

مدلسازی عددی و ارزیابی پایداری انشعاب دو شاخه H16 در معدن زغال سنگ طبس

ستار مهدوری*

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

چکیده

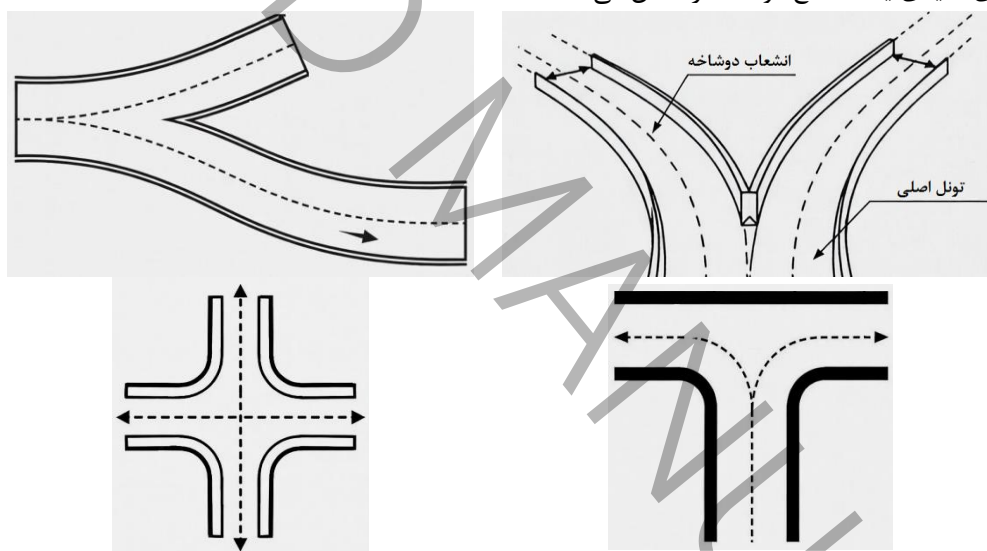
طراحی شبکه تونل‌ها در معادن زیرزمینی ذاتاً پیچیده است و ناگزیر به ایجاد انشعاب‌ها و تقاطع‌های گوناگون است. پایداری این تقاطع‌ها مستقیماً ایمنی و بازدهی معدن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پژوهش حاضر، یکی از تقاطع‌های دوشاخه معدن زغال سنگ پروده طبس (انشعاب دو شاخه H16) مورد مطالعه قرار گرفته است. روش تفاضل محدود (نرم‌افزار FLAC3D) برای محاسبه سه مؤلفه توزیع تنش‌های القایی، تمرکز تنش و وسعت ناحیه پلاستیک به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه تنش قائم القایی در محدوده بین دو تونل و در جانب چپ تقاطع به ۲۵/۵ مگاپاسکال می‌رسد. در همین ناحیه (چپ تقاطع)، تمرکز تنش در همسایگی تونل شیب‌دار به ۱/۶ و در مجاورت تونل دسترسی به ۱/۷ افزایش می‌یابد. در سقف تونل دسترسی، فاصله گرفتن از محل انشعاب با افزایش تدریجی تنش همراه است؛ پدیده‌ای که به مقطع غیردایروی و عریض این تونل نسبت داده می‌شود. میزان خطای مدلسازی در سه مقطع مورد بررسی با بیشینه جابجایی به ترتیب ۴۱۹، ۴۱۲ و ۳۷۰ میلی‌متر که معادل همگرایی افقی ۸۳۸، ۸۲۴ و ۷۴۰ میلی‌متر می‌باشند، محاسبه گردید. خطای نسبی مدل نسبت به داده‌های میدانی به ترتیب ۰.۵٪، ۰.۳٪ و ۰.۸٪ برآورد شده است. به دلیل وجود لایه‌هایی با مقاومت ناهمسان، گسترش ناحیه پلاستیک در فواصل مختلف از تقاطع رفتاری کاملاً نامتقارن نشان می‌دهد. افزون بر این، حضور لایه زغال سنگ در کف تونل‌ها، نه تنها دامنه ناحیه پلاستیک را تشدید می‌کند، بلکه مستقیماً به ناپایداری و بالازدگی کف می‌انجامد.

کلمات کلیدی

مدلسازی عددی، انشعاب دوشاخه، تنش‌های القایی، وسعت ناحیه پلاستیک، معدن طبس.

سازه‌های زیرزمینی، به ویژه تونل‌ها، نقش ستون فقرات زیرساخت‌های مدرن را در حوزه‌های حمل‌ونقل، انتقال انرژی، آب و بهره‌برداری معدنی ایفا می‌کنند [۱]. رشد شتابان شهرنشینی و افزایش تقاضا برای منابع عمیق زمین، مهندسان را ناگزیر به احداث تونل در شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی پیچیده‌تر کرده است [۲]. در معادن زیرزمینی، شبکه‌های تونلی نه تنها دسترسی به لایه‌های معدنی را ممکن می‌سازند، بلکه وظایف حیاتی تهویه، جابه‌جایی مواد و ایمنی نیروی انسانی را نیز بر عهده دارند [۳]. در این میان، تقاطع تونل‌ها به دلیل تغییر ناگهانی هندسه، همپوشانی میدان‌های تنش و تمرکز تنش‌های القایی، حساس‌ترین و آسیب‌پذیرترین نقاط هر شبکه زیرزمینی به شمار می‌روند [۴-۶].

در شبکه تونل‌های یک معدن زیرزمینی، بسته به زاویه انشعاب، تعداد انشعابات و اهداف طراحی، انواع گوناگونی از تقاطع پدید می‌آید. رایج‌ترین انواع شامل تقاطع دوشاخه^۱ (که در آن یک تونل اصلی به دو شاخه تقریباً هم‌اندازه تقسیم می‌شود)، تقاطع Y-شکل (انشعاب با زاویه حاده)، تقاطع T-شکل (انشعاب عمود بر تونل اصلی) و تقاطع چهارراه است [۶-۹]. در معادن زغال‌سنگ عمیق، تقاطع‌های دوشاخه اغلب در محل اتصال تونل‌های شیب‌دار به تونل‌های دسترسی افقی یا گالری‌های اصلی رخ می‌دهند. ویژگی هندسی بارز این تقاطع‌ها، وجود یک پایه سنگی میانی بین دو شاخه است که تحت تأثیر تمرکز تنش‌های فشاری و برشی، بحرانی‌ترین ناحیه از نظر پایداری به شمار می‌رود [۱۰، ۱۱]. علاوه بر هندسه، عواملی چون زاویه انشعاب، نسبت تنش‌های برج، نوع سیستم نگهداری و لایه‌بندی زمین‌شناسی نیز در رفتار مکانیکی تقاطع نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. شکل ۱ نمایی شماتیک از انواع تقاطع‌های متداول در معادن زیرزمینی و اجزای کلیدی یک تقاطع دوشاخه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمایی شماتیک از انواع تقاطع در معادن زیرزمینی

Figure 1: Schematic view of intersection types in underground mines

از جمله چالش‌برانگیزترین پیکربندی‌های هندسی در سازه‌های زیرزمینی، تقاطع دوشاخه است که در آن دو تونل با زاویه قائمه یا حاده به یکدیگر متصل می‌شوند [۴]. در این نواحی، لزوم افزایش سطح مقطع در محل اتصال، سبب می‌شود دهانه تونل‌ها به طور محسوسی بزرگ‌تر از مقاطع عادی گردد. پیامد مستقیم این افزایش دهانه، تشدید تغییرشکل‌های توده‌سنگ و افت چشمگیر پایداری سازه در محل تقاطع است [۱۲]. هرگونه ناپایداری در این محدوده، از ریزش سقف و ترک‌خوردگی دیواره گرفته تا بالازدگی کف، نه تنها یک پدیده موضعی نیست، بلکه می‌تواند به سرعت به کل شبکه تونل تسری یافته و خسارات جانی و مالی سنگینی به بار آورد. از این رو، تحلیل کمی الگوی تنش‌ها و تغییرشکل‌ها و پیش‌بینی دقیق رفتار توده‌سنگ پیرامون تقاطع‌های دوشاخه، به یکی از ضروری‌ترین گام‌ها در فرآیند طراحی ایمن و اقتصادی معادن عمیق محسوب می‌شود [۱۳].

¹ Bifurcation

روش‌های عددی به دلیل توانایی در شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده، شرایط مرزی غیرخطی و رفتار الاستوپلاستیک توده‌سنگ، بیش از سایر روش‌ها برای تحلیل پایداری تقاطع تونل‌ها در معادن زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۴، ۱۵]. بسیاری از پژوهش‌های اولیه بر تأثیر پارامترهایی نظیر نسبت تنش افقی به قائم، زاویه برخورد انشعاب‌ها و امتیاز توده‌سنگ بر پایداری تقاطع متمرکز بوده‌اند. مدلسازی عددی در حالت‌های مختلف با تغییر سه پارامتر عمق، نسبت تنش برجا و زاویه تقاطع نشان می‌دهد که تقاطع با زاویه ۳۰ درجه بحرانی‌ترین حالت را دارد و افزایش تنش برجا و عمق منجر به افزایش قابل توجه تغییرشکل‌ها می‌شود [۱۴]. احداث تونل انشعاب عمود بر تونل اصلی باعث بارگذاری فشاری در دیواره تونل اصلی و بارگذاری کششی در تاج و کف تقاطع می‌شود [۱۶]. نتایج یک مطالعه تجربی-عددی با روش تفاضل محدود نشان داد که افزایش زاویه تقاطع سبب افزایش پایداری تقاطع خواهد شد و تأثیر ترتیب حفاری بر پایداری تقاطع در زوایای مختلف یکسان است [۱۷، ۱۸]. بهترین ترتیب حفاری در تونل‌های متقاطع غیرهم‌اندازه، به زاویه برخورد بستگی دارد. برای زاویه ۳۰ درجه، ابتدا حفاری تونل اصلی و سپس تونل فرعی مناسب‌ترین است. برای زاویه ۶۰ درجه، ابتدا حفاری تونل فرعی و سپس تونل اصلی توصیه می‌شود. برای زاویه ۹۰ درجه، حفاری همزمان هر دو تونل بهترین پایداری را به همراه دارد [۱۹].

در مورد تقاطع‌های دوشاخه با هندسه نامنظم و دهانه بزرگ، تحلیل غیرخطی با روش تفاضل محدود نشان می‌دهد که نواحی دارای هندسه نامنظم در محل تقاطع با تمرکز تنش شدید و تغییرشکل‌های بزرگ همراه هستند و نیازمند طراحی سیستم نگهداری ویژه می‌باشند [۱۲]. یکی از یافته‌های کلیدی، نقش حیاتی پایه سنگی میانی در حفظ پایداری تقاطع‌های دوشاخه با فاصله کم است که به چگالی توده‌سنگ، چسبندگی و مدول الاستیسیته بستگی دارد و از طریق نسبت عرض به دهانه، نشست تاج تونل و همگرایی افقی ارزیابی می‌شود. بنابراین تقویت ستون سنگی میانی و حفظ یکپارچگی آن، به عنوان مهم‌ترین عامل پایداری تقاطع‌های دوشاخه شناخته می‌شود [۱۳]. برای ارزیابی پایداری تقاطع تونل‌ها با تقریب‌های شبه-سه‌بعدی و روابط تحلیلی فرم بسته، توزیع تنش و تغییرشکل در محل تقاطع محاسبه می‌شود. این روش با در نظر گرفتن معیار شکست موهر-کولمب و استفاده از نمودارهای تنش مجاز، امکان شناسایی نواحی مستعد گسیختگی برشی را فراهم می‌آورد [۲۰].

در زمینه سیستم‌های نگهداری، پژوهش‌های متعددی کارایی سیستم‌های ترکیبی (پیچ‌سنگ تمام‌تزیقی همراه با کابل‌های بلند و قاب‌های فولادی) را تأیید کرده‌اند [۲۱، ۲۲]. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که اعمال پیش‌تنیدگی در انکرهای بلند، ضمن بهبود یکپارچگی توده‌سنگ، ظرفیت خودنگهداری آن را افزایش می‌دهد [۲۳]. بر اساس تحقیقات زمین‌شناسی، تحلیل نظری و شبیه‌سازی عددی، سیستم نگهداری ترکیبی شامل پیچ‌سنگ، مش فلزی و شاکت‌کریت برای تقاطع‌های تونل در معادن زغال‌سنگ پیشنهاد شده است [۲۴، ۲۵]. برای شبیه‌سازی سیستم نگهداری قوس-پیچ در تونل‌های با تغییرشکل بزرگ از طریق توسعه نرم‌افزار FLAC3D و افزودن چهار ماژول اصلی (قوس نگهداری قابل‌تسلیم، اندرکنش جداشونده قاب-سنگ، پیچ‌سنگ شکستنی، و توده‌سنگ عملیاتی) یک رویکرد عددی بهبودیافته ارائه شده است که قابلیت اطمینان بیشتری در شبیه‌سازی رفتار تونل‌ها دارد [۲۶]. به منظور حل مشکل تغییرشکل‌های بزرگ در تقاطع راهروهای سنگی نرم با مقطع بزرگ در عمق زیاد، نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که زاویه بهینه ۹۰ درجه و نصب کابل‌های مهار فولادی با نسبت پواسون منفی^۱ تأثیر کنترل مناسبی بر تغییرشکل‌های بزرگ دارد [۲۷]. برای بررسی اندرکنش سیستم نگهداری ترکیبی پیچ‌سنگ-کابل و توده‌سنگ ویسکوالاستو-پلاستیک، شبیه‌سازی عددی با مدل موهر-کولمب (الاستیک-کاملاً پلاستیک) و مدل خزش برگرز نشان می‌دهد که اگر سیستم نگهداری درون ناحیه پلاستیک قرار گیرد، کارایی آن در کنترل تغییرشکل‌ها محدود بوده و نیاز به تمهیدات قوی‌تری دارد [۲۸].

از سوی دیگر، پژوهش‌هایی که به بررسی ترتیب حفاری پرداخته‌اند، نشان می‌دهند که ترتیب حفاری تأثیر قابل‌توجهی بر الگوهای تغییرشکل دارد. همچنین حفاری تونل دسترسی پس از تونل اصلی، می‌تواند ناحیه پلاستیک اطراف تونل اصلی را تا بیش از ۱/۵ برابر قطر تونل دسترسی گسترش دهد [۵]. در تقاطع‌هایی که سطح مقطع در محل برخورد به شکل دوزنقه یا نامنظم تعریف می‌شود، توزیع تنش به شدت نامتقارن بوده و گوشه‌های تیز بیشترین آسیب را می‌بینند [۱۲، ۲۹]. ناحیه پلاستیک در اطراف تقاطع تونل به طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر از سایر نواحی است و عمدتاً در دیواره جانبی و تاج تونل متمرکز می‌شود. همچنین حفاری تونل انشعابی تأثیر قابل‌توجهی بر تونل اصلی و سطح زمین دارد و ناحیه پلاستیک در منطقه تقاطع در مقایسه با مقطع تونل بزرگ‌تر است [۱۶، ۳۰].

¹ Negative Poisson's Ratio

به طور خاص در مورد معدن زغال سنگ پروده طبس، پژوهش‌های متعددی با استفاده از روش‌های عددی انجام شده است. مدلسازی عددی پایداری تونل‌های اصلی این معدن در محل برخورد با لایه زغال سنگ [۱۰] و طراحی سیستم نگهداری و تعیین زمان بهینه نصب آن به روش تفاضل محدود [۳۱] از جمله این پژوهش‌ها هستند. پژوهش حاضر به بررسی پایداری تقاطع دوشاخه‌ی H16 در معدن زغال سنگ پروده طبس می‌پردازد. این تقاطع از برخورد تونل شیب‌دار شماره ۲ (S2) با تونل دسترسی به گالری شماره ۵ (MG5) در عمق حدود ۵۷۰ متری پدید آمده است. هدف اصلی، تعیین میدان تنش‌های القایی، تمرکز تنش و گستردگی ناحیه‌ی پلاستیک پیرامون تقاطع با استفاده از روش عددی تفاضل محدود (FLAC3D) است. برای صحت‌سنجی مدل، نتایج مدل‌سازی با داده‌های حاصل از پایش میدانی مقایسه و محدوده ایمن در نواحی مختلف شده است. همچنین، تأثیر لایه‌بندی ناهمگن زمین‌شناسی و نیز حضور لایه ضعیف زغال سنگ در کف بر گستردگی ناحیه پلاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- معرفی معدن زغال سنگ پروده طبس

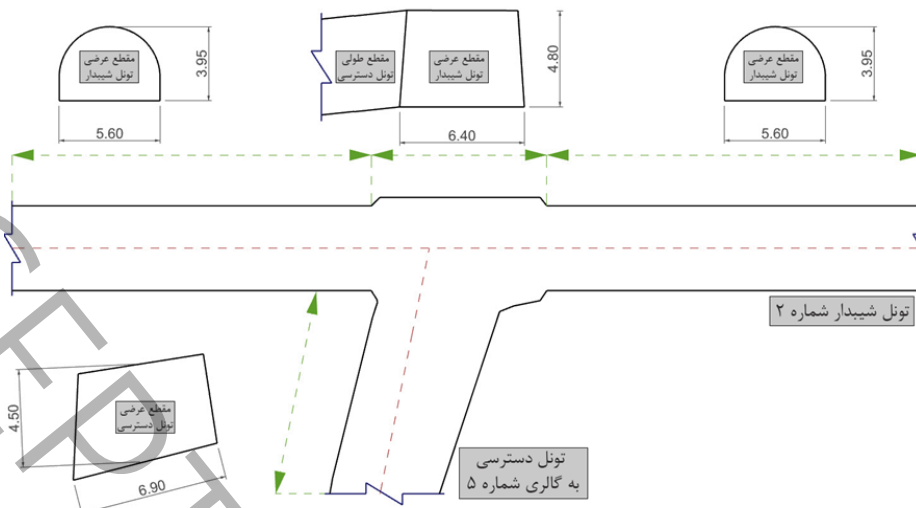
معدن زغال سنگ پروده طبس، نخستین معدن مکانیزه ایران، از سال ۱۳۸۶ مورد بهره‌برداری قرار گرفته و ظرفیت تولید سالانه آن در حدود ۲/۵ میلیون تن زغال سنگ خام است. این معدن در فاصله ۸۵ کیلومتری شهر طبس، در استان خراسان جنوبی واقع شده است. ساختار زمین‌شناسی ناحیه پروده از چندین گسل بزرگ با روند شرقی-غربی تشکیل شده که توسط گسل‌های کوچک‌تر به بخش‌های مجزایی تقسیم می‌شوند. پهنه زغال خیز پروده از سمت غرب به گسل کلمرد و از سمت شرق به گسل نایبند که هر دو در راستای شمالی-جنوبی گسترش یافته‌اند، محدود می‌گردد. سنگ‌های منطقه بیشتر از گل‌سنگ، توالی لایه‌های لای سنگ (سیلت‌استون) و ماسه‌سنگ تشکیل شده‌اند؛ همچنین لایه‌های سنگ‌آهک نیز به صورت پراکنده قابل مشاهده است [۳۲]. لایه‌های اصلی زغال سنگ در این ناحیه شامل لایه‌های B1، B2، C1، C2 و D هستند. از میان آن‌ها، لایه C1 از نظر ضخامت و پایداری، مهم‌ترین لایه زغال سنگ منطقه به شمار می‌رود [۳۳]. سطح مقطع تونل در ناحیه تقاطع دوشاخه عمدتاً از ماسه‌سنگ، لای سنگ و لای سنگ-ماسه‌ای تشکیل شده و لایه زغال سنگ C2 نیز در سقف مشاهده می‌شود. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در جدول ۱ گردآوری شده است.

جدول ۱: خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه [۳۲]

Table 1: Physical and mechanical properties of rock layers in the study area [32]

واحد سنگی	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	نسبت پواسون
لای سنگ	۲۴۰۰	۱/۲۷	۰/۷۲	۱۸	۰/۲۵
لای سنگ-ماسه‌ای	۲۶۰۰	۲/۱۷	۰/۲۱	۲۷	۰/۲۵
ماسه‌سنگ	۲۷۰۰	۲/۱۶	۱/۲۲	۲۷	۰/۲۵
زغال سنگ	۱۶۰۰	۰/۶۲	۰/۴۲	۱۲	۰/۳۲

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تقاطع دوشاخه H16 دارای سطح مقطع عریض و هندسه‌ای نامتقارن است. این تقاطع در عمق ۵۷۰ متری، تونل شیب‌دار S2 را با تونل دسترسی MG5 و با زاویه ۷۸ درجه به یکدیگر متصل می‌کند. هندسه تونل شیب‌دار S2 از مقطع D-شکل با عرض ۵/۶ متر و ارتفاع ۳/۹۵ متر تشکیل شده است. در محل تقاطع دوشاخه، مقطع این تونل به تدریج و با افزایش عرض از هر دو دیواره (چپ و راست) به یک مقطع دوزنقه‌ای تعریض می‌شود که عرض آن به ۶/۹ متر افزایش می‌یابد. پس از پایان عملیات حفاری تونل شیب‌دار در محل تقاطع، حفاری همزمان ادامه تونل شیب‌دار و تونل دسترسی آغاز می‌شود. در نقطه تقاطع، هندسه تونل دسترسی به صورت مقطع دوزنقه‌ای با اضلاع نامنظم است. با دور شدن از محل تقاطع، سطح مقطع این تونل به طور پیوسته کاهش می‌یابد؛ ابتدا به یک مقطع دوزنقه‌ای با اضلاع منظم تبدیل می‌شود و پس از کاهش عرض به ۵/۶ متر، به مقطع D-شکل تغییر می‌یابد.



شکل ۲: نمای دید از بالا و مقاطع عرضی محدوده تقاطع دوشاخه H16

Figure 2: Top view and cross-sections of the H16 bifurcation intersection area

۳- نتایج مدلسازی عددی

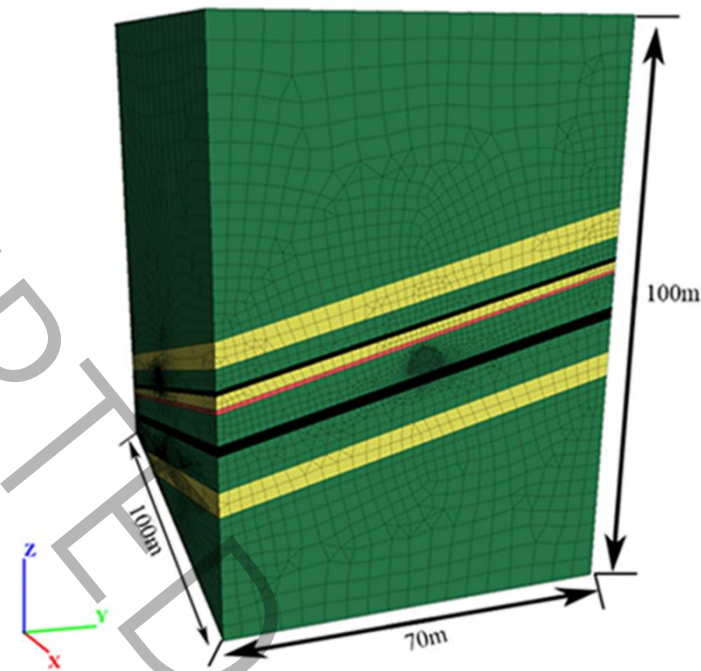
۳-۱- روش مدلسازی و شرایط مرزی

در پژوهش حاضر، از روش عددی تفاضل محدود به کمک نرم افزار FLAC3D برای شبیه سازی رفتار توده سنگ پیرامون تقاطع دوشاخه H16 در معدن طبس استفاده شده است. در واقع مدل سازی با فرض پیوسته بودن محیط انجام شده است. در مقیاس مدل (ابعاد چندین برابر عرض تونل)، اثر درزه و ترک های منفرد قابل صرف نظر است و رویکرد محیط پیوسته با پارامترهای معادل نظیر شاخص مقاومت زمین شناسی می تواند رفتار کلی توده سنگ را با دقت قابل قبولی پیش بینی کند. روش تفاضل محدود ذاتاً برای محیط های پیوسته طراحی شده و با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب و پارامترهای کاهش یافته (نظیر چسبندگی و زاویه اصطکاک معادل) می توان اثر ناپیوستگی ها را به طور ضمنی لحاظ کرد. همچنین عدم دسترسی به داده های دقیق از سامانه درزه و ترک در عمق ۵۷۰ متری، مدل سازی ناپیوسته را ناممکن می سازد.

به منظور نزدیک سازی هرچه بیشتر شرایط مدل به وضعیت واقعی زمین، ابعاد دامنه مدل بر اساس اصل سنت-ونانت و به میزان پنج برابر عرض تونل در نظر گرفته شد تا تأثیر شرایط مرزی بر پاسخ های کلی مدل به حداقل برسد. اصل سنت-ونانت یکی از مفاهیم بنیادین در مکانیک جامدات و روش های عددی است که به طور گسترده در مدل سازی سازه های ژئوتکنیکی و تونل ها به کار می رود. بر اساس این اصل، اگر سیستمی از نیروهای وارد بر یک ناحیه از بدنه جامد با یک سیستم استاتیکی معادل (همان برآیند نیرو و گشتاور) جایگزین شود، توزیع تنش و کرنش در نقاطی که به اندازه کافی از ناحیه اعمال نیرو دور هستند، تقریباً بدون تغییر باقی می ماند. به عبارت ساده تر، اثر یک اغتشاش موضعی (مانند حفاری تونل یا اعمال بار متمرکز) با فاصله گرفتن از منبع اغتشاش به سرعت کاهش یافته و ناچیز می شود. در مدل سازی عددی تونل ها، این اصل مبنای تعیین ابعاد دامنه مدل قرار می گیرد: اگر مرزهای مدل به اندازه کافی از محل حفاری دور در نظر گرفته شوند، شرایط مرزی اعمال شده در آن مرزها تأثیر قابل توجهی بر توزیع تنش و تغییر شکل در اطراف تونل نخواهند داشت. رعایت این اصل باعث می شود که نتایج مدل سازی به پاسخ های یک محیط نیمه بینهایت نزدیک شده و از خطاهای ناشی از محدودیت ابعاد مدل کاسته شود. بر اساس همین قاعده و با در نظر گرفتن عرض تونل شیبدار (۵/۶ متر) به عنوان طول مرجع، در پژوهش حاضر مطابق شکل ۳ ابعاد مدل $100 \times 70 \times 100$ متر تعیین گردیده است [۳۴-۳۶].

به دلیل وجود سازه های مختلف پیرامون این تقاطع (که بر اساس طرح معدن و عملیات استخراج تعیین شده اند)، حفاری هر تونل باعث اغتشاش در تنش برجای منطقه شده و همپوشانی تنش های القایی را در پی دارد. عمق زیاد این تقاطع (۵۷۰ متر) خود سبب پیدایش تنش های برجای نسبتاً بزرگی شده است؛ به طوری که مقدار تنش قائم اولیه به ۱۵ مگاپاسکال می رسد. تنش قائم ناشی از وزن

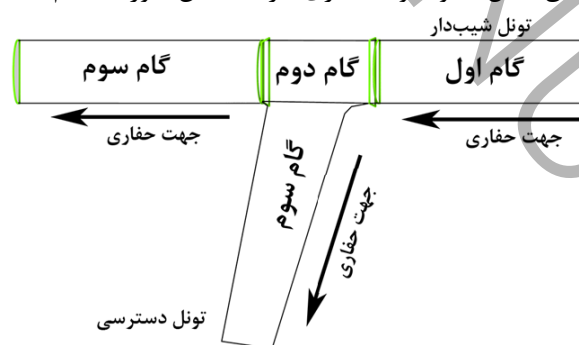
روباره به مرز بالایی مدل وارد شده است. مرزهای جانبی مدل در راستای افقی مهار شده‌اند و مرز کف نیز از جابجایی در هر دو جهت افقی و قائم ثابت گردیده است.



شکل ۳: هندسه و نحوه مش‌بندی مدل عددی

Figure 3: Geometry and meshing of the numerical model

بر اساس نتایج آزمایش‌های برجا در محدوده تقاطع، نسبت تنش افقی به قائم برابر $1/15$ در نظر گرفته شده است. همچنین از مدل رفتاری موهر-کولمب برای توصیف رفتار مکانیکی توده سنگ استفاده شده است. سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز محدوده مورد مطالعه قرار دارد. در این تحلیل، اثر آب‌های زیرزمینی لحاظ نشده و تنها تنش‌های برجای زمین به عنوان شرایط اولیه اعمال گردیده است. علاوه بر این، زاویه شیب تونل S2 نسبت به خط افق حدود 15° درجه و زاویه شیب تونل MG5 حدود 6° درجه است. مراحل و ترتیب حفاری تونل‌های شیب‌دار و دسترسی مطابق شکل ۴ بوده و مدلسازی نیز به همین صورت انجام شده است.



شکل ۴: مراحل و ترتیب حفاری تونل‌های شیب‌دار و دسترسی

Figure 4: Excavation stages and sequence of the slope and access tunnels

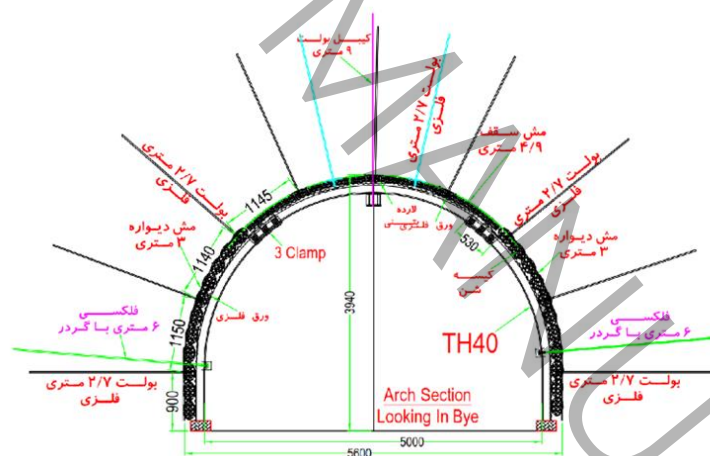
سیستم نگهداری تونل شیب‌دار S2 شامل پیچ‌سنگ‌هایی به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول $2/4$ متر با آرایش منظم و فاصله‌داری ۱ متر است. این پیچ‌سنگ‌ها به صورت تمام‌طول با رزین تزریق شده و همراه با وایر مش نصب می‌شوند. همچنین قاب‌های فولادی کشویی TH36 با فاصله‌داری ۸۰۰ میلی‌متر برای تأمین پایداری تونل به کار رفته‌اند؛ فضای خالی میان قاب فولادی و دیواره تونل با مواد پرکننده پوشانده می‌شود (شکل ۵).

با نزدیک شدن به محل تقاطع (تا شعاع ۹ متری از مرکز)، به دلیل افزایش عرض دهانه و سطح مقطع، از سیستم نگهداری تقویت شده استفاده شده است. در این ناحیه، پیچ‌سنگ‌هایی به طول ۲/۷ متر با آرایش متراکم‌تر نصب می‌گردد. در محل تقاطع، انکرهای پیش‌تنیده ۹ متری، فلکسی‌بولت‌های ۶ متری و پیچ‌سنگ‌هایی با فاصله‌داری ۸۰۰ میلی‌متر به کار گرفته شده‌اند. به دلیل افزایش سطح مقطع در محل تقاطع دوشاخه، به جای قاب‌های فولادی کشویی از تیرهای IPB260 و IPB320 استفاده شده است. در تونل دسترسی MG5، پیچ‌سنگ‌های تزریقی در سقف و دیواره با آرایش مربعی و فاصله‌داری ۸۰۰ میلی‌متر نصب شده‌اند. همچنین در این تونل، فلکسی‌بولت ۶ متری در سقف و قاب‌های فولادی IPB260 به عنوان سیستم نگهداری به کار رفته است. مشخصات مکانیکی اجزای سیستم نگهداری در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ مشخصات سیستم نگهداری پیشنهادی

Table 2: Specifications of the proposed support system

پارامتر	واحد	کابل انکر سقف	فلکسی‌بولت سقف	پیچ‌سنگ
قطر	(mm)	۴۲	۲۱/۷	۲۲
طول	(m)	۹	۶	۲/۴
مقاومت کششی	(kN)	۶۰۰	۴۹۰	۳۱۰
مقاومت فشاری	(kN)	-	-	۲۵۰
پیش‌تنیدگی	(kN)	۲۵۰	-	-
کرنش مجاز	(%)	-	-	۱۸
طول ناحیه انکراژ (باند)	(m)	۵	۴	۲/۴
مواد تزریق		دوغاب سیمان	رزین	رزین



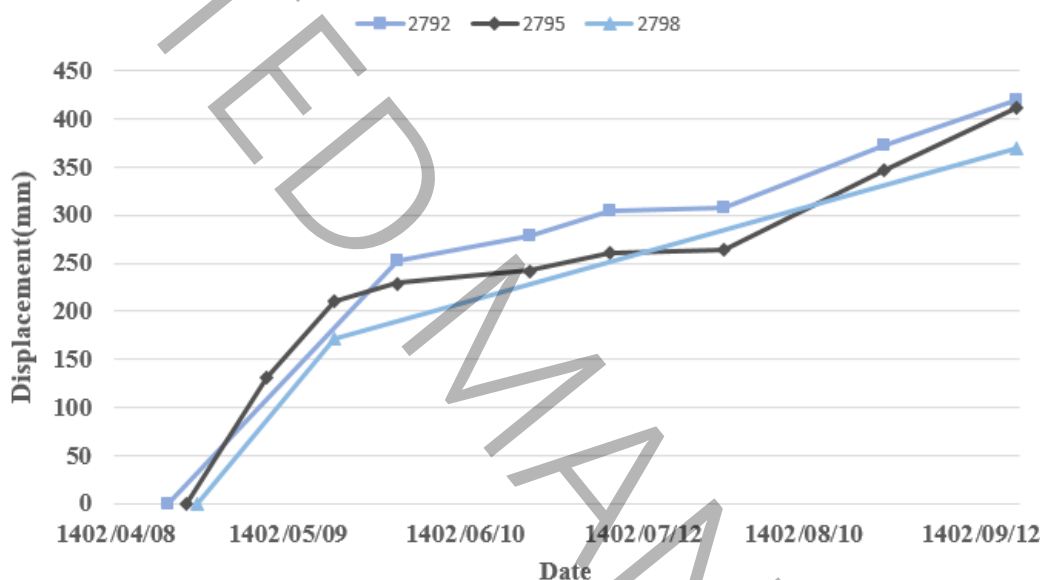
شکل ۵: آرایش سیستم‌های نگهداری در مقطع تونل شیب‌دار

Figure 5: Arrangement of support systems in the cross-section of the slope tunnel

۳-۲- صحت‌سنجی نتایج مدل عددی

به منظور ارزیابی اعتبار مدل عددی توسعه‌یافته در این پژوهش، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های پایش میدانی همگرایی تونل مقایسه گردید. داده‌های پایش از سه مقطع مجزا (۲۷۹۲، ۲۷۹۵ و ۲۷۹۸) در بازه زمانی مرداد تا آذر ۱۴۰۲ (پنج ماه) برداشت شده‌اند. شکل ۶ روند زمانی جابجایی دیواره‌های تونل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جابجایی از مقدار نزدیک به صفر در ابتدای دوره آغاز شده و طی پنج ماه در برخی نقاط به بیش از ۴۰۰ میلی‌متر رسیده است. این روند به صورت غیرخطی است: در دو ماه نخست، افزایش سریع جابجایی (فاز اولیه همگرایی) رخ داده و پس از آن، نرخ همگرایی تا حدودی کاهش یافته است.

در مرحله میانی (شهریور تا مهر)، شیب منحنی‌ها ملایم‌تر شده که نشان‌دهنده ورود سیستم به فاز ثانویه همگرایی می‌باشد. اما از اواخر مهر به بعد، مجدداً شتاب قابل توجهی در افزایش جابجایی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از پیشروی ناحیه پلاستیک یا تأثیر پیشرفت حفاری‌ها باشد. در میان سه مقطع، مقطع ۲۷۹۲ با ثبت بیشینه جابجایی حدود ۴۲۰ میلی‌متر حساس‌ترین پاسخ را نشان داد، در حالی که نقطه ۲۷۹۸ با حدود ۳۷۰ میلی‌متر کمترین جابجایی را تجربه کرد. این تفاوت را می‌توان به موقعیت متفاوت نقاط اندازه‌گیری نسبت به ضعف‌های ساختاری زمین (مانند درزه‌ها و لایه‌های ضعیف) یا الگوی نامتقارن تنش در مقطع تونل نسبت داد. بر اساس خروجی مدل عددی، عرض داخلی تونل در نتیجه حرکت دیواره‌ها به سمت داخل، به میزان ۸۰۱ میلی‌متر کاهش یافته است. جابجایی افقی دیواره چپ برابر ۰/۳۷ متر و دیواره راست برابر ۰/۴۵ متر محاسبه شده است. همچنین در تاج تونل، جابجایی قائم به مقدار ۱۰ سانتی‌متر ثبت گردیده است. در نهایت، میزان خطای مدلسازی در سه مقطع مورد بررسی با بیشینه جابجایی به ترتیب ۴۱۹، ۴۱۲ و ۳۷۰ میلی‌متر که معادل همگرایی افقی ۸۳۸، ۸۲۴ و ۷۴۰ میلی‌متر می‌باشند، محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، خطای نسبی مدل نسبت به داده‌های میدانی به ترتیب ۰/۵٪، ۰/۳٪ و ۰/۸٪ برآورد شده است که در محدوده مطلوب قرار داشته و اعتبار مدل عددی تأیید می‌گردد.



شکل ۶: جابجایی افقی پایش شده در سه مقطع از تونل شیب‌دار

Figure 6: Monitored horizontal displacement in three sections of the slope tunnel

جدول ۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های پایش میدانی

Table 3: Comparison of numerical simulation results with field monitoring data

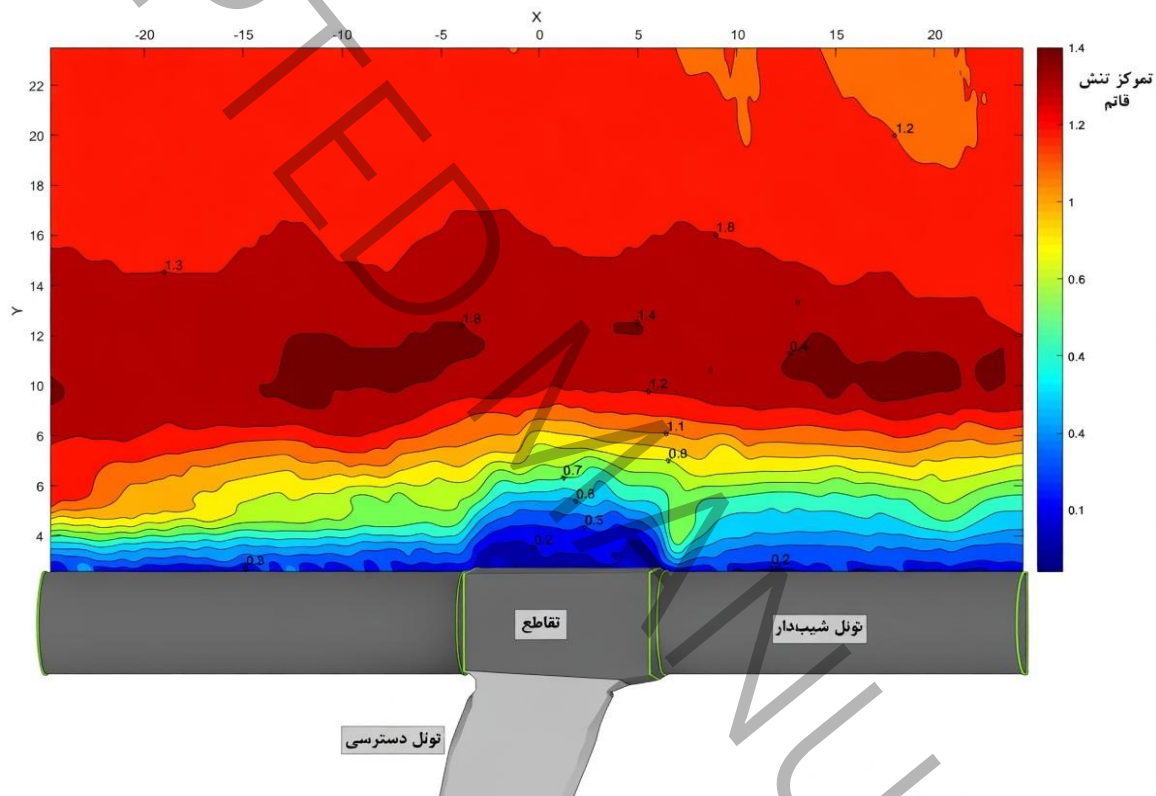
مقطع	جابجایی میدانی (mm)	جابجایی مدل (mm)	خطای نسبی (%)
2792	۴۱۹	۴۴۰	۵
2795	۴۱۲	۴۲۴	۳
2798	۳۷۰	۴۰۰	۸

۳-۳- تحلیل تنش‌های القایی

نتایج حاصل از تحلیل عددی توزیع تنش قائم در اطراف تقاطع تونل دسترسی و تونل شیب‌دار، به صورت کانتور در شکل ۷ ارائه شده است. این شکل نشان‌دهنده تغییرات تمرکز تنش قائم در محدوده اطراف تقاطع است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی توزیع تنش پس از حفاری تونل شیب‌دار و نصب سیستم نگهداری، به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار گرفته است. مناطق نزدیک به تونل‌ها شاهد کاهش قابل ملاحظه تنش قائم هستند، در حالی که با افزایش فاصله از تقاطع، تنش‌های القایی به تدریج به مقادیر بالاتر می‌رسند. فاکتور

تمرکز تنش برابر است با نسبت تنش قائم القایی به تنش قائم برجای اولیه در همان نقطه پیش از حفاری. این کمیت نشان می‌دهد که تنش قائم در اثر حفاری چند برابر شده است. مقادیر بیشتر از ۱ نشان‌دهنده تمرکز تنش و مقادیر کمتر از ۱ نشان‌دهنده رهایی تنش هستند.

بیشینه تمرکز تنش قائم برابر با ۱/۷ در فاصله تقریبی ۱۱ متر از مرکز تقاطع مشاهده شد. این نقطه حداکثر تمرکز تنش در بخش بالایی و جانبی تقاطع قرار دارد. شایان توجه است که حتی در فاصله ۲۳ متری از مرکز تقاطع، تنش القایی قائم هنوز به تنش قائم اولیه (۱۴/۹ مگاپاسکال) پیش از شروع عملیات حفاری بازنگشته است. این امر حاکی از آن است که تأثیر حفاری تونل شیب‌دار بر میدان تنش اطراف تقاطع، فراتر از فاصله‌های نزدیک بوده و تا شعاع نسبتاً وسیعی ادامه می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که نصب سیستم نگهداری، هرچند توانسته است از افزایش بیش از حد تنش در نزدیکی تونل‌ها جلوگیری کند، اما نمی‌توان به‌طور کامل میدان تنش را به شرایط اولیه بازگرداند. بنابراین، لازم است در طراحی سیستم نگهداری تقاطع‌های زیرزمینی اثرات بلندمدت و دامنه تأثیر حفاری تونل‌های مجاور به‌دقت مورد ارزیابی قرار گیرد.



شکل ۷: کانتورهای تمرکز تنش القایی قائم در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار

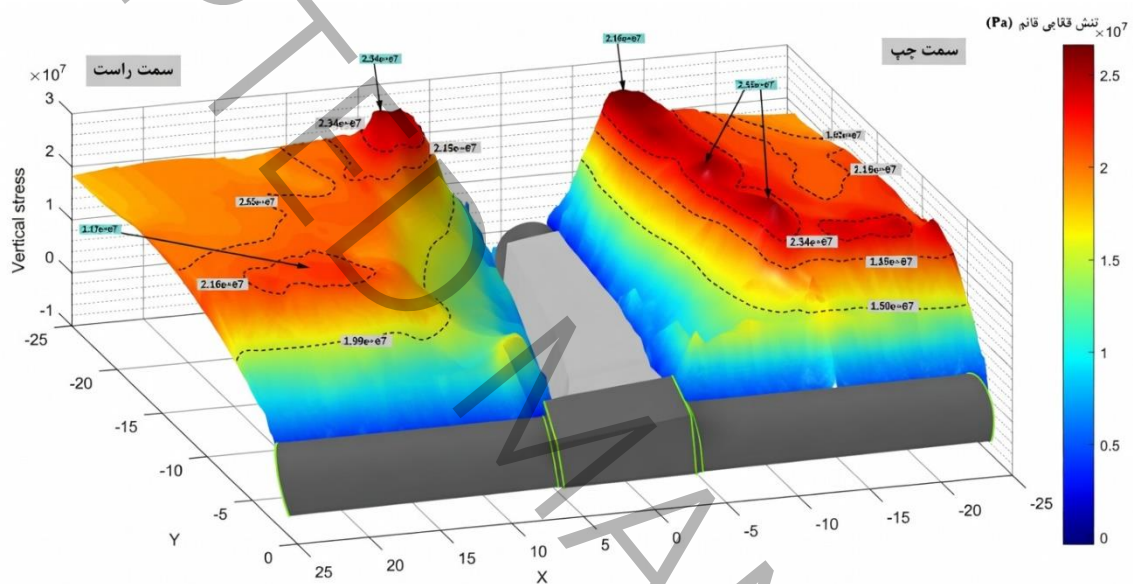
Figure 7: Contours of vertical induced stress concentration in the right wall of the slope tunnel

برای وضوح بیشتر، نمای سه‌بعدی تنش‌های القایی قائم در هر دو سمت تقاطع دوشاخه نیز در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به منحنی‌های توزیع تنش، سطح تنش قائم در توده‌سنگ سمت چپ که در محل تقاطع زاویه کمتری دارد، به‌مراتب بالاتر از سمت 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. به‌طور کلی روند تغییرات تنش‌های القایی قائم، در ابتدا به‌صورت پیوسته افزایشی بوده و سپس با دور شدن از تقاطع کاهشی و سپس ثابت می‌شود؛ به نحوی که به‌صورت کانتورهای هم‌تراز و گنبدی-شکل دارای یک مقدار بیشینه بوده و به‌تدریج با گسترش گنبد، کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در کانتورهای تمرکز تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی مشاهده می‌شود، در سمت چپ تقاطع دوشاخه، ناحیه تمرکز تنش تا فاصله ۴۷ متری از گوشه تیز پایه سنگی ادامه یافته است. در این ناحیه، تمرکز تنش در نزدیکی تونل شیب‌دار به ۱/۶۵ و در نزدیکی تونل دسترسی به ۱/۷۱ افزایش یافته است. در سمت راست تقاطع دوشاخه نیز، تمرکز

تنش در مجاورت تونل شیب‌دار به $1/47$ و در مجاورت تونل دسترسی به $1/72$ رسیده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از محل تقاطع دوشاخه، تمرکز تنش در تونل دسترسی به‌طور قابل توجهی بیشتر از تونل شیب‌دار خواهد بود. بنابراین، تونل دسترسی در فواصل دورتر از تقاطع، تحت تأثیر تمرکز تنش بیشتری قرار می‌گیرد.

در شکل ۹، توزیع تنش قائم در امتداد خطی به فاصله $1/5$ متر بالاتر از سقف تقاطع دوشاخه نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنش قائم در لبه سقف تونل شیب‌دار حدود 11 مگاپاسکال است و رفتار متفاوتی را در سه ناحیه مورد بررسی (سقف سمت چپ تقاطع، سقف سمت راست تقاطع و دیواره سمت راست تونل شیب‌دار) نشان می‌دهد. در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار، تنش القایی قائم در فاصله تقریبی 6 متری از لبه سقف تونل به مقدار اولیه خود بازمی‌گردد؛ با این حال، روند افزایشی تنش همچنان ادامه یافته و مقادیر آن به بیش از 18 مگاپاسکال می‌رسد. همچنین در ناحیه سقف سمت زاویه بسته تقاطع، تنش قائم در فاصله کمتر از 3 متر از لبه به مقدار اولیه خود نزدیک می‌شود و سپس روند افزایشی خود را ادامه می‌دهد.

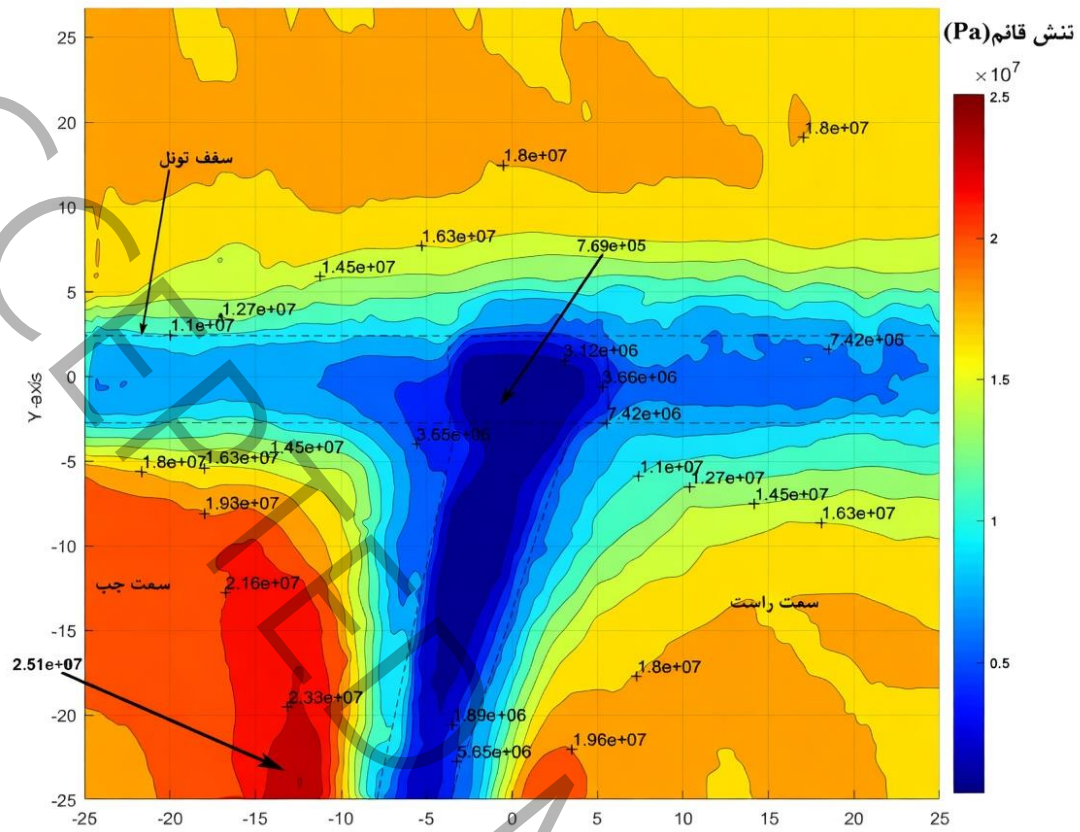


شکل ۸: نمای سه‌بعدی تنش‌های القایی قائم در هر دو سمت تقاطع دوشاخه

Figure 8: Three-dimensional view of vertical induced stresses on both sides of the bifurcation intersection

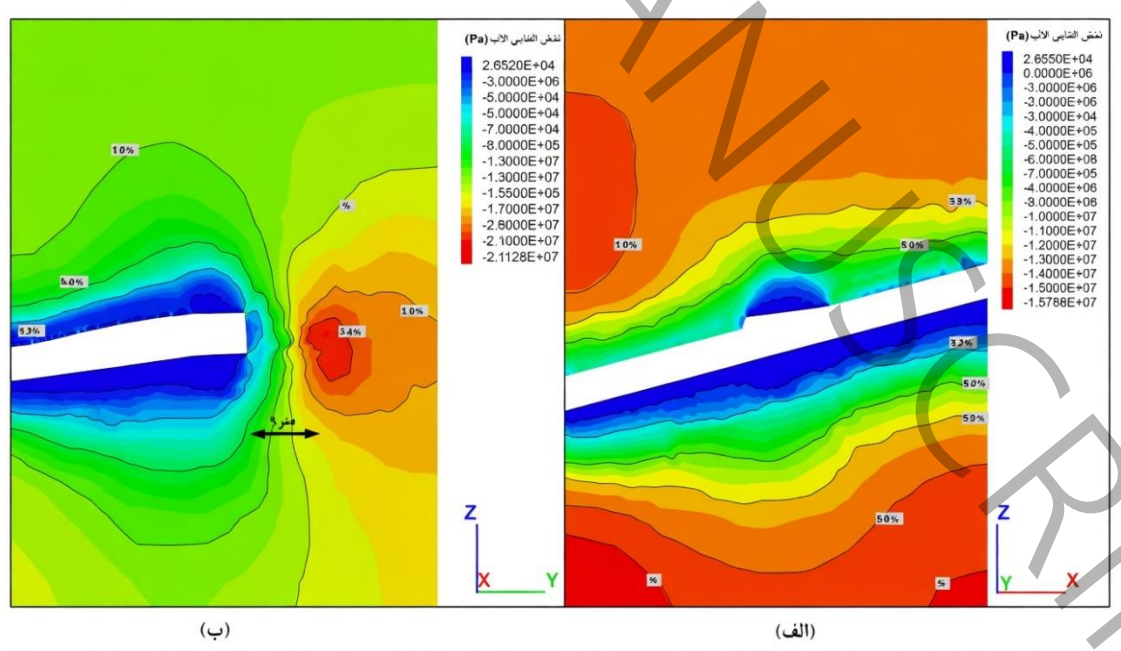
این نتایج حاکی از آن است که سقف تونل شیب‌دار و ناحیه تقاطع به سمت تونل دسترسی، به دلیل نصب سیستم نگهداری پیشنهادی، شاهد رهایی قابل توجه تنش بوده‌اند. کمینه مقدار تنش قائم ثبت‌شده در این ناحیه برابر با $0/769$ مگاپاسکال است. همچنین بیشینه تنش القایی قائم در محدوده بین دو تونل و در جانب چپ تقاطع به $25/5$ مگاپاسکال می‌رسد. در مقابل، در سقف تونل دسترسی با افزایش فاصله از محل تقاطع، سطح تنش قائم روند افزایشی نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از سطح مقطع غیرمدرور و نسبتاً عریض این تونل باشد.

در شکل ۱۰، میدان تنش‌های القایی قائم در صفحات موازی با جهت پیشروی تونل، برای هر دو تونل شیب‌دار و تونل دسترسی نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود، سیستم نگهداری پیشنهادی عملکرد مناسبی در کنترل بالازدگی کف تونل و محدود کردن جابه‌جایی‌های سقف داشته است. بر اساس شکل ۱۰-ب، در مقطع دوزنقه‌ای تونل، گوشه‌های تیز مقطع شاهد تمرکز تنش قابل توجهی هستند، در حالی که دیواره‌ها و سقف این مقطع تنش‌های نسبتاً پایین‌تری را تجربه می‌کنند. بیشینه تنش قائم در این ناحیه در فاصله حدود 9 متری از دیواره سمت راست تونل شیب‌دار رخ داده است.



شکل ۹: منحنی‌های تنش القایی قائم در فاصله ۱/۵ متر بالاتر از سقف تقاطع دوشاخه (دید از بالا)

Figure 9: Vertical induced stress curves at a distance of 1.5 m above the roof of the bifurcation intersection (top view)



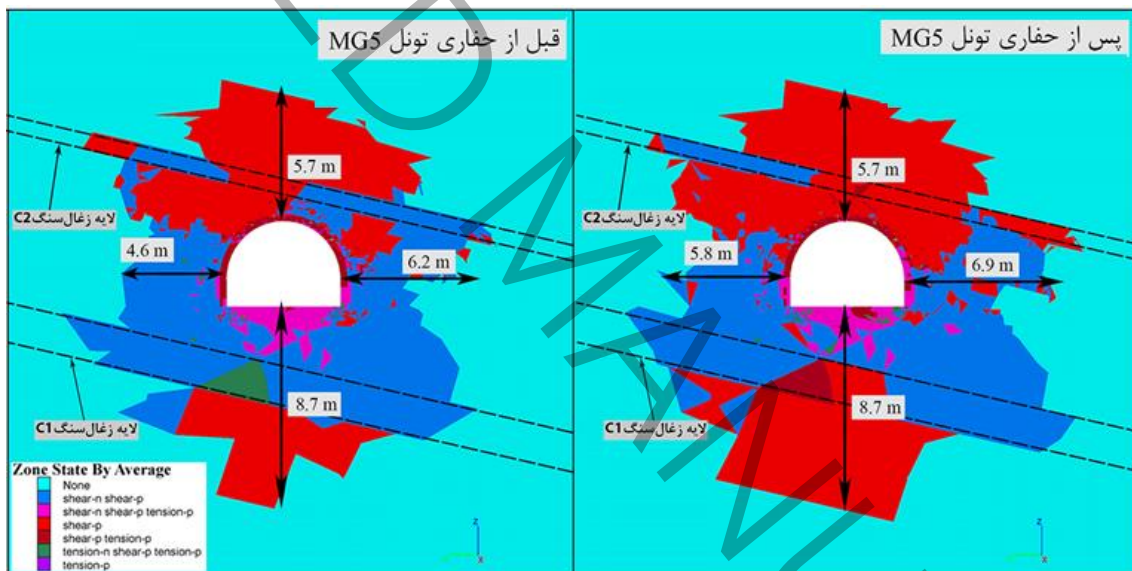
شکل ۱۰: منحنی‌های تنش القایی قائم در صفحه موازی پیشروی تونل: الف) تونل شیب‌دار ب) تونل دسترسی

Figure 10: Vertical induced stress curves in the plane parallel to tunnel advance; (a) slope tunnel, (b) access tunnel

۳-۴- گسترش ناحیه پلاستیک پیرامون تقاطع

الگوی گسترش ناحیه پلاستیک در اطراف تقاطع دوشاخه به شدت تحت تأثیر ناهمگنی لایه‌های زمین‌شناسی و موقعیت نسبی لایه ضعیف قرار دارد. در شکل ۱۱ توزیع نواحی تسلیم‌شده تونل شیب‌دار در فواصل ۱۵ متری قبل و بعد از حفاری تونل دسترسی با رنگ‌های مختلف بیانگر آن است که رفتار سنگ توده در اطراف مقطع، یکنواخت و متقارن نیست. در هر دو مقطع، بیشترین تمرکز ناحیه پلاستیک در تاج و کف تونل مشاهده می‌شود. دامنه گسترش ناحیه پلاستیک در طرفین تونل شیب‌دار، بعد از حفاری تونل دسترسی توسعه یافته است. همچنین در راستای قائم، گسترش ناحیه پلاستیک در کف (حدود ۸٫۷ متر) به مراتب بیشتر از تاج (حدود ۵٫۷ متر) بوده که نشان‌دهنده تمرکز تنش و ضعف ساختاری در ناحیه کف است.

در شکل ۱۲ که مربوط به تونل دسترسی و ناحیه تقاطع است، این ناهمگنی با وضوح بیشتری نمایان می‌شود. در نمای پلان و برش عرضی، ناحیه پلاستیک با الگوی نامتقارن و توسعه یافته در اطراف تقاطع دیده می‌شود؛ به‌ویژه در محل اتصال شاخه‌ها، تمرکز نواحی برشی-کششی افزایش یافته و گسترش آن در جهت کف و دیواره‌ها تشدید شده است. مقادیر ثبت‌شده نشان می‌دهد که در برخی نواحی، عمق گسترش پلاستیسیته حدود ۱۴ متر در پایه میانی سمت زاویه باز تونل و به بیش از ۱۶ متر در پایه میانی سمت زاویه بسته تونل می‌رسد، در حالی که در بخش‌های دیگر این مقدار کمتر و در حدود ۸ تا ۹ متر است. این تغییرات بیانگر تأثیر مستقیم لایه‌بندی و حضور لایه‌های با مقاومت متفاوت و حفاری تونل دسترسی بر توزیع تنش و مکانیزم تسلیم توده‌سنگ است.



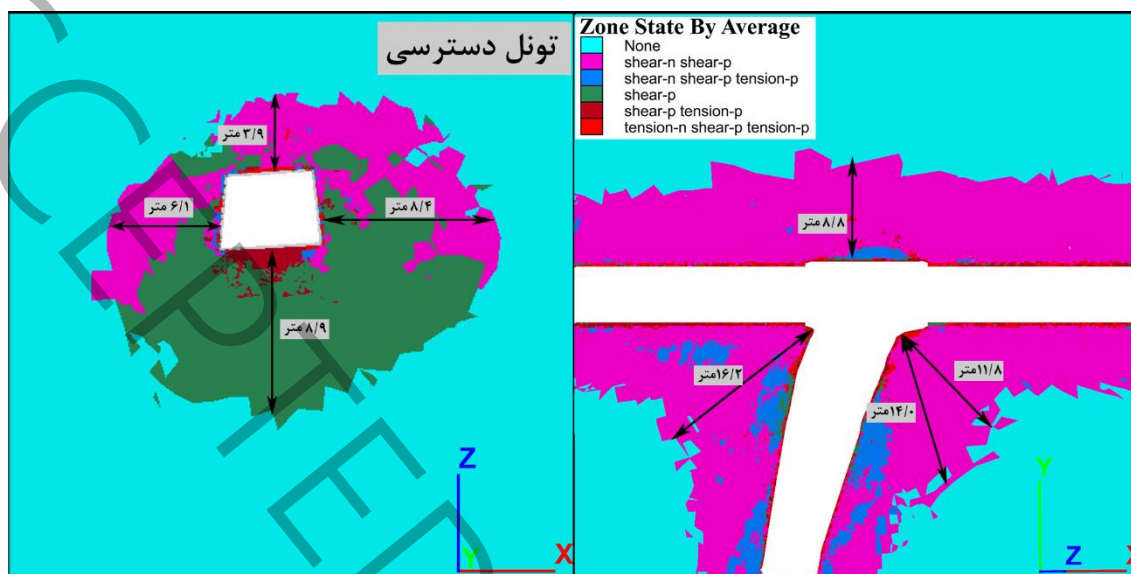
شکل ۱۱: ناحیه پلاستیک در فواصل ۱۵ متری قبل و بعد از حفاری تونل دسترسی

Figure 11: Plastic zone at distances of 15 m before and after excavation of the access tunnel

نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که گسترش ناحیه پلاستیک در اطراف تقاطع دوشاخه به شدت تحت تأثیر ناهمگنی مکانیکی لایه‌های سنگی و موقعیت هندسی آنها نسبت به مقطع حفاری قرار دارد. برخلاف محیط‌های همگن که در آنها ناحیه پلاستیک به صورت نسبتاً متقارن پیرامون تونل توسعه می‌یابد، در این مطالعه به دلیل تناوب لایه‌های سخت و نرم، الگوی گسترش ناحیه پلاستیک رفتاری نامتقارن و پیچیده از خود نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، دامنه توسعه ناحیه پلاستیک در دیواره‌های دو طرف تونل متفاوت بوده و این اختلاف در برخی موارد به بیش از ۲ متر می‌رسد. این عدم تقارن به‌ویژه در نواحی مجاور تقاطع تشدید شده و با تمرکز تنش همراه است.

از سوی دیگر، تحلیل توزیع قائم ناحیه پلاستیک نشان می‌دهد که گسترش این ناحیه در کف تونل به مراتب بیشتر از تاج آن است. به‌طوری‌که عمق نفوذ پلاستیسیته در کف در برخی مقاطع به حدود ۸٫۷ متر و در نواحی تقاطع حتی بیش از ۱۰ متر می‌رسد، در حالی که این مقدار در تاج به حدود ۵ تا ۶ متر محدود می‌شود. این پدیده بیانگر حساسیت بالای کف تونل نسبت به حضور لایه‌های ضعیف و

تمرکز تنش‌های فشاری است. در واقع، قرارگیری لایه‌های با مقاومت پایین در کف موجب کاهش ظرفیت باربری و افزایش تغییرشکل‌های پلاستیک در این ناحیه می‌شود.



شکل ۱۲: ناحیه پلاستیک در فواصل ۲۰ متری از مرکز تقاطع دوشاخه

Figure 12: Plastic zone at distances of 20 m from the center of the bifurcation intersection

مقایسه حالت‌های مختلف نیز نشان می‌دهد که موقعیت لایه ضعیف (نظیر لایه زغال سنگ) نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت و جهت گسترش ناحیه پلاستیک دارد. زمانی که این لایه در سقف تونل قرار گیرد، توسعه ناحیه پلاستیک در بالا نسبتاً محدود بوده و اثر آن بر پایداری کلی کمتر است. اما در حالتی که لایه ضعیف در کف واقع شود، گسترش ناحیه پلاستیک به سمت پایین به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و منجر به تشدید ناپایداری کف می‌گردد. این وضعیت می‌تواند به بروز پدیده بالازدگی کف منجر شود که یکی از مهم‌ترین چالش‌های ژئومکانیکی در تقاطع‌های معادن زیرزمینی، به‌ویژه در معادن زغال سنگ عمیق، محسوب می‌شود.

بنابراین، نتایج این تحلیل بر ضرورت لحاظ دقیق لایه‌بندی زمین‌شناسی در مدل‌سازی‌های عددی تأکید دارد. همچنین در طراحی سیستم نگهداری تقاطع‌ها، توجه ویژه به شرایط کف تونل و موقعیت لایه‌های ضعیف ضروری است. استفاده از راهکارهایی نظیر تقویت کف با انکرهای عمقی، افزایش ظرفیت باربری کف و به‌کارگیری سیستم‌های نگهداری ترکیبی می‌تواند نقش مؤثری در کنترل گسترش ناحیه پلاستیک و افزایش پایداری تقاطع ایفا نماید.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پایداری تقاطع دوشاخه H16 در معدن زغال سنگ پروده طبس با استفاده از روش عددی تفاضل محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. مهم‌ترین یافته‌های عددی به شرح زیر خلاصه شده است:

- بیشینه تنش قائم القایی در محدوده بین دو تونل و در سمت چپ تقاطع به ۲۵/۵ مگاپاسکال (معادل ۱/۷ برابر تنش قائم اولیه) رسید.
- توزیع تنش در توده سنگ بین دو تونل الگویی گنبدی-شکل دارد: ابتدا افزایش یافته، سپس با شیب ملایم‌تری کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده دامنه گسترده تأثیر تقاطع بر میدان تنش است.
- با افزایش فاصله از مرکز تقاطع، گستردگی ناحیه پلاستیک در هر دو تونل به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد؛ بنابراین بحرانی‌ترین ناحیه، محدوده بلافاصله پیرامون محل برخورد است.

- وجود لایه‌های شیب‌دار با مقاومت متفاوت باعث پیدایش ناحیه پلاستیک نامتقارن شده است. لایه ضعیف زغال سنگ در کف، ناحیه پلاستیک را به شدت تشدید کرده و مستقیماً به بالازدگی کف منجر می‌شود، در حالی که حضور همین لایه در سقف تأثیر چندانی در گسترش ناحیه پلاستیک ندارد.
- مقدار همگرایی اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف به بیش از ۴۰۰ میلی‌متر رسیده و روند افزایشی آن حتی پس از چند ماه ادامه یافته است که حاکی از عدم دستیابی به تعادل پایدار در توده سنگ می‌باشد.

سیاس‌گزاری

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

منابع

- [1] Maidl, B., Thewes, M., and Maidl, U., 2013. Handbook of Tunnel Engineering. Wiley, Hoboken, NJ. <https://doi.org/10.1002/9783433603499>
- [2] Kolymbas, D., 2005. Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to tunnelling. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/3-540-28500-8>
- [3] Mahdevari, S., 2026. "Intelligent forecasting of tunnel deformation in underground coal mines using a dynamic swarm-tuned adaptive neuro-fuzzy inference system for knowledge-driven ground control". Advanced Engineering Informatics, 71, 104287. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.104287>
- [4] Liu, X., and 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>
- [5] Liu, H.L., Li, S.C., Li, L.P., and Zhang, Q.Q., 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>
- [6] Gharouni Nik, M., and Farmahini Farahani, A., 2016. "Assessment the Stability of Tunnels in Y Shaped Intersections with Regard to the Intersection Angles, Case Study: Penstock Tunnels of Rudbar Dam". Amirkabir Journal of Civil Engineering, 48(2), 191–198. <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.655>
- [7] Mahdevari, S., and Hayati, M., 2021. "Finite-difference based response surface methodology to optimize tailgate support systems in longwall coal mining". Scientific Reports, 11, 4112. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82104-8>
- [8] Siad, I., Akkiche, M., and Spyridis, P., 2023. "Numerical Simulation of the Effect of Cross Passage Excavation on Surface Settlement". Geotechnical and Geological Engineering, 41, 4071–4082. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02508-3>
- [9] Ren, Y., Zhou, S., Jia, J., Yuan, Q., Zhou, Z., Liu, M., and He, H., 2023. "Construction stability analysis of intersection tunnel in city under CRD method". Frontiers in Earth Science, 11, 1264140. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1264140>
- [10] Abbasi, F., Khosravi, M.H., Jafari, A., Bashari, A., and Alipenhani, B., 2021. "Support Analysis of Main Tunnels in Tabas Mechanized Parvadeh Mine at Intersection with Coal Seam". Journal of Mining and Environment, 12(3), 711–724. <https://doi.org/10.22044/jme.2021.10610.2014>
- [11] Hsiao, F.-Y., Yu, C.-W., and Chern, J.-C., 2005. "Modeling the behaviors of the tunnel intersection areas adjacent to the ventilation shafts in the Hsuehshan tunnel". In World Long Tunnels, pp. 81–90.
- [12] Lin, P., Zhou, Y., Liu, H., and 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>
- [13] Wang, J., Long, Y., Cao, A., Cui, T., Lin, L., Gao, Y., Liu, X., and Li, H., 2025. "Middle Rock Pillar Stability Criteria for a Bifurcated Small Clear-Distance Tunnel". Applied Sciences, 15(10), 5634. <https://doi.org/10.3390/app15105634>
- [14] Khetwal, A., Khetwal, S., Sharma, K.G., and Panciera, A., 2023. "A 3-dimensional numerical analysis of the intersection of tunnels and shafts". In *Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World – Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2023*, pp. 1608–

1615. <https://doi.org/10.1201/9781003348030-192>

- [15] Li, G., He, M., Zhang, G., and Tao, Z., 2010. "Deformation mechanism and excavation process of large span intersection within deep soft rock roadway". *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 28–34. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60156-3](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60156-3)
- [16] Chortis, F., and Kavvadas, M., 2021. "Three-Dimensional Numerical Analyses of Perpendicular Tunnel Intersections". *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 1771–1793. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01587-w>
- [17] Jinkui, L., Xianke, W., and Wenjing, L., 2015. "The Effects of Different Excavation Angle on Intersecting Tunnel Surrounding Rock Stability". In *Proceedings of the 2nd International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2015)*, pp. 247–251. <https://doi.org/10.2991/mic-15.2015.57>
- [18] Chen, Y., Liu, M., Yin, F., Zhang, L., Wu, J., and Li, J., 2024. "Deformation characteristics of surrounding rock in the intersection area between main tunnel and construction adit of the Xianglushan tunnel". *Geomechanics and Engineering*, 38(1), 1–13. <https://doi.org/10.12989/gae.2024.38.1.001>
- [19] Ren, Y., Zhou, S., Jia, J., Yuan, Q., Liu, M., Song, S., Zhou, Z., and Wang, Z., 2023. "The Influence of Construction Methods on the Stability of Tunnels and Ground Structures in the Construction of Urban Intersection Tunnels". *Sustainability*, 15(20), 14720. <https://doi.org/10.3390/su152014720>
- [20] Michael, A., and Gutierrez, M., 2023. "Mechanics of Tunnel Intersections: Closed-Form Approximations for Deformation Modeling and Failure Prediction". In **57th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium**, ARMA-2023-0577. <https://doi.org/10.56952/ARMA-2023-0577>
- [21] Xie, S., Wu, Y., Chen, D., Liu, R., Han, X., and Ye, Q., 2022. "Failure analysis and control technology of intersections of large-scale variable cross-section roadways in deep soft rock". *International Journal of Coal Science & Technology*, 9, 19. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00479-z>
- [22] Wu, Y.Y., He, M.C., Li, H., Gao, Y.B., and Xie, S.R., 2024. "Instability mechanism and energy evolution of surrounding rock at intersections of deep multi-form application". *Journal of Central South University*, 31(3), 890–911. <https://doi.org/10.1007/s11771-024-5567-x>
- [23] Xu, H., Zhang, Y., Yang, J., Li, J., Sun, X., and 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, 1574530. <https://doi.org/10.1155/2022/1574530>
- [24] Meng, Q., Han, L., Qiao, W., Zhang, J., Mei, F., and Feng, W., 2016. "Supporting effect and application of bolt-net-anchor coupling support under extremely weak cementation formation". *Journal of Mining and Safety Engineering*, 33(5), 770–778. <https://doi.org/10.13545/j.cnki.jmse.2016.05.002>
- [25] Shan, R., Zhang, S., Huang, P., and Liu, W., 2021. "Research on Full-Section Anchor Cable and C-Shaped Tube Support System of Deep Layer Roadway". *Geofluids*, 2021, 5593601. <https://doi.org/10.1155/2021/5593601>
- [26] Li, W., Yang, N., Yang, B., Ma, H., Li, T., Wang, Q., Wang, G., Du, Y., and Zhao, M., 2018. "An improved numerical simulation approach for arch-bolt supported tunnels with large deformation". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.001>
- [27] Sun, X.M., Qi, Z.M., Zhang, Y., Miao, C.Y., Zhao, C.W., and He, M.C., 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>
- [28] Wang, J., Zhang, D., Sun, Z., Lu, S., and Zhu, J., 2025. "Viscos-elastic-plastic analysis of the interaction between the rockbolt-cable combined support and rock mass considering tunnel face effect". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 163, 106679. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106679>
- [29] Simsek, Z., Healy, J.C., Hawkins, B., and Atefi-Monfared, K., 2020. "Geometric effects on rock behavior surrounding underground cross tunnel structures". In **54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium**, Paper No. ARMA-2020-1476.
- [30] Li, Y., Jin, X., Lv, Z., Dong, J., and 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>
- [31] Shekarchizadeh, M., Najafi, M., and Fatehi Marji, M., 2025. "Numerical Simulation of Appropriate

- Design for Selecting Tunnel Support Systems in Squeezing Grounds (Tunnel No. 2 in Tabas Coal Mine, Iran)". *Advances in Civil Engineering*, 2025, 4398231. <https://doi.org/10.1155/adce/4398231>
- [32] IRITEC, 2003. "Tabas Coal Mine Project, Detailed design report Vol 1, underground mine revision B". Technical report, Iran International Engineering Company (IRITEC).
- [33] Mahdevari, S., Shahriar, K., Sharifzadeh, M., and Tannant, D.D., 2017. "Stability prediction of gate roadways in longwall mining using artificial neural networks". *Neural Computing and Applications*, 28(11), 3537–3555. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2263-2>
- [34] Toupin, R.A., 1965. "Saint-Venant's Principle". *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 18(2), 83–96. <https://doi.org/10.1007/BF00282253>
- [35] Mariano, P.M., and Galano, L., 2015. *Fundamentals of the Mechanics of Solids*. Birkhäuser, Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3133-0>
- [36] Timoshenko, S.P., and Goodier, J.N., 1951. *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, New York.