۰۰ میلی‌متر به عنوان سیستم نگهداری استفاده شده است (شکل ۵).



شکل ۴: هندسه مدل عددی در نرم‌افزار FLAC3D.



شکل ۵: سیستم نگهداری پیشنهادی کابل‌انکر و فلکسی‌بولت در محل تقاطع دوشاخه.

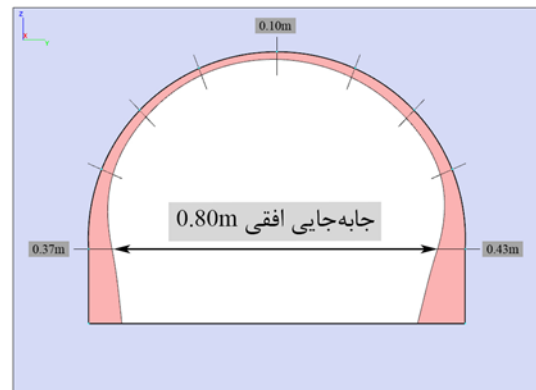
به علت افزایش سطح مقطع در محل تقاطع دوشاخه، از تیرهای IPB260 و IPB320 به جای قاب‌های فولادی کشویی استفاده شده است. آرایش پیچ‌سنگ‌های تزریقی در سقف و دیواره تونل دسترسی، دارای آرایش مربعی با فواصل ۸۰۰ میلی‌متر است. همچنین در این تونل از فلکسی‌بولت ۶ متری در سقف و قاب‌های فولادی IPB260 نیز به عنوان سیستم نگهداری استفاده شده است. خواص مکانیکی سیستم‌های نگهداری در جدول ۲ خلاصه شده است.

همه سیستم‌های نگهداری با استفاده از المان‌های ساختاری گوناگون در نرم‌افزار تعریف شده است. به این ترتیب که پیچ‌سنگ‌ها با استفاده از المان ساختاری Pile ساخته

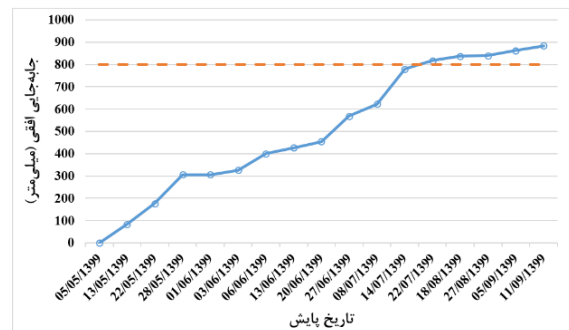
۱۴/۹ مگاپاسکال است، با نصب سیستم نگهداری حتی تا فاصله ۲۳ متر دورتر از مرکز تقاطع، تنش القایی قائم به مقدار اولیه نمی‌رسد. همچنین کانتورهای توزیع تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی در شکل ۹ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سمت چپ تقاطع دوشاخه در فاصله ۱۲ متری از گوشه تیز پایه میانی، مقدار تنش القایی قائم به بیشینه مقدار ۲۵/۵ مگاپاسکال می‌رسد. در حالی که در سمت راست تقاطع دوشاخه بیشینه تنش قائم به مراتب کمتر از تنش وارد بر پایه سنگی سمت چپ بوده ولی همچنان بیشتر از مقدار آن در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار است؛ به گونه‌ای که بیشینه مقدار این تنش قائم ۲۱/۷ مگاپاسکال بوده و در فاصله ۱۸/۵ متری از گوشه تقاطع به سمت تونل شیب‌دار ظاهر شده است. در شکل ۱۰ نیز کانتورهای تمرکز تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سمت چپ تقاطع دوشاخه ناحیه تمرکز تنش تا فاصله ۴۷ متری از گوشه تیز پایه سنگی همچنان ادامه دارد و تمرکز تنش در نزدیکی تونل شیب‌دار تا ۱/۶۵ و در نزدیکی تونل دسترسی تا ۱/۷۱ افزایش می‌یابد. همچنین در سمت راست تقاطع دوشاخه تمرکز تنش در نزدیکی تونل شیب‌دار تا ۱/۴۷ و در نزدیکی تونل دسترسی تا ۱/۷۲ افزایش می‌یابد؛ بنابراین با افزایش فاصله از محل تقاطع دوشاخه، تمرکز تنش بیشتری در تونل دسترسی رخ خواهد داد.

مقطع تونل مشخص می‌شود که تمرکز تنش در محل تقاطع با نصب سیستم نگهداری به‌طور مناسب کنترل می‌شود.



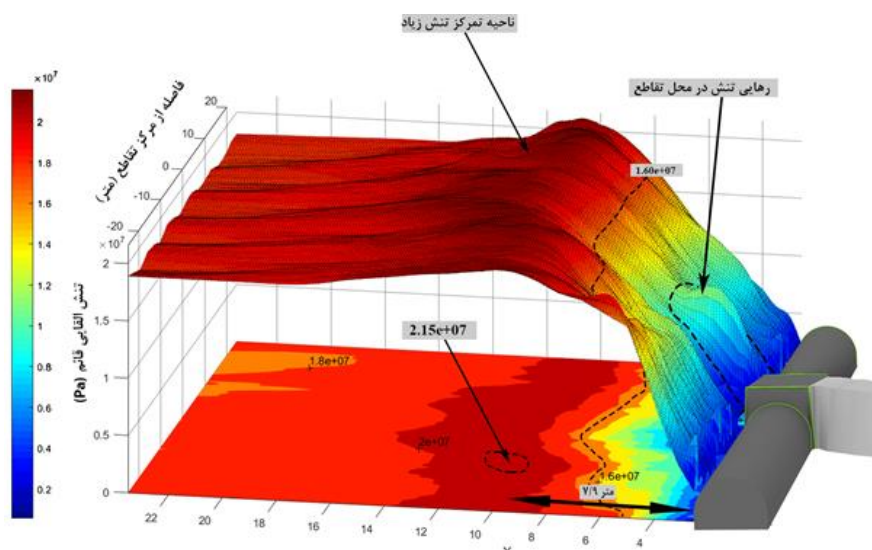
الف) جابه‌جایی افقی نهایی در مدل عددی



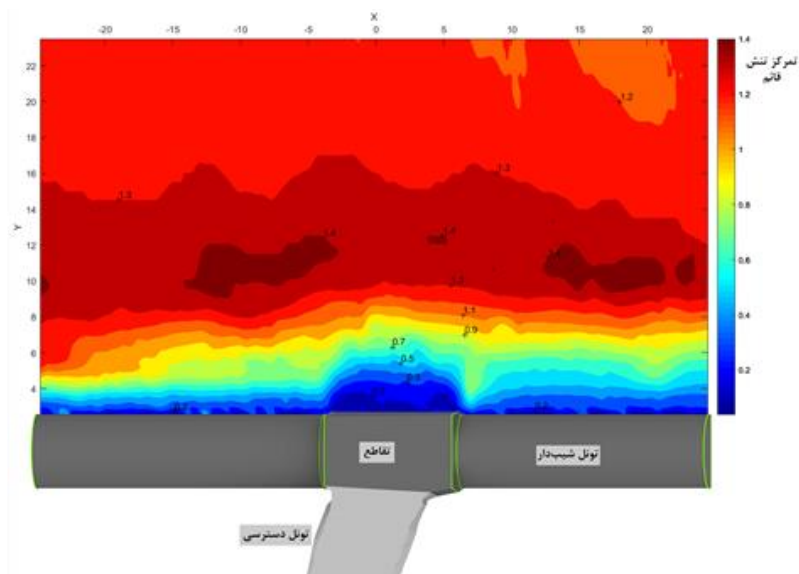
ب) جابه‌جایی افقی پایش شده در تونل نسبت به زمان

شکل ۶: جابه‌جایی افقی در مقطع عرضی مدل عددی نسبت به داده‌های رفتارنگاری تونل.

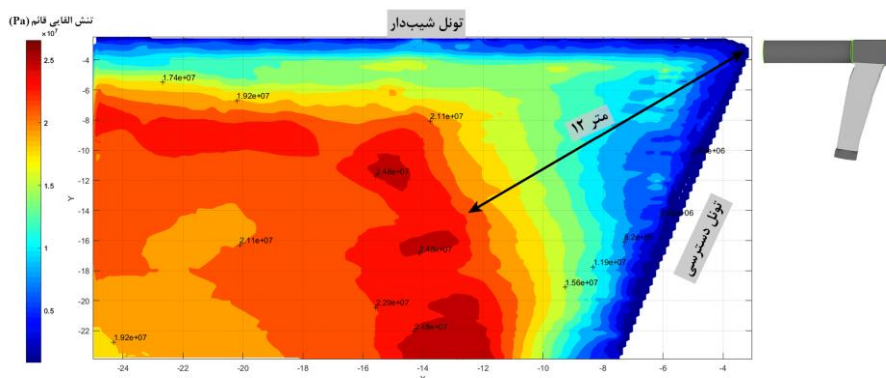
از طرف دیگر همان‌طور که در شکل ۸ مشخص شده است، بیشینه فاکتور تمرکز تنش قائم به مقدار ۱/۴ در فاصله حدود ۱۱ متر دورتر از مرکز تقاطع می‌رسد. همچنین با توجه به اینکه تنش قائم اولیه پیش از شروع حفاری تونل شیب‌دار



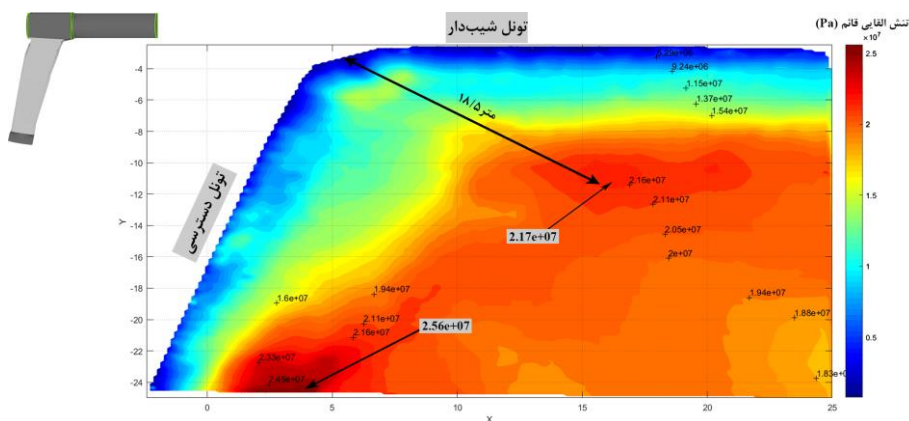
شکل ۷: ابرنگاره تنش‌های قائم در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار.



شکل ۸: فاکتور تمرکز تنش القایی قائم در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار (دید از بالا).

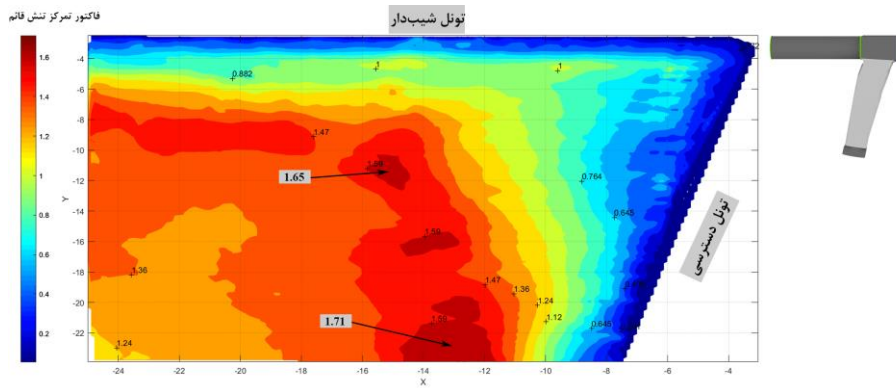


الف) سمت چپ تقاطع دوشاخه

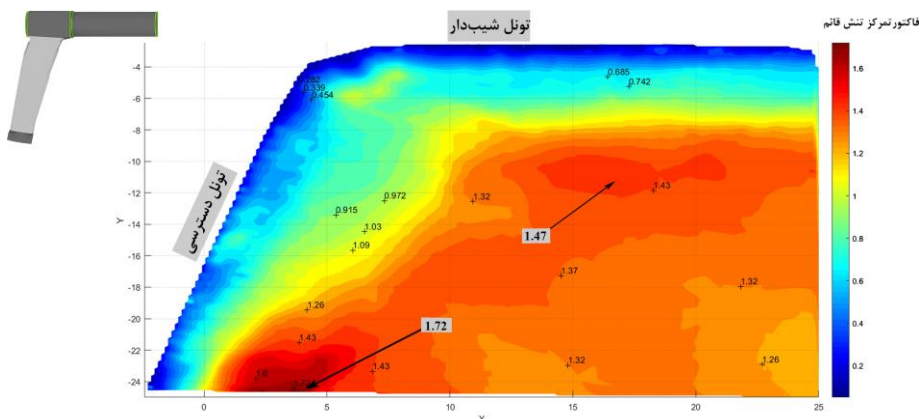


ب) سمت راست تقاطع دوشاخه

شکل ۹: کانتورهای توزیع تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی (دید از بالا).



الف) سمت چپ تقاطع دوشاخه



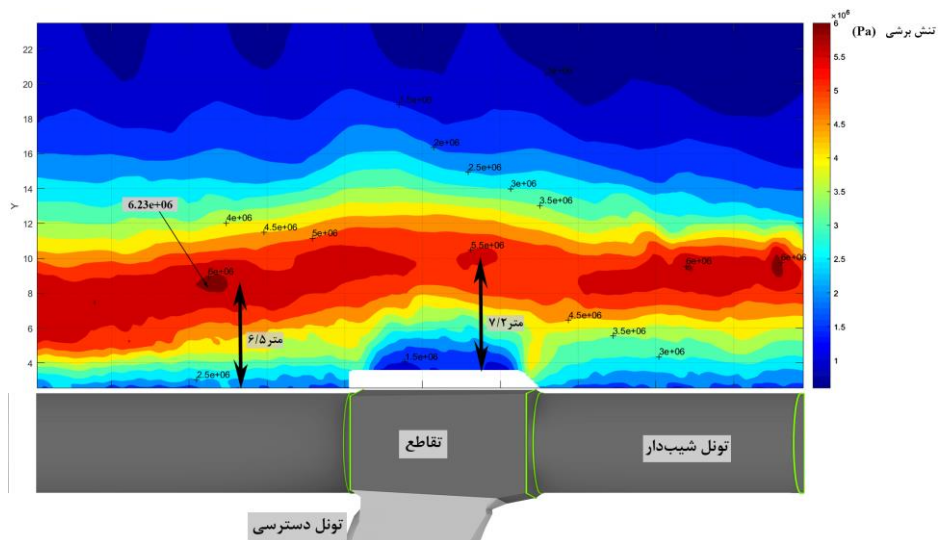
ب) سمت راست تقاطع دوشاخه

شکل ۱۰: کانتورهای تمرکز تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی (دید از بالا).

۳-۵- تحلیل تنش‌های برشی

است. با در نظر گرفتن مقطع طولی، بیشینه تنش برشی در محدوده تقاطع دوشاخه معادل ۵٫۵ مگاپاسکال و در توده‌سنگ اطراف تقاطع دوشاخه معادل ۶٫۲۳ مگاپاسکال است.

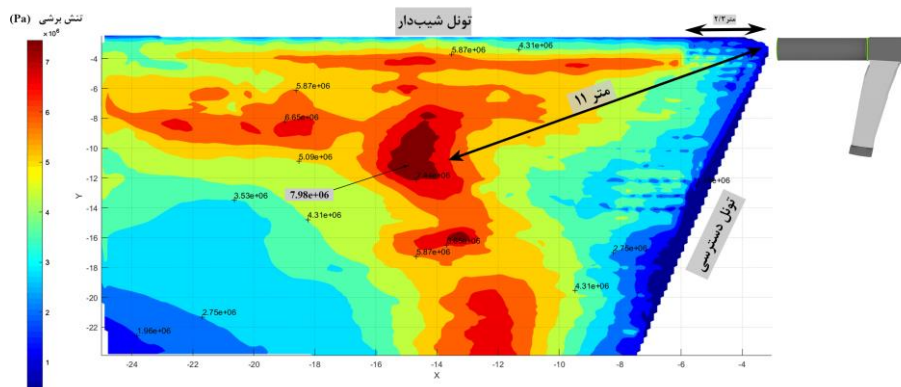
بر اساس منحنی تنش‌های برشی (شکل ۱۱)، بیشینه تنش برشی در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار ۶٫۲۳ مگاپاسکال و متمایل به سمت دیواره کوچک‌تر تونل شیب‌دار



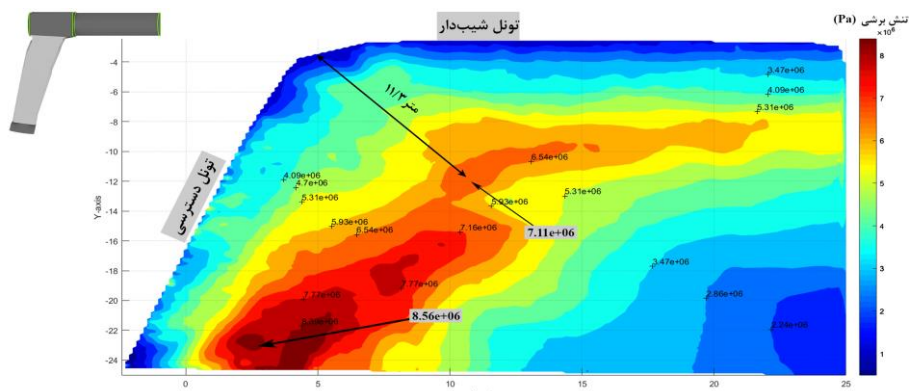
شکل ۱۱: منحنی تغییرات تنش برشی در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار (دید از بالا).

تنش برشی در فاصله ۱۱٫۳ متری از گوشه سمت راست تقاطع دوشاخه به ۷٫۱۱ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین روند تغییرات تنش‌های برشی در توده سنگ سمت راست در جهت تونل دسترسی افزایشی است؛ این در حالی است که در توده سنگ سمت چپ، تنش‌های برشی تمایل به توزیع متقارن‌تری نسبت به تونل شیب‌دار و تونل دسترسی دارند.

بر اساس منحنی‌های تنش برشی در توده سنگ سمت چپ تقاطع، تنش برشی در فاصله حدود ۱۲ متری از گوشه تیز تقاطع به ۷٫۹۸ مگاپاسکال می‌رسد (شکل ۱۲-الف). همچنین در فاصله کمتر از ۲ متری از گوشه تیز تقاطع، میدان تنش برشی به ۵٫۸۷ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان گفت که در پایه سنگی سمت چپ، شدت تمرکز تنش برشی بیشتر است. مطابق شکل ۱۲-ب مقدار



الف) سمت چپ تقاطع دوشاخه



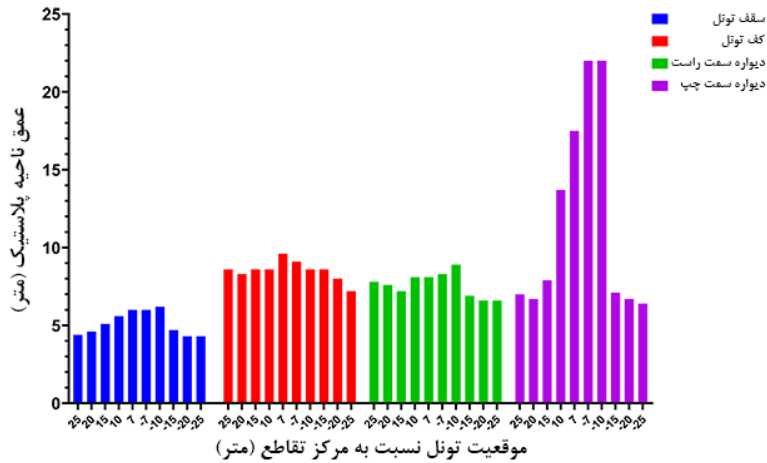
ب) سمت راست تقاطع دوشاخه

شکل ۱۲: منحنی تغییرات تنش‌های برشی در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی (دید از بالا).

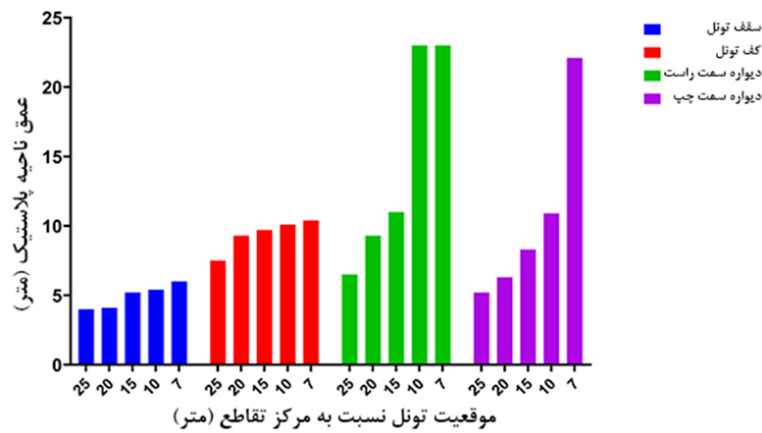
م تفاوت، ناحیه پلاستیک در فواصل مختلف از تقاطع تقریباً نامتقارن است. این پدیده در شکل ۱۵ با جانمایی لایه ضعیف زغال سنگ در فاصله ۲۰ متری از محل تقاطع مشخص شده است. با مقایسه فواصل مختلف و موقعیت لایه زغال سنگ نسبت به مقطع حفاری می‌توان نتیجه گرفت که گسترش ناحیه پلاستیک در صورت وجود لایه ضعیف در سقف مقطع حفاری کمتر از حالتی است که لایه ضعیف در کف مقطع حفاری باشد. به عبارت دیگر وجود لایه زغال سنگ در کف مقطع حفاری، منجر به تشدید گستردگی ناحیه پلاستیک و به تبع آن ناپایداری کف و بالازدگی آن در تونل‌ها و تقاطع دوشاخه خواهد بود.

۳-۶- ناحیه پلاستیک پیرامون تقاطع دوشاخه

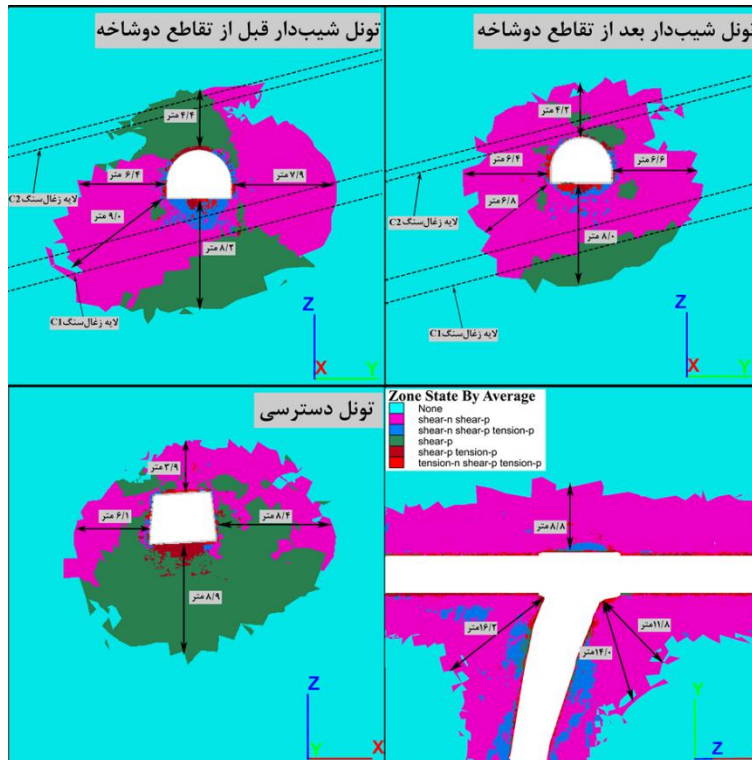
در شکل ۱۳ گسترش ناحیه پلاستیک در چهار محدوده شامل سقف تونل، کف تونل، دیواره سمت راست و دیواره سمت چپ ارائه شده است. در تونل شیب‌دار با افزایش فاصله از مرکز تقاطع، محدوده ناحیه پلاستیک در هر چهار بخش کاهش می‌یابد؛ ولی در دیواره سمت چپ تونل شیب‌دار به علت وجود انشعاب، عمق ناحیه پلاستیک بیشتر است. در تونل دسترسی نیز با افزایش فاصله از مرکز تقاطع، گسترش ناحیه پلاستیک مخصوصاً در دیواره‌ها به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد (شکل ۱۴). به علت وجود لایه‌هایی با مقاومت



شکل ۱۳: گسترش ناحیه پلاستیک در تونل شیب‌دار نسبت به موقعیت مرکز تونل.



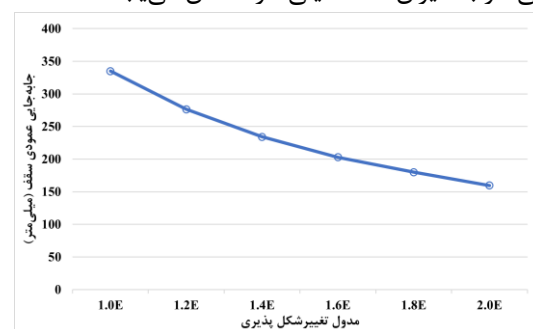
شکل ۱۴: گسترش ناحیه پلاستیک در تونل دسترسی نسبت به موقعیت مرکز تونل.



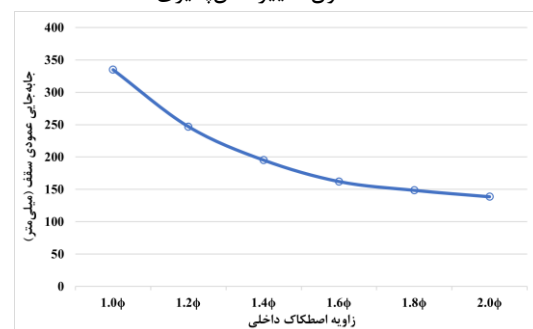
شکل ۱۵: ناحیه پلاستیک در فواصل ۲۰ متری از مرکز تقاطع دوشاخه.

۳-۷- تحلیل حساسیت

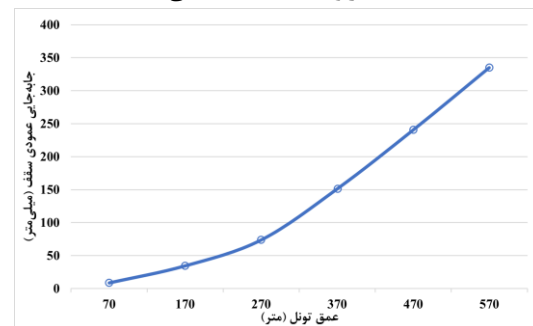
با توجه به تأثیر پارامترهای ورودی مدل عددی بر نتایج آن، در این تحقیق اثر تغییر سه پارامتر ورودی شامل مدول تغییر شکل‌پذیری، زاویه اصطکاک داخلی و عمق تونل بر روی بیشینه جابه‌جایی قائم سقف تقاطع مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۶-الف نشان داده شده است، مدل‌سازی حالت‌های متفاوت مدول تغییر شکل‌پذیری با در نظر گرفتن آهنگ رشد ۲۰ درصدی، حاکی از کاهش میزان جابه‌جایی قائم سقف با افزایش مدول تغییر شکل‌پذیری است؛ به طوری که با افزایش ۱۰۰ درصدی مدول تغییر شکل‌پذیری میزان جابه‌جایی سقف از حدود ۳۳۴ میلی‌متر به میزان ۱۵۹ میلی‌متر کاهش می‌یابد.



الف) مدول تغییر شکل‌پذیری



ب) زاویه اصطکاک داخلی



ج) عمق تونل

شکل ۱۶: تغییرات جابه‌جایی قائم در سقف تقاطع برحسب سه پارامتر ورودی.

جهت بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر نتایج جابه‌جایی، جابه‌جایی قائم سقف با در نظر گرفتن آهنگ رشد ۲۰ درصدی، محاسبه و نتایج آن در شکل ۱۶-ب ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ۱۰۰ درصدی زاویه اصطکاک داخلی، مقدار جابه‌جایی قائم از مقدار ۳۳۴ میلی‌متر به ۱۳۸ میلی‌متر کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر با افزایش عمق تونل، میزان جابه‌جایی سقف نیز به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در عمق ۵۷۰ متری جابه‌جایی قائم سقف ۳۳۴ میلی‌متر و در عمق ۷۰ متری جابه‌جایی قائم کمتر از ۱۰ میلی‌متر به‌دست‌آمده است (شکل ۱۶-ج). واضح است که در تمامی موارد با افزایش مدول تغییر شکل‌پذیری و زاویه اصطکاک داخلی، جابه‌جایی‌های قائم در مدل عددی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق تونل جابه‌جایی بیشینه افزایش و در نتیجه پایداری تقاطع کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور تحلیل پایداری تقاطع دوشاخه H16 در معدن زغال‌سنگ پروده طبس، تنش‌های القایی قائم و برشی و نیز ناحیه پلاستیک اطراف محل تقاطع با استفاده از روش عددی تفاضل محدود تجزیه و تحلیل شده است. نتایج اصلی به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- سیستم نگهداری پیشنهادی شامل دو بخش سیستم نگهداری فعال و سیستم نگهداری غیرفعال است. سیستم نگهداری فعال شامل پیچ‌سنگ‌های تمام تزریقی، انکرهای ۹ متری و فلکسی بولت‌های ۶ متری است. با نصب این سیستم نگهداری پس از حفاری تونل و اعمال پیش‌تنیدگی لازم در انکرهای بلند، علاوه بر بهبود یکپارچگی توده‌سنگ اطراف تونل، ظرفیت خودنگهداری توده‌سنگ نیز افزایش خواهد یافت. سیستم نگهداری غیرفعال نیز شامل قاب‌های فولادی صلب است که برای افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های شدید تونل نصب می‌شود.
- پس از حفاری تقاطع دوشاخه، توده‌سنگ بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی در سمت چپ تقاطع متحمل بیشترین اغتشاش تنش می‌شود؛ به طوری که بیشینه تنش القایی قائم آن ۱/۷۱ برابر تنش قائم قبل از حفاری است. پس از آن توده‌سنگ بین تونل

می‌تواند گزینه مناسبی برای تأمین پایداری تقاطع دوشاخه باشد. تأثیر وجود آب بر شرایط پایداری توده‌سنگ پیرامون تونل و لایه زغال‌سنگ نیز برای بررسی در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

سیاسگزاری

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

مراجع

- [1] Chortis, F., & Kavvadas, M. Three-Dimensional Numerical Analyses of Perpendicular Tunnel Intersections. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1771-1793. (2020)
- [2] Tan, Z., Zhou, Z., Kong, H., Zhao, B., & Zhao, J. Single excavation face method for super-large-span bifurcated tunnels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 1-13. (2021)
- [3] Wang, J., Cao, A., Li, Z., et al. Mechanical Behavior and Excavation Optimization of a Small Clear-Distance Tunnel in an Urban Super Large and Complex Underground Interchange Hub. *Applied Sciences*, 13(1). (2022)
- [4] Singh, R. N., Porter, I., & Hematian, J. Finite element analysis of three-way roadway junctions in longwall mining. *International Journal of Coal Geology*, 45(2-3), 115-125. (2001)
- [5] Hsiao, F. Y., Wang, C. L., & Chern, J. C. Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1), 14-21. (2009)
- [6] Liu, X., & Wang, Y. Three Dimensional Numerical Analysis of Underground Bifurcated Tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(4), 447-455. (2010)
- [7] Guo, Z., Shi, J., Wang, J., Cai, F., & Wang, F. Double-directional control bolt support technology and engineering application at large span Y-type intersections in deep coal mines. *Mining Science and Technology (China)*, 20(2), 254-259. (2010)
- [8] Li, G., He, M., Zhang, G., & Tao, Z. Deformation mechanism and excavation process of large span intersection within deep soft rock roadway. *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 28-34. (2010)

شیب‌دار و تونل دسترسی در سمت راست تقاطع و سپس دیواره سمت راست تونل شیب‌دار به ترتیب با تمرکز تنش قائم ۱/۶۵ و ۱/۴ اغتشاش تنش کمتری را تجربه می‌کنند.

(۳) تنش‌های برشی نیز همانند تنش‌های قائم از روند مشابهی پیروی می‌کنند؛ به‌طوری‌که بیشینه تنش برشی در توده‌سنگ بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی سمت چپ تقاطع، سمت راست تقاطع و دیواره سمت راست تونل شیب‌دار به ترتیب معادل ۷/۹۸، ۷/۱۱ و ۶/۲۳ مگاپاسکال است.

(۴) روند توزیع تنش‌ها در توده‌سنگ بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی به‌صورت گنبدی-شکل در ابتدا افزایش و سپس به‌تدریج کاهش می‌یابد. این نکته حائز اهمیت است که با توجه به وسعت زیاد ناحیه اغتشاش تنش در توده‌سنگ پیرامون تقاطع، مرحله کاهش در این روند با شیب کمتری اتفاق می‌افتد.

(۵) با افزایش فاصله از مرکز تقاطع دوشاخه، گسترش ناحیه پلاستیک در هر دو تونل شیب‌دار و دسترسی کاهش می‌یابد.

(۶) وجود لایه‌های شیب‌دار با مقاومت متفاوت موجب می‌شود که ناحیه پلاستیک در اطراف فضای حفاری به‌صورت نامتقارن پدیدار شود؛ به‌طوری‌که وجود لایه ضعیف در سقف مقطع حفاری خیلی در گسترش ناحیه پلاستیک تأثیرگذار نیست؛ درحالی‌که وجود لایه زغال‌سنگ در کف مقطع حفاری منجر به تشدید گستردگی ناحیه پلاستیک و به‌تبع آن ناپایداری کف و بالازدگی آن در تونل‌ها و تقاطع دوشاخه می‌شود. به‌منظور مقابله با جابه‌جایی‌های زیاد و ناپایداری تقاطع‌ها در این معدن چند مورد از اقدامات قابل‌اجرا به شرح ذیل پیشنهاد می‌شود. برای کنترل بالازدگی در تونل‌ها، حفاری قوس معکوس و یا تغییر مقطع تونل به‌صورت دایره‌ای-شکل همراه با نصب سیستم نگهداری در کف تونل‌ها پیشنهاد می‌شود. برای کنترل جابه‌جایی‌های ناشی از حفاری تونل دسترسی، کاهش گام حفاری باهدف کنترل تنش‌های القایی پیرامون تقاطع پیشنهاد می‌شود. برای کنترل تغییرشکل‌های ناشی از تنش‌های القایی، مطالعه رفتار تونل پس از تغییر مقطع حفاری به‌ویژه به‌صورت دایره‌ای-شکل پیشنهاد می‌شود. همچنین بررسی امکان اجرای حفاری بخشی به‌جای حفاری تمام مقطع در محدوده تقاطع

- intersections of large-scale variable cross-section roadways in deep soft rock. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1). (2022)
- [16] Xu, H., Zhang, Y., Yang, J., et al. 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. (2022)
- [17] Sun, X.-m., Qi, Z.-m., Zhang, Y., Miao, C.-y., Zhao, C.-w., & He, M.-c. 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. (2023)
- [18] Jiang, J., Tao, R., Hesham El Naggar, M., Liu, H., & Du, X. Seismic performance and vulnerability analysis for bifurcated tunnels in soft soil. *Computers and Geotechnics*, 167. (2024)
- [19] (IRITEC), (2003). Tabas Coal Mine Project, detailed design report (Vol. 1, pp. 464).
- [20] Mahdevari, S., Shahriar, K., Sharifzadeh, M., & Tannant, D. D. Stability prediction of gate roadways in longwall mining using artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 28(11), 3537-3555. (2016)
- [21] Tabas engineering technical. office. (2023). engineering report.
- [9] Lin, P., Zhou, Y., Liu, H., & Wang, C. Reinforcement design and stability analysis for large-span tailrace bifurcated tunnels with irregular geometry. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 189-204. (2013)
- [10] Nik, M. G., & Farahani, A. F. 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). (2016)
- [11] Golshani, A., Joneidi, M., & Majidian, S. 3D numerical modeling for construction of tunnels intersections- case study of Hakim tunnel. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(43), 1523-1527. (2016)
- [12] Liu, H.-l., Li, S.-c., Li, L.-p., & Zhang, Q.-q. Study on deformation behavior at intersection of adit and major tunnel in railway. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2459-2466. (2017)
- [13] Zhou, D., Ding, W., Xie, D., & Chen, S. 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). (2020)
- [14] Gkikas, V. I., & Nomikos, P. P. Primary Support Design for Sequentially Excavated Tunnel Junctions in Strain-Softening Hoek-Brown Rock Mass. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1997-2018. (2020)
- [15] Xie, S., Wu, Y., Chen, D., Liu, R., Han, X., & Ye, Q. Failure analysis and control technology of

¹ Bifurcation

² Three-way

³ Sub model

⁴ Double directional control bolt

⁵ Stress release

⁶ Negative Poisson's Ratio

⁷ Slope 2 (S2)

⁸ Main Gate 5 access (MG5)

⁹ Nephogram