



نشریه روش های تحلیلی و عددی



در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: <http://anm.yazd.ac.ir/>

(مقاله پژوهشی)

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

چکیده

به علت پیچیدگی طرح شبکه تونل ها در معادن زیرزمینی معمولاً در این معادن تقاطع های مختلفی وجود دارد که پایداری آنها اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق، پایداری یکی از تقاطع های دوشاخه معدن زغال سنگ پروده طبس که در اثر تقاطع تونل شیبدار 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 گسترده گی 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 شیبدار 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 شیبدار و تونل دسترسی، تمرکز تنش در سمت چپ تقاطع دوشاخه در نزدیکی تونل شیبدار 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 ۷/۹۸ و ۷/۱۱ 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 گسترده گی ناحیه پلاستیک و به تبع آن ناپایداری کف و بالا زدگی آن می شود.

کلمات کلیدی

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

۱- مقدمه

با پیشرفت روزافزون جامعه، نیاز به احداث سازه‌های زیرزمینی به ویژه در حین آماده‌سازی شبکه معادن زیرزمینی به طور گسترده‌ای افزایش یافته است. بر اساس نوع کاربرد سازه عمرانی و یا طرح معدن، برخی از تونل‌ها به ناچار به صورت 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 هر گونه 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 به عنوان 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 به منظور 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 به عنوان 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. به این ترتیب 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 به منظور 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؛ به طوریکه با حفاری تونل دسترسی ناحیه پلاستیک اطراف تونل اصلی تا ۱/۵ برابر قطر تونل دسترسی توسعه می‌یابد [۱۲]. ژو و همکاران با هدف

پژوهش تحلیل پایداری سازه در محل تقاطع دوشاخه از طریق مطالعه میدان تنش‌های القایی، شدت تمرکز تنش و گستردگی ناحیه پلاستیک پیرامون محل تقاطع است.

۲- معدن زغال سنگ پروده طبس

معدن زغال سنگ پروده طبس به عنوان اولین معدن مکانیزه ایران، در سال ۱۳۸۶ راه‌اندازی شده است و ظرفیت تولید سالانه آن حدود ۲٫۵ میلیون تن زغال سنگ 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 به وسیله گسل‌های کوچک‌تر به مناطق مجزا تفکیک می‌شود [۱۹]. منطقه زغال خیز 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 لای سنگ (سیلت‌استون) و ماسه سنگ تشکیل شده است. همچنین لایه‌های سنگ آهک نیز به صورت مقطعی قابل مشاهده است.

لایه‌های اصلی زغال سنگ در ناحیه پروده طبس شامل لایه‌های B1، B2، C1، C2 و D است که لایه C1 از لحاظ ضخامت و پایداری مهم‌ترین لایه زغال سنگ 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 به طور عمده از ماسه سنگ، لای سنگ و لای سنگ-ماسه‌ای تشکیل شده است و لایه زغال سنگ C2 نیز در سقف مشاهده شده است. خواص 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 شبیدار 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 بر جای منطقه دچار اغتشاش شده و موجب همپوشانی تنش‌های القایی می‌شود. همچنین عمق زیاد این تقاطع دوشاخه باعث ایجاد تنش‌های برجای نسبتاً زیاد شده است که مقدار تنش قائم تا ۱۵ مگاپاسکال می‌رسد.

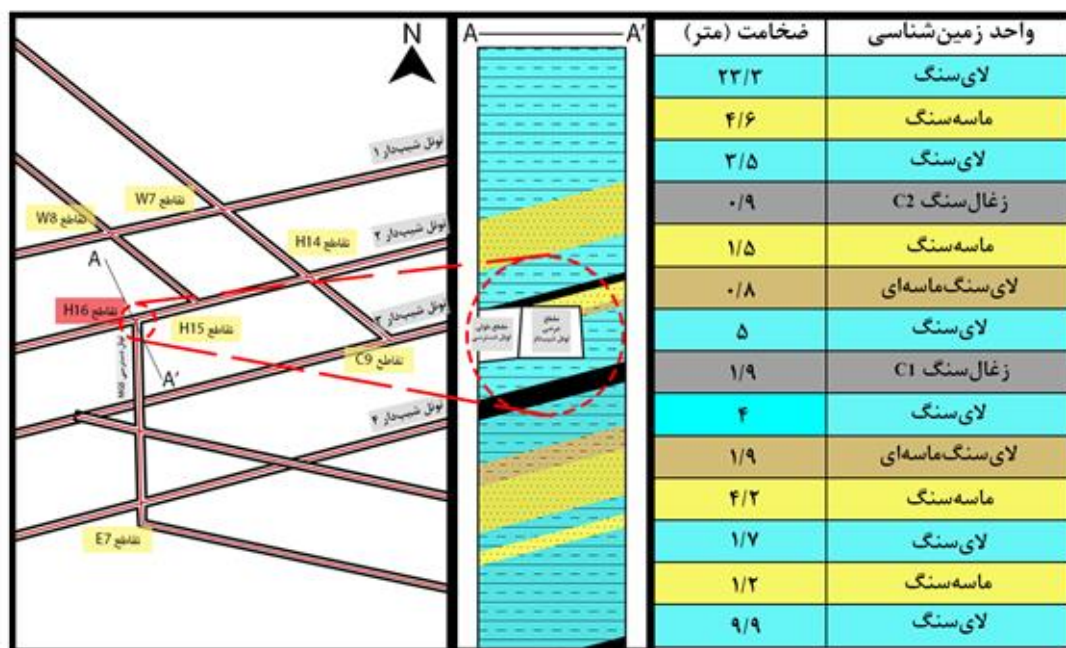
بررسی تأثیر پارامترهای توده‌سنگ و سیستم نگهداری پیچ‌سنگ در میزان جابه‌جایی‌ها و ناحیه اغتشاش توده‌سنگ، از روش عددی المان محدود برای تحلیل پایداری تقاطع‌های دوشاخه استفاده کردند [۱۳]. مدل‌سازی تأثیر حفاری تونل انشعاب بر روی پایداری تونل اصلی نشان می‌دهد که پس از حفاری تونل انشعاب، سیستم نگهداری بتنی در تاج تونل اصلی در اثر نیروهای کششی نسبتاً شدید دچار ترک خوردگی شده است؛ در حالی که در محدوده دیواره تونل اصلی در نزدیکی تقاطع، تحت تأثیر نیروهای فشاری قرار می‌گیرد [۱۴]. ژئ و همکاران پایداری یک تقاطع دوشاخه در معدن زغال سنگ 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 به عنوان سیستم نگهداری اصلی معرفی نمودند [۱۵]. ژو و همکاران به منظور جلوگیری از ناپایداری و وقوع تغییر شکل‌های زیاد در محل تقاطع‌های دوشاخه معدن زغال سنگ، 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 به عنوان سیستم نگهداری اصلی به کار می‌رود، استفاده کردند [۱۶]. سان و همکاران برای رفع مشکل همگرایی شدید در محدوده تقاطع‌های دوشاخه در یک معدن زغال سنگ 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 به عنوان 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 زغال سنگ پروده طبس که در اثر تقاطع تونل شبیدار شماره دو^۷ (تونل شبیدار S2) و تونل دسترسی به گالری شماره پنج^۸ (تونل دسترسی MG5) ایجاد شده است، به عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام این

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.

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.

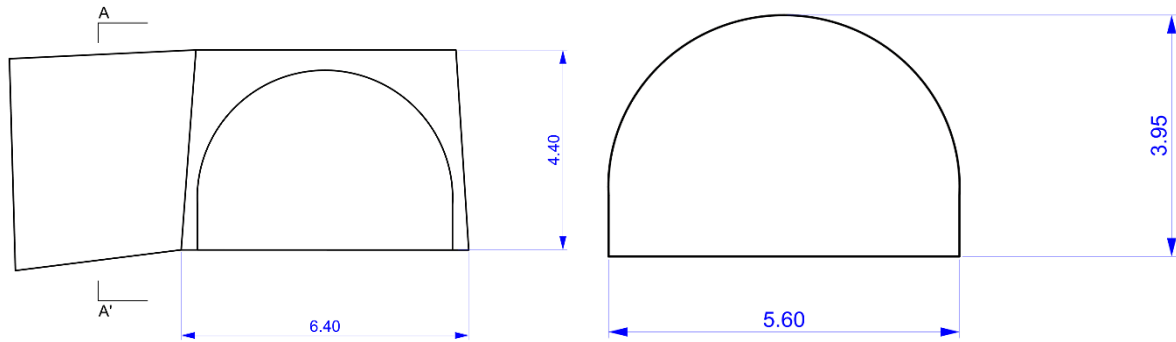
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هندسه تونل شیب‌دار S2 از یک مقطع D-شکل تشکیل شده است که عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۵/۶ و ۳/۹۵ متر است. در محل تقاطع دوشاخه، مقطع تونل شیب‌دار به تدریج با افزایش عرض تونل از سمت دو دیواره چپ و راست، به یک سطح مقطع دوزنقه‌ای-شکل تعریض می‌شود که عرض آن به ۶/۹ متر



شکل ۱ - موقعیت سه بعدی تقاطع دوشاخه H16 و ستون زمین‌شناسی آن

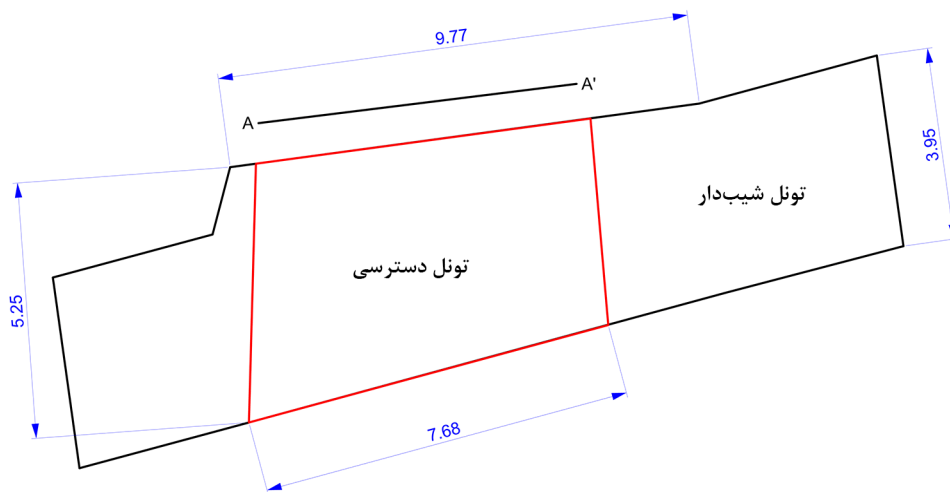
جدول ۱ - خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه [۲۱]

واحد سنگی	چگالی (kg/m^3)	مدول تغییر شکل پذیری (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



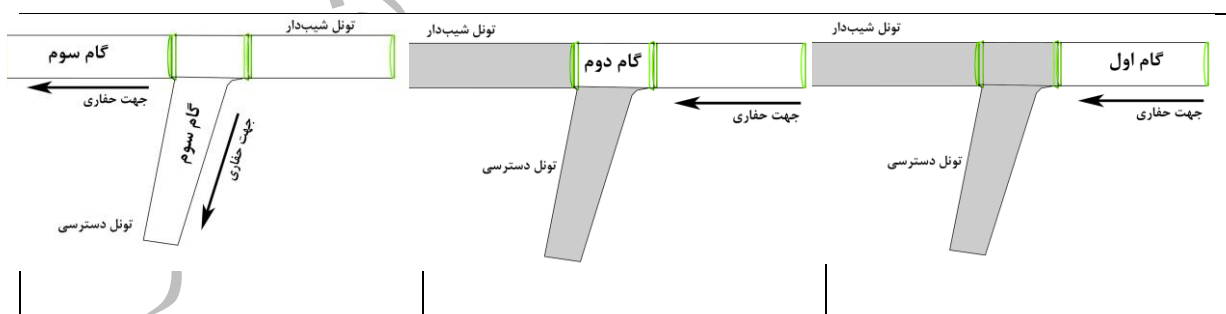
الف) مقطع عرضی دوزنقه‌ای محل تقاطع

الف) مقطع عرضی D-شکل تونل شیبدار



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)

۳- تحلیل پایداری محل تقاطع دوشاخه

۳-۱- فرآیند مدل‌سازی

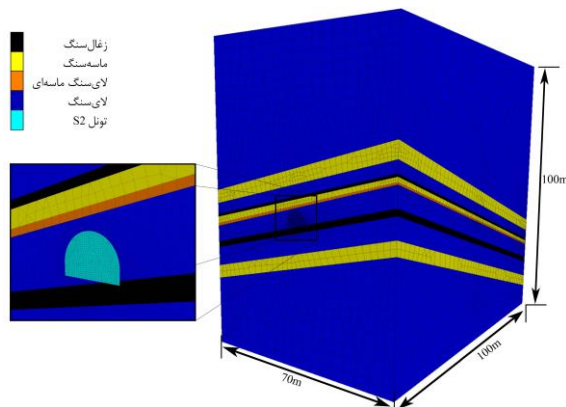
در این تحقیق از مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود در محیط نرم‌افزار FLAC3D استفاده شده است. برای اینکه شرایط مدل‌سازی به شرایط واقعی زمین نزدیک باشد، ابعاد مدل انتخابی به نحوی تعیین شده است که شرایط مرزی اعمال شده در رفتار کلی مدل کمترین تأثیر را داشته باشد؛ بنابراین ابعاد مدل در جهت‌های X، Y و Z به ترتیب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

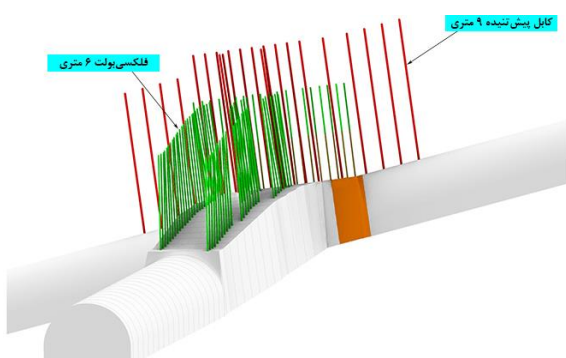
۳-۲- تعریف سیستم‌های نگهداری

سیستم نگهداری تونل شبیدار 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 شبیدار S2 استفاده می‌شود؛ به صورتی که حدفاصل بین قاب فولادی و دیواره تونل با مواد پرکننده پوشانده می‌شود. با نزدیک‌شدن تونل شبیدار به

محل تقاطع، به علت افزایش عرض دهانه و سطح مقطع تونل، از سیستم نگهداری تقویت‌شده استفاده می‌شود؛ به طوری که در تونل شبیدار 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 کابل انکر 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.

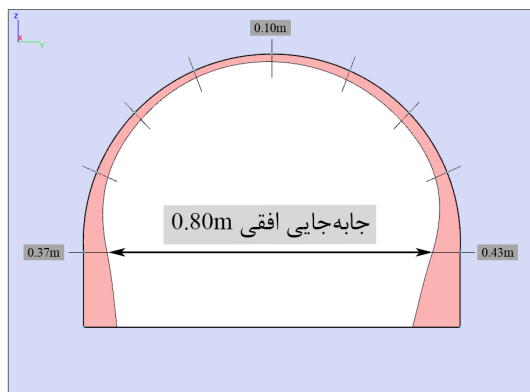
است و المان ساختاری Cable برای مدل سازی کابل و فلکسی بولت ها استفاده شده است. در نهایت برای مدل سازی قاب های فولادی از المان Beam استفاده شده است.

همه سیستم های نگهداری با استفاده از المان های ساختاری گوناگون در نرم افزار تعریف شده است. به این ترتیب که پیچ سنگ ها با استفاده از المان ساختاری Pile ساخته شده

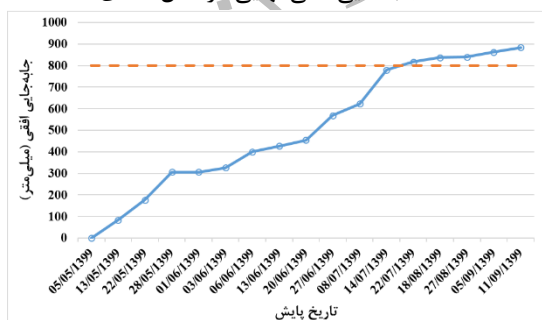
جدول ۲ - مشخصات سیستم نگهداری پیشنهادی [۲۱]

پارامتر	واحد	کابل انکر سقف	فلکسی بولت سقف	پیچ سنگ
قطر	(mm)	۴۲	۲۱٫۷	۲۲
طول	(m)	۹	۶	۲٫۴
مقاومت کششی	(kN)	۵۹۰	۴۹۰	۳۱۰
مقاومت فشاری	(kN)	-	-	۲۵۰
پیش تنیدگی	(kN)	۲۵۰	-	-
کرنش مجاز	(درصد)	-	-	۱۸
طول ناحیه انکراژ (باند)	(m)	۵	۴	۲٫۴
مواد تزریق		دوغاب سیمان	رزین	رزین

می رسد. با مقایسه منحنی های تراز در پیرامون مقطع تونل مشخص می شود که تمرکز تنش در محل تقاطع با نصب سیستم نگهداری پیشنهادی به طور مناسب کنترل می شود.



الف) جابه جایی افقی نهایی در مدل عددی



ب) جابه جایی افقی پایش شده در تونل نسبت به زمان

شکل ۶ - جابه جایی افقی در مقطع عرضی مدل عددی نسبت به داده های رفتارنگاری تونل

از طرف دیگر همان طور که در شکل ۸ مشخص شده است، بیشینه فاکتور تمرکز تنش قائم به مقدار ۱٫۴ در فاصله حدود

۳-۳- اعتبارسنجی مدل عددی

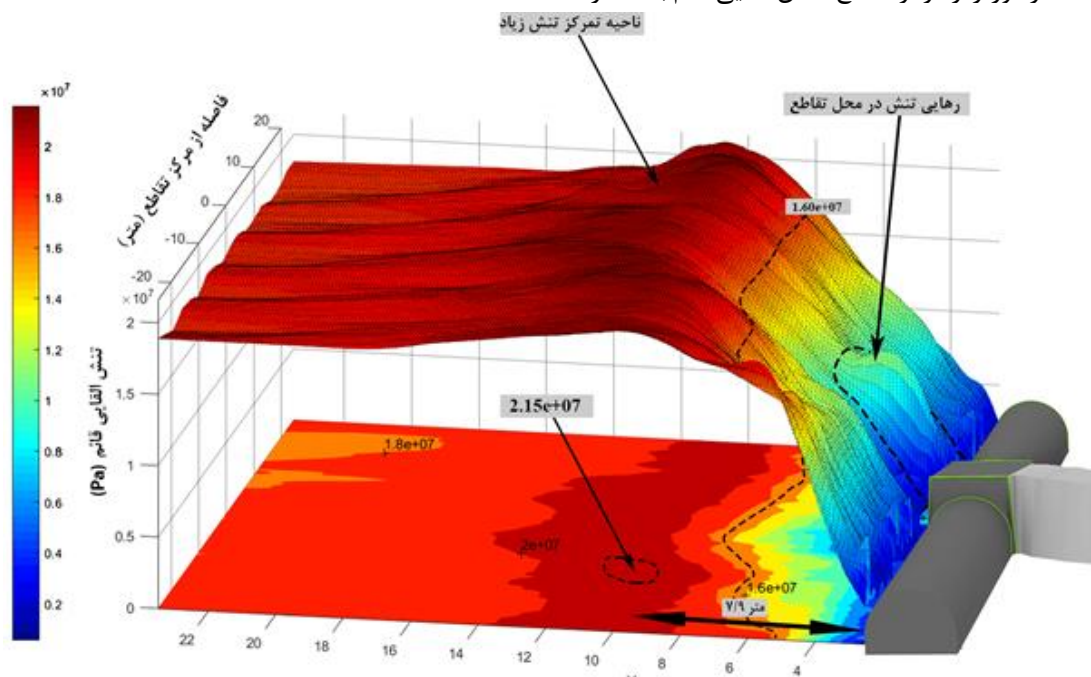
اعتبارسنجی مدل عددی برای ارزیابی دقت شبیه سازی مسائل ژئوتکنیکی امری ضروری است که می تواند به بهبود دقت نتایج شبیه سازی عددی و قابلیت اطمینان آن کمک کند. در این تحقیق، به منظور اعتبارسنجی مدل عددی، نتایج جابه جایی ها در یکی از مقاطع عرضی در فاصله ۲۲ متری قبل از محل تقاطع در مدل عددی با نتایج میدانی حاصل از پایش جابه جایی ها در همین مقطع مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۶-الف مشاهده می شود، جابه جایی افقی نهایی مدل عددی در این مقطع و در موقعیت یک متری از کف تونل، معادل ۸۰۱ میلی متر است که با نتایج داده های میدانی حاصل از پایش رفتار توده سنگ پیرامون تونل در همین مقطع که بیشینه آن معادل ۸۸۴ میلی متر است (شکل ۶-ب)، تطابق نسبتاً خوبی دارد و مقدار خطای حدود ۹٫۳۸ درصد را نشان می دهد.

۳-۴- تحلیل تنش های القایی قائم

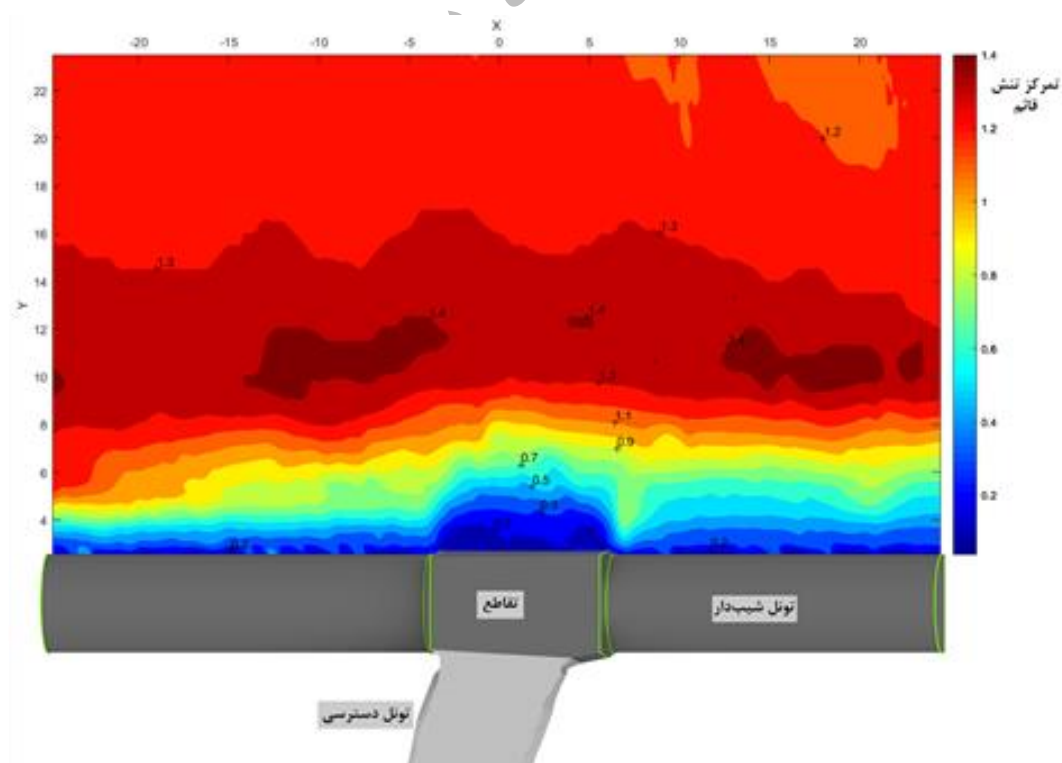
ابرنگاره^۹ توزیع تنش های قائم در دیواره سمت راست تونل شیبدار در شکل ۷ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، توزیع تنش قائم با فاصله از دیواره سمت راست تونل شیبدار ابتدا افزایش یافته و در فاصله حدود ۱۴ متری از مرکز تقاطع شروع به کاهش می کند و سپس ثابت می شود. بیشینه تنش قائم در ناحیه تمرکز تنش به ۲۱٫۵ مگاپاسکال

اولیه نمی‌رسد. همچنین کانتورهای توزیع تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیبدار و تونل دسترسی در شکل ۹ نشان داده شده است.

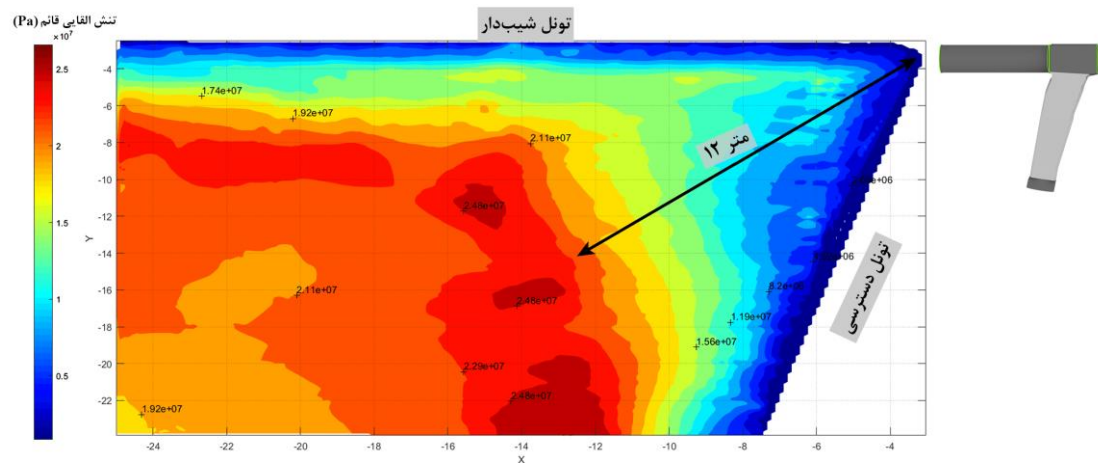
۱۱ متر دورتر از مرکز تقاطع می‌رسد. همچنین با توجه به اینکه تنش قائم اولیه پیش از شروع حفاری تونل شیبدار ۱۴/۹ مگاپاسکال است، با نصب سیستم نگهداری حتی تا فاصله ۲۳ متر دورتر از مرکز تقاطع، تنش القایی قائم به مقدار



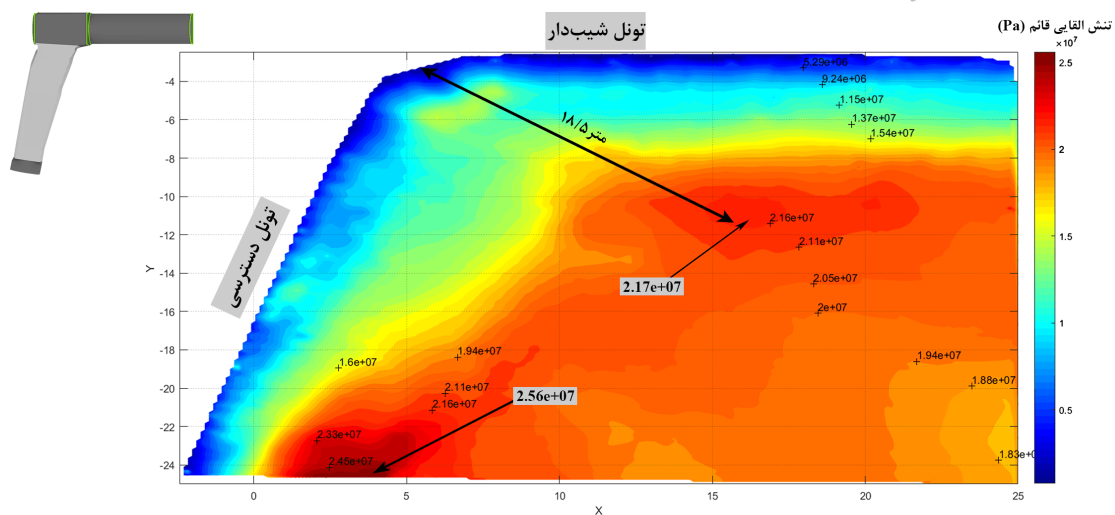
شکل ۷ - ابرنگاره تنش‌های قائم در دیواره سمت راست تونل شیبدار



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)

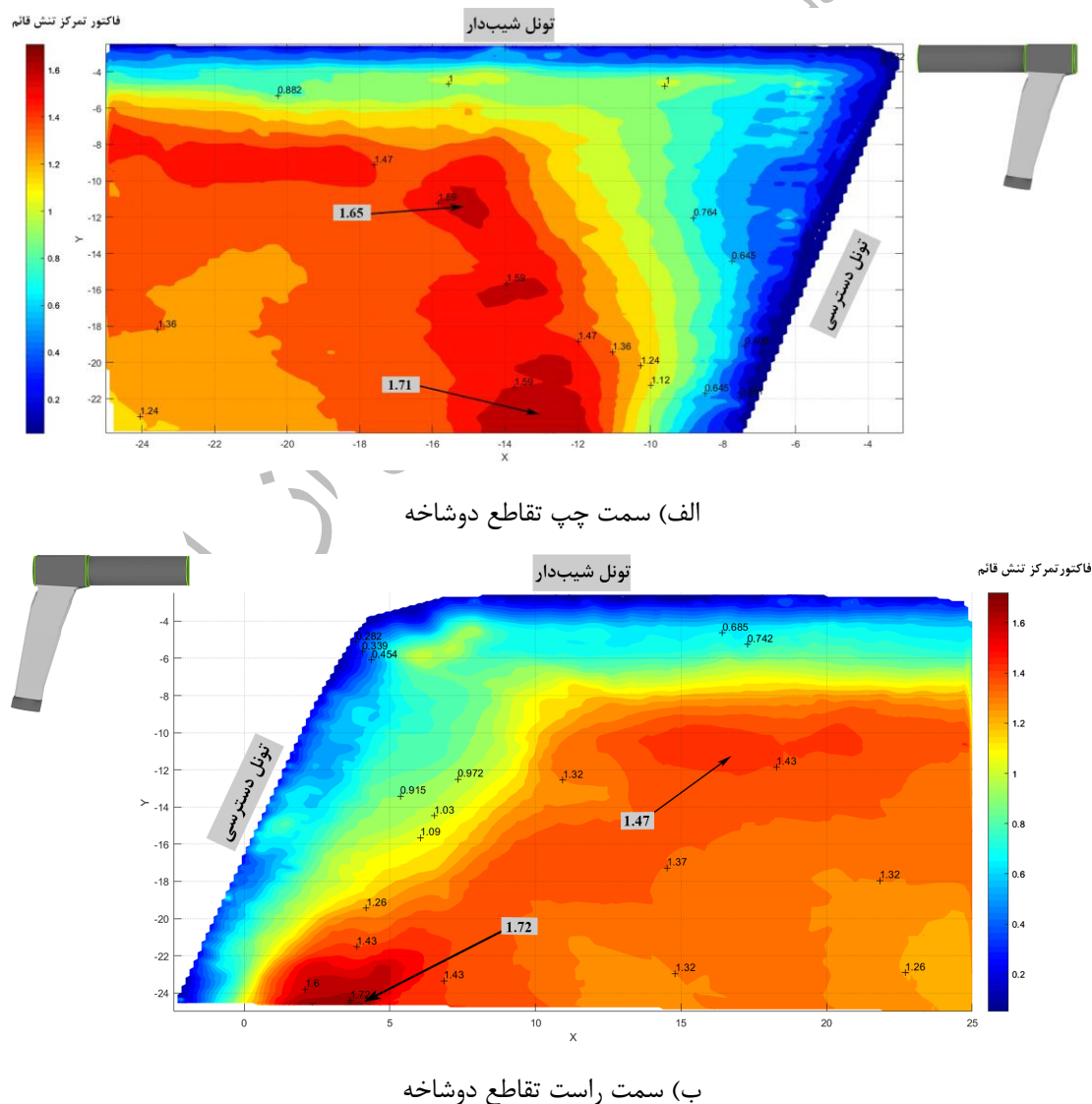
دوشاخه ناحیه تمرکز تنش تا فاصله ۴۷ متری از گوشه تیز پایه سنگی همچنان ادامه دارد و تمرکز تنش در نزدیکی تونل شیب‌دار تا ۱/۶۵ و در نزدیکی تونل دسترسی تا ۱/۷۱ افزایش می‌یابد. همچنین در سمت راست تقاطع دوشاخه تمرکز تنش در نزدیکی تونل شیب‌دار تا ۱/۴۷ و در نزدیکی تونل دسترسی تا ۱/۷۲ افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش فاصله از محل تقاطع دوشاخه، تمرکز تنش بیشتری در تونل دسترسی رخ خواهد داد. برای وضوح بیشتر، نمای سه‌بعدی تنش‌های القایی قائم در هر دو سمت تقاطع دوشاخه نیز در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. با توجه به منحنی‌های توزیع تنش، سطح تنش قائم در توده‌سنگ سمت چپ که در محل تقاطع زاویه کمتری دارد، به مراتب بالاتر از سمت

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 القایی 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.

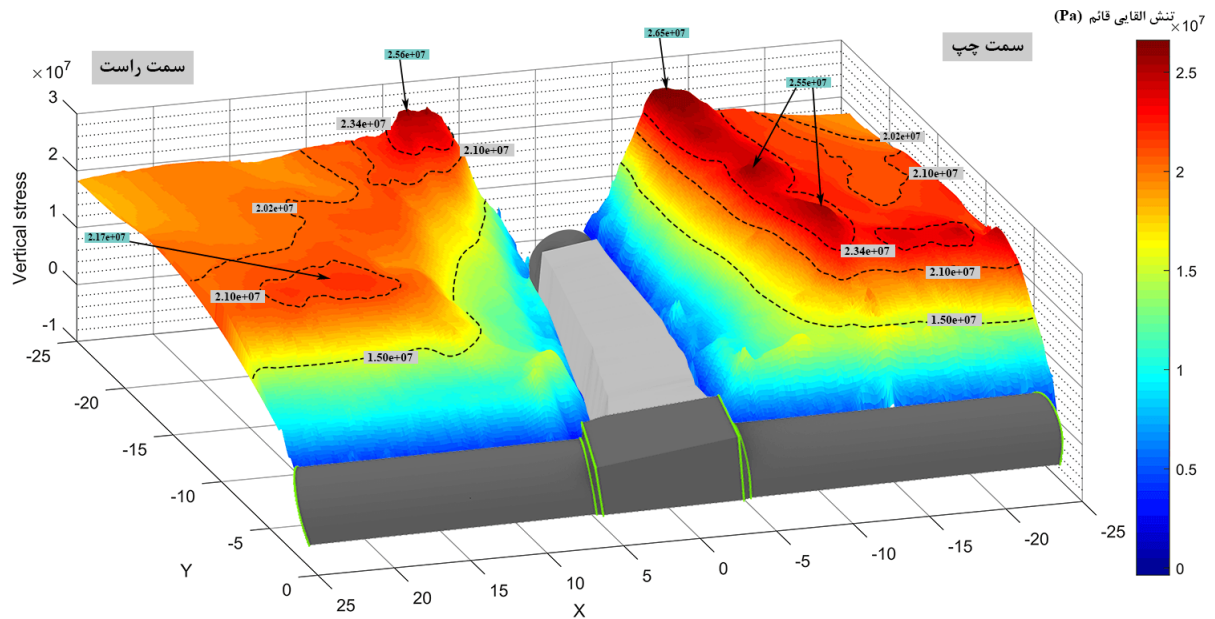
در شکل ۱۰ نیز کانتورهای تمرکز تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سمت چپ تقاطع

دیواره سمت راست تونل شیب‌دار در فاصله حدود ۶ متری از لبه سقف تونل، تنش القایی قائم به مقدار اولیه خود می‌رسد؛ اما این روند افزایشی همچنان ادامه دارد است و به بیش از ۱۸ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین در سقف سمت زاویه بسته، در فاصله کمتر از ۳ متر تنش اصلی به مقدار اولیه خود می‌رسد و همچنان به روند افزایشی خود ادامه می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سقف تونل شیب‌دار و محل تقاطع به سمت تونل دسترسی به علت نصب سیستم نگهداری پیشنهادی شاهد رهایی تنش است که مقدار حداقل تنش قائم در این محدوده به ۷۶۹ کیلوپاسکال می‌رسد. در سقف تونل دسترسی با دور شدن از محل تقاطع، سطح تنش‌ها روند افزایشی دارد که می‌تواند به دلیل سطح مقطع غیرممدور و عریض آن باشد.

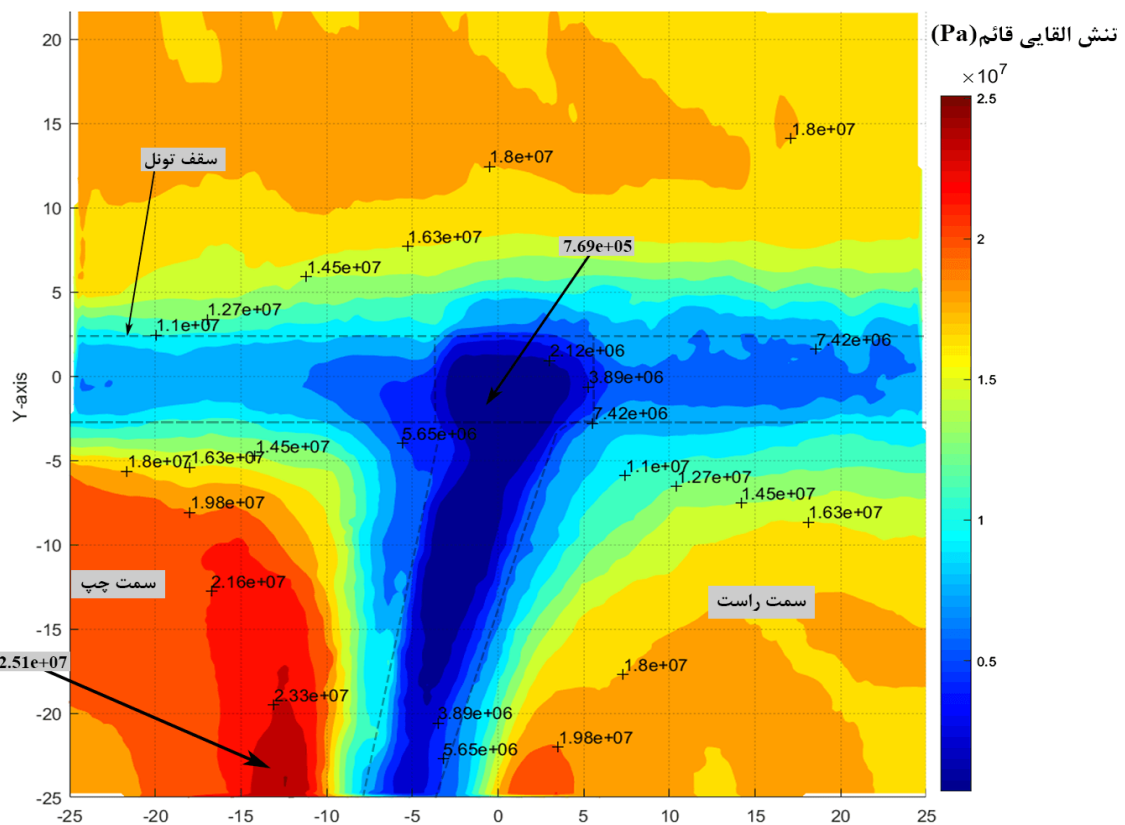
راست است. علاوه بر این، محدوده حداکثر تنش القایی قائم در سمت چپ نسبت به مقدار متناظر در سمت راست، در فاصله نزدیک‌تری از گوشه تیز تقاطع اتفاق می‌افتد؛ همچنین مقدار بیشینه و وسعت ناحیه با توزیع تنش شدیدتر در سمت چپ بیشتر است. به طور کلی روند تغییرات تنش‌های القایی قائم، در ابتدا به صورت پیوسته افزایشی بوده و سپس با دور شدن از تقاطع کاهش و سپس ثابت می‌شود؛ به طوری که به صورت کانتورهای هم‌تراز و گنبدی-شکل دارای یک مقدار بیشینه بوده و به تدریج با گسترش گنبد، کاهش می‌یابد. در شکل ۱۲ منحنی‌های تنش قائم در فاصله ۱/۵ متر بالاتر از سقف تقاطع دوشاخه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنش قائم در لبه سقف تونل شیب‌دار حدود ۱۱ مگاپاسکال است و روند متفاوتی را در هر سه سمت چپ، راست و دیواره سمت راست تونل شیب‌دار طی می‌کند. در



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



شکل ۱۱ - نمای سه بعدی تنش‌های القایی قائم در هر دو سمت تقاطع دوشاخه



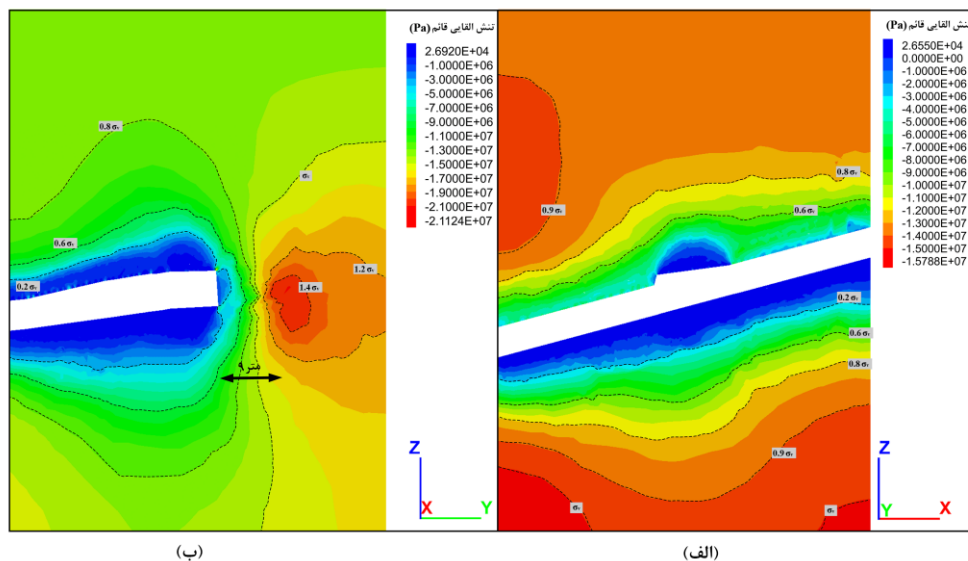
شکل ۱۲ - منحنی‌های تنش القایی قائم در فاصله ۱٫۵ متر بالاتر از سقف محل تقاطع دوشاخه (دید از بالا)

شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳-الف مشاهده می‌شود، سیستم نگهداری پیشنهادی در مقابل بالازدگی کف و کنترل

در شکل ۱۳ میدان تنش‌های القایی قائم در صفحات موازی پیشروی تونل در هر دو تونل شیبدار و دسترسی نشان داده

این مقطع سطح تنش پایین‌تری را تجربه می‌کند. همچنین بیشینه تنش قائم در فاصله ۹ متری از دیواره سمت راست تونل شیبدار اتفاق می‌افتد.

جابه‌جایی‌های سقف مناسب است. با توجه به شکل ۱۳-ب مشخص می‌شود که گوشه‌های تیز در مقطع دوزنقه‌ای تمرکز تنش زیادی را تحمل می‌کند؛ در حالی که دیواره و سقف در



شکل ۱۳ - منحنی‌های تنش القایی قائم در صفحه موازی پیشروی تونل؛ (الف) تونل شیبدار (ب) تونل دسترسی

۵-۳- تحلیل تنش‌های برشی

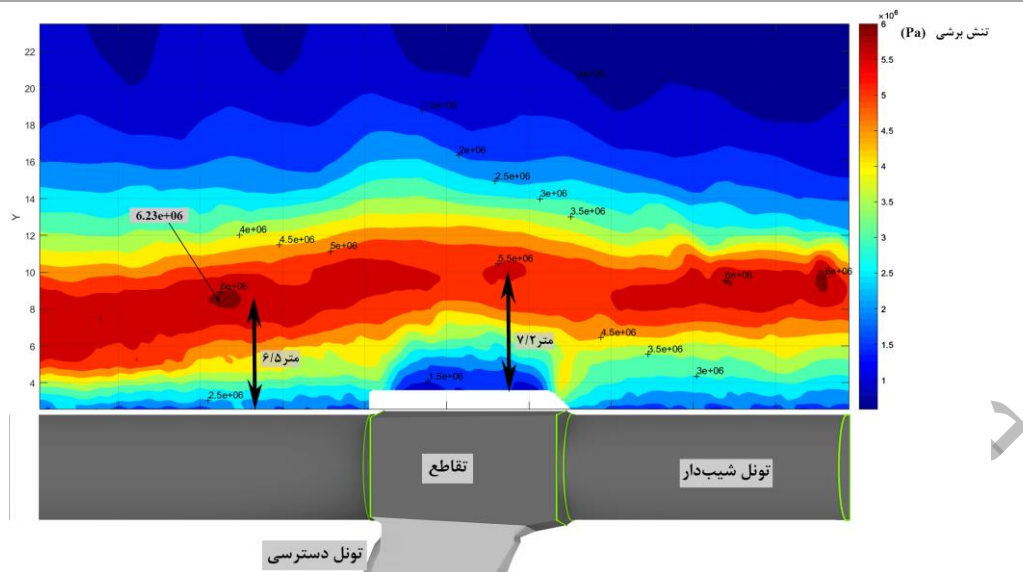
۶-۳- ناحیه پلاستیک پیرامون تقاطع دوشاخه

در شکل ۱۶ گسترش ناحیه پلاستیک در چهار محدوده شامل سقف تونل، کف تونل، دیواره سمت راست و دیواره سمت چپ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، 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 به طور پیوسته کاهش می‌یابد (شکل ۱۷).

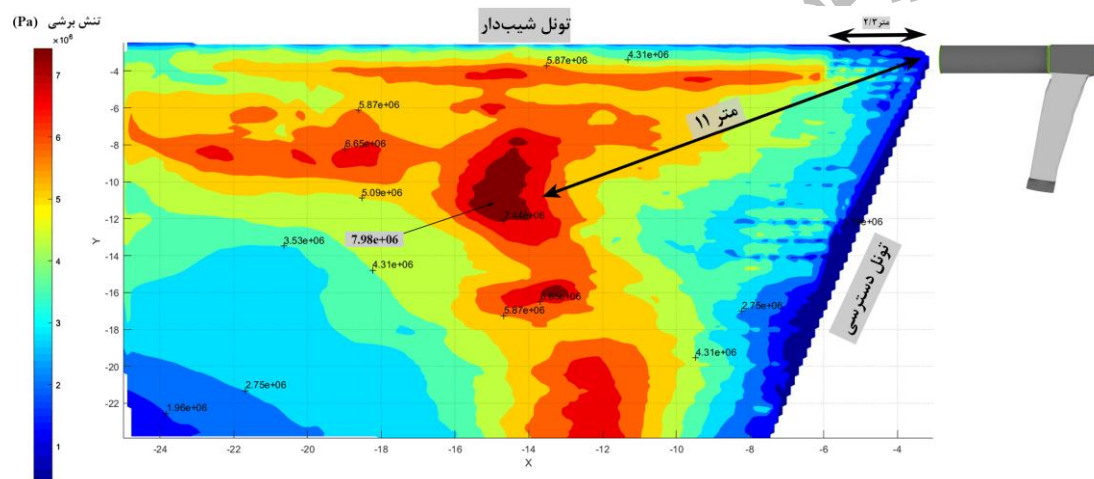
به علت وجود لایه‌هایی با مقاومت متفاوت، ناحیه پلاستیک در فواصل مختلف از تقاطع تقریباً نامتقارن است. این پدیده در شکل ۱۸ با جانمایی لایه ضعیف زغال‌سنگ در فاصله ۲۰ متری از محل تقاطع مشخص شده است. با مقایسه فواصل مختلف و موقعیت لایه ضعیف زغال‌سنگ نسبت به مقطع حفاری می‌توان نتیجه گرفت که گسترش ناحیه پلاستیک 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 زغال‌سنگ 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.

بر اساس منحنی تنش‌های برشی (شکل ۱۴)، بیشینه تنش برشی در دیواره سمت راست تونل شیبدار ۶/۲۳ مگاپاسکال و متمایل به سمت دیواره کوچکتر تونل شیبدار 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.

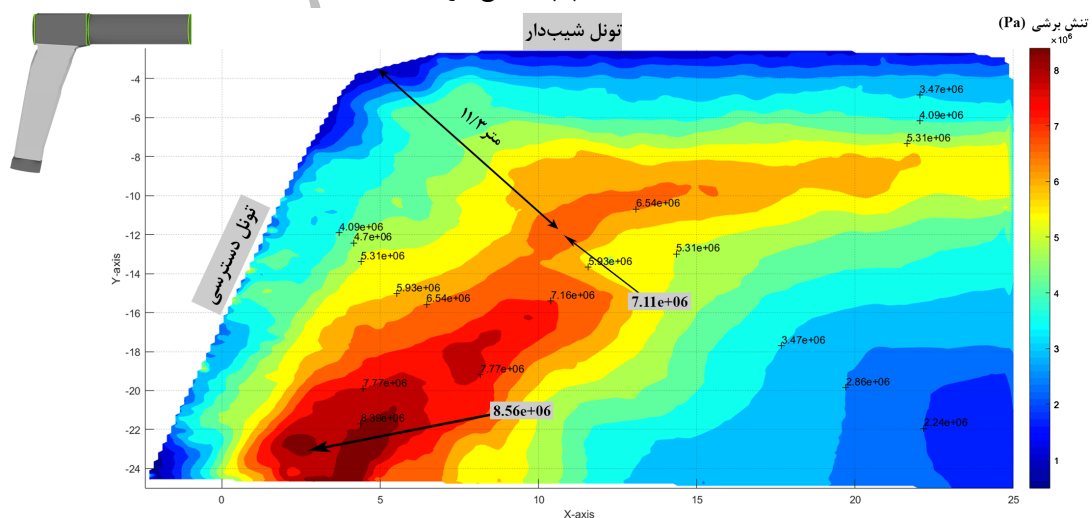
بر اساس منحنی‌های تنش برشی در توده‌سنگ سمت چپ تقاطع، تنش برشی در فاصله حدود ۱۲ متری از گوشه تیز تقاطع به ۷/۹۸ مگاپاسکال می‌رسد (شکل ۱۵-الف). همچنین در فاصله کمتر از ۲ متری از گوشه تیز تقاطع، میدان تنش برشی به ۵/۸۷ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان گفت که در پایه سنگی سمت چپ، شدت تمرکز تنش برشی بیشتر است. مطابق شکل ۱۵-ب مقدار تنش برشی در فاصله ۱۱/۳ متری از گوشه سمت راست تقاطع دوشاخه به ۷/۱۱ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین روند تغییرات تنش‌های برشی در توده‌سنگ سمت راست در جهت تونل دسترسی افزایشی است؛ این در حالی است که در توده‌سنگ سمت چپ، تنش‌های برشی تمایل به توزیع متقارن‌تری نسبت به تونل شیبدار و تونل دسترسی دارند.



شکل ۱۴ - منحنی تغییرات تنش برشی در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار (دید از بالا)

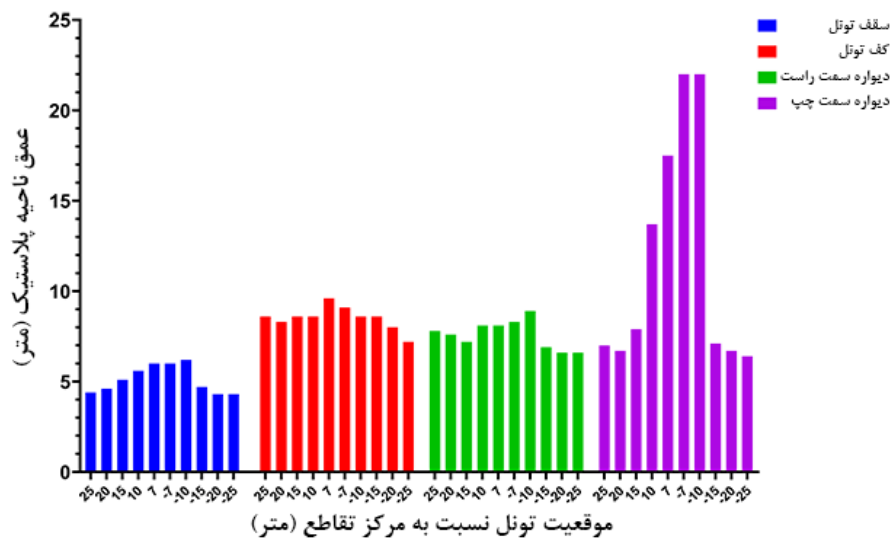


الف) سمت چپ تقاطع دوشاخه

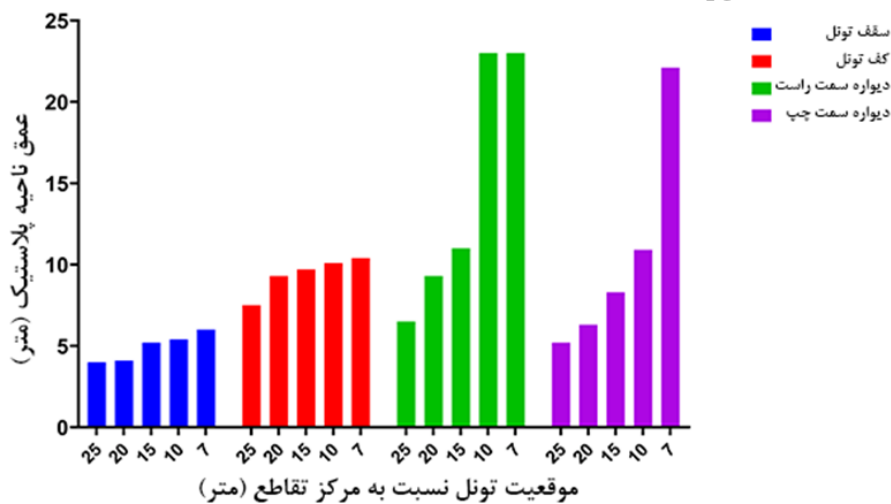


ب) سمت راست تقاطع دوشاخه

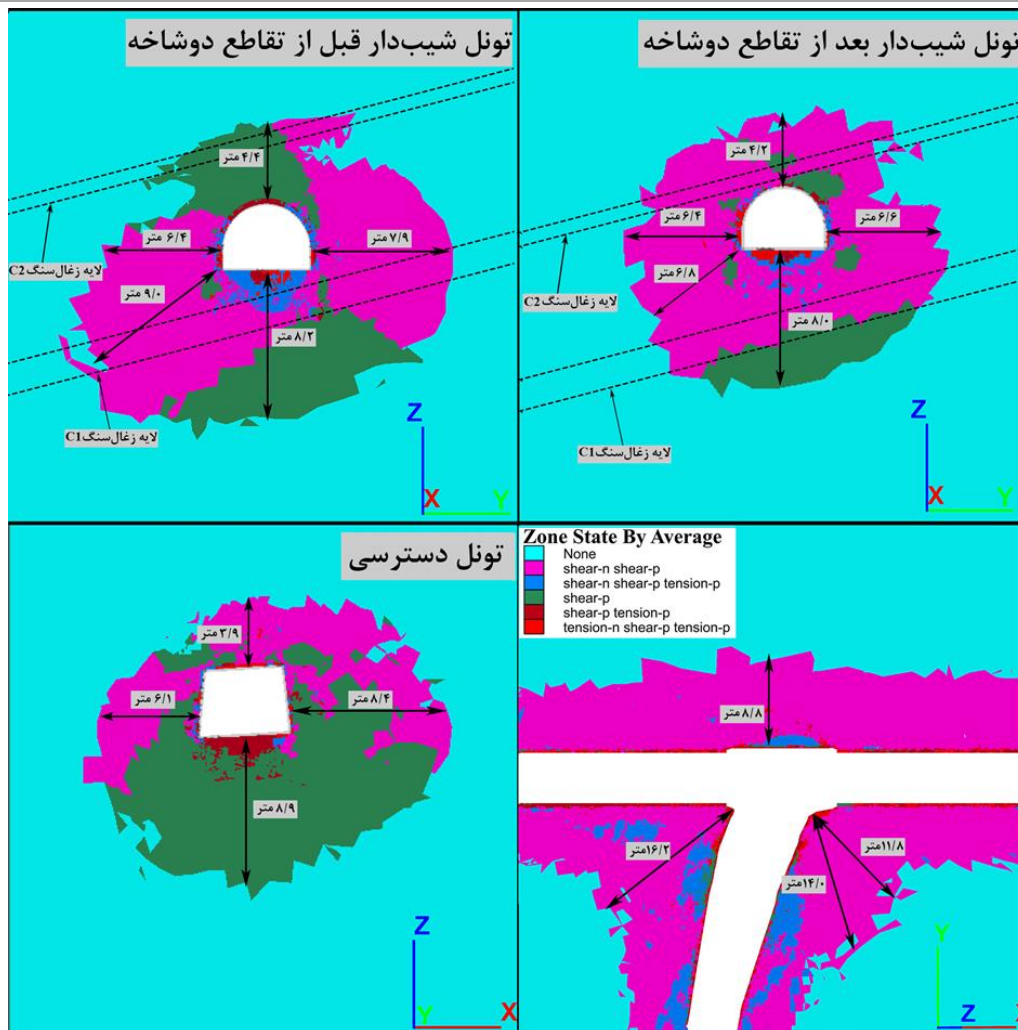
شکل ۱۵ - منحنی تغییرات تنش‌های برشی در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی (دید از بالا)



شکل ۱۶ - گسترش ناحیه پلاستیک در تونل شیب‌دار نسبت به موقعیت مرکز تونل



شکل ۱۷ - گسترش ناحیه پلاستیک در تونل دسترسی نسبت به موقعیت مرکز تونل



شکل ۱۸ - ناحیه پلاستیک در فواصل ۲۰ متری از مرکز تقاطع دوشاخه

درصدی، محاسبه و نتایج آن در شکل ۱۹-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 به طور 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 به دست آمده است (شکل ۱۹-ج). واضح است که در تمامی موارد با افزایش مدول تغییرشکل‌پذیری و زاویه اصطکاک داخلی، جابه‌جایی‌های قائم در مدول عددی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق تونل جابه‌جایی بیشینه افزایش و در نتیجه پایداری تقاطع کاهش می‌یابد.

۷-۳- تحلیل حساسیت

با توجه به تأثیر پارامترهای ورودی مدول عددی بر نتایج آن، در این تحقیق اثر تغییر سه پارامتر ورودی شامل مدول تغییرشکل‌پذیری، زاویه اصطکاک داخلی و عمق تونل بر روی بیشینه جابه‌جایی قائم سقف تقاطع مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۱۹-الف نشان داده شده است، مدول‌سازی حالت‌های متفاوت مدول تغییرشکل‌پذیری با در نظر گرفتن آهنگ رشد ۲۰ درصدی، حاکی از کاهش میزان جابه‌جایی قائم سقف با افزایش مدول تغییرشکل‌پذیری می‌باشد؛ به طوری که با افزایش ۱۰۰ درصدی مدول تغییرشکل‌پذیری میزان جابه‌جایی سقف از حدود ۳۳۴ میلی‌متر به میزان ۱۵۹ میلی‌متر کاهش می‌یابد.

جهت بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر نتایج جابه‌جایی، جابه‌جایی قائم سقف با در نظر گرفتن آهنگ رشد ۲۰

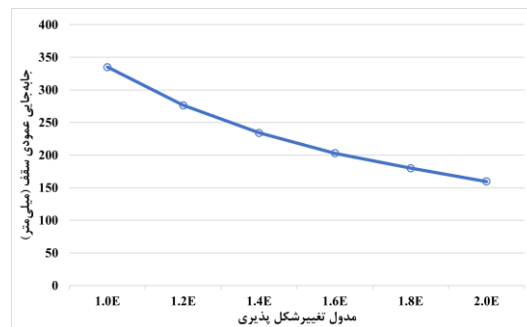
بلند، علاوه بر بهبود یکپارچگی توده‌سنگ اطراف تونل، ظرفیت خودنگهداری توده‌سنگ نیز افزایش خواهد یافت. سیستم نگهداری غیرفعال نیز شامل قاب‌های فولادی صلب است که برای افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل‌های شدید تونل نصب می‌شود.

(۲) پس از حفاری تقاطع دوشاخه، توده‌سنگ بین تونل شبیدار و تونل دسترسی در سمت چپ تقاطع متحمل بیشترین اغتشاش تنش می‌شود؛ به‌طوری‌که بیشینه تنش القایی قائم آن ۱/۷۱ برابر تنش قائم قبل از حفاری است. پس از آن توده‌سنگ بین تونل شبیدار و تونل دسترسی در سمت راست تقاطع و سپس دیواره سمت راست تونل شبیدار به ترتیب با تمرکز تنش قائم ۱/۶۵ و ۱/۴ اغتشاش تنش کمتری را تجربه می‌کنند.

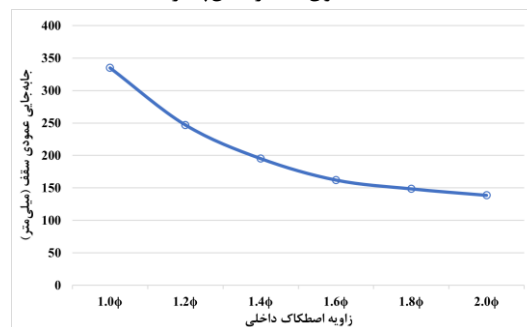
(۳) تنش‌های برشی نیز همانند تنش‌های قائم از روند مشابهی پیروی می‌کنند؛ به طوری که بیشینه تنش برشی در توده‌سنگ بین تونل شبیدار و تونل دسترسی سمت چپ تقاطع، سمت راست تقاطع و دیواره سمت راست تونل شبیدار به ترتیب معادل ۷/۹۸، ۷/۱۱ و ۶/۲۳ مگاپاسکال است.

(۴) روند توزیع تنش‌ها در توده‌سنگ بین تونل شبیدار و تونل دسترسی به‌صورت گنبدی-شکل در ابتدا افزایش و سپس به تدریج کاهش می‌یابد. این نکته حائز اهمیت است که با توجه به وسعت زیاد ناحیه اغتشاش تنش در توده‌سنگ پیرامون تقاطع، مرحله کاهشی در این روند با شیب کمتری اتفاق می‌افتد. با افزایش فاصله از مرکز تقاطع دوشاخه، گسترش ناحیه پلاستیک در هر دو تونل شبیدار و دسترسی کاهش می‌یابد.

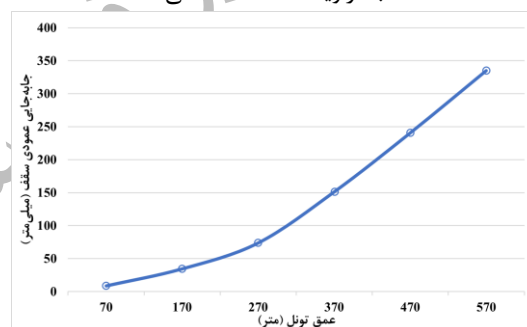
(۵) وجود لایه‌های شبیدار با مقاومت متفاوت موجب می‌شود که ناحیه پلاستیک در اطراف فضای حفاری به‌صورت نامتقارن پدیدار شود؛ به طوری که وجود لایه ضعیف در سقف مقطع حفاری خیلی در گسترش ناحیه پلاستیک تأثیرگذار نیست؛ در حالی که وجود لایه زغال‌سنگ در کف مقطع حفاری منجر به تشدید گستردگی ناحیه پلاستیک و به تبع آن ناپایداری کف و بالازدگی آن در تونل‌ها و تقاطع دوشاخه می‌شود.



الف) مدول تغییر شکل پذیری



ب) زاویه اصطکاک داخلی



ج) عمق تونل

شکل ۱۹ - تغییرات جابه‌جایی قائم در سقف تقاطع بر حسب سه پارامتر ورودی

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:

(۱) 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

[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)

[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 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).

به منظور مقابله با جابه‌جایی‌های زیاد و ناپایداری تقاطع‌ها در این معدن چند مورد از اقدامات قابل اجرا به شرح ذیل پیشنهاد می‌شود. برای کنترل بالازدگی در تونل‌ها، حفاری قوس معکوس و یا تغییر مقطع تونل به صورت دایره‌ای-شکل همراه با نصب سیستم نگهداری در کف تونل‌ها پیشنهاد می‌شود. برای کنترل جابه‌جایی‌های ناشی از حفاری تونل دسترسی، کاهش گام حفاری با هدف کنترل تنش‌های القایی پیرامون تقاطع پیشنهاد می‌شود. برای کنترل تغییر شکل‌های ناشی از تنش‌های القایی، مطالعه رفتار تونل پس از تغییر مقطع حفاری به ویژه به صورت دایره‌ای-شکل پیشنهاد می‌شود. همچنین بررسی امکان اجرای حفاری بخشی به جای حفاری تمام مقطع در محدوده تقاطع 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.

سپاسگزاری

از مدیریت و پرسنل محترم معدن زغال‌سنگ پروده طبس 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)

[21] Tabas engineering technical. office. (2023). engineering report.

[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)

⁵ Stress release

⁶ Negative Poisson's Ratio

⁷ Slope 2 (S2)

⁸ Main Gate 5 access (MG5)

⁹ Nephogram

¹ Bifurcation

² Three-way

³ Sub model

⁴ Double directional control bolt

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار