

### تعیین عرض مناسب پایه حائل در معدن زغال سنگ طبس با استفاده از مدل سازی عددی

محمد رضا زارع<sup>۱</sup>؛ مهدی نجفی<sup>۲\*</sup>؛ جواد غلام نژاد<sup>۳</sup>؛ علی روح<sup>۴</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ استخراج معدن، دانشگاه یزد

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۷/۱۲/۱۰؛ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۸/۰۴/۰۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2019.8151.1358

واژگان کلیدی	چکیده
جبهه کار بلند	روش استخراج جبهه کار بلند یکی از روش های استخراج زغال سنگ با راندمان تولید بالاست که برای تجهیز و آماده سازی آن نیاز به سرمایه گذاری اولیه زیادی است. در روش جبهه کار بلند با پیشروی سینه کار، طبقات سقف در قسمت عقب سینه کار تخریب می شود و به دنبال آن بارهای زیادی در اطراف پهنه های استخراجی و جلوی جبهه کار توزیع می شود. برای محافظت از تونل های اصلی و تونل های دسترسی معدن در برابر تنش های ایجاد شده حاصل از استخراج پهنه از دو راهکار بهره گرفته می شود. راهکار اول که مهم ترین اثر را بر پایداری پهنه دارد، برجای گذاشتن پایه های زنجیری در اطراف پهنه و پایه حائل بین کارگاه استخراج و تونل های اصلی است و راهکار دیگر نصب نگهداری در تونل ها برای کنترل همگرایی تونل هاست. از این رو عرض مناسب پایه حائل به طوری که بیشترین بهره وری از ماده معدنی و بیشترین تأثیر گذاری بر کاهش توزیع تنش های اطراف تونل های اصلی داشته باشد، از اهمیت بسزایی برخوردار است. هدف اصلی این تحقیق به دست آوردن عرض مناسب پایه حائل در انتهای پهنه استخراجی E3 در معدن طبس است به نحوی که تونل های اصلی معدن دارای کمترین میزان همگرایی باشند. ابزار مورد استفاده در این تحقیق مدل سازی عددی با روش تفاضل محدود در محیط نرم افزار <i>FLAC3D</i> است. نتایج مدل های عددی مختلف از پیشروی کارگاه استخراجی نشان داده است که میزان پیشروی بر توزیع تنش ها تأثیر دارد و در فاصله حدود ۸۰ متری از جلو جبهه کار پهنه به تنش های اولیه می رسد. به عبارت دیگر عرض مناسب پایه حائل ۸۰ متر برآورد شده است. همچنین نتایج توجیه اقتصادی نشان داده است که عرض پایه ۸۰ متر سبب می شود حدود ۶۰۰۰ تن زغال سنگ بیشتر استخراج گردد.

معادن علاوه بر موارد فوق بحث ایمنی کارکنان و تجهیزات نیز مطرح است که خود باعث می شود بحث نگهداری سقف به عنوان یکی از مهم ترین عملیات معدنکاری باشد. به طور مرسوم برای استخراج زغال سنگ از روش جبهه کار بلند (*Longwall*) و روش اتاق پایه (*Room and Pillar*) استفاده می شود. روش جبهه کار بلند روشی است که در کانسارهای نسبتاً مسطح و لایه ای با شیب و ضخامت کم

#### ۱- مقدمه

ایجاد فضاهاى زیرزمینی در معادن جهت دسترسی به ماده معدنی موضوعی اجتناب ناپذیر است. جهت تأمین پایداری فضاهاى زیرزمینی، استفاده از سیستم نگهداری مناسب الزامی است. به این منظور از روش های مختلفی استفاده می شود تا سیستم نگهداری با امنیت بالا و هزینه مناسب طراحی و رفتار توده سنگ در برابر فشارها بررسی شود. در

\* یزد؛ صفاییه، دانشگاه یزد- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ کدپستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵؛ شماره ی تلفن: ۰۳۵-۳۱۲۲۲۸۳۴؛ دوزنگار: ۰۳۵-۳۸۲۱۰۹۹۵؛ رایانامه: mehdinaiafi@vazd.ac.ir

(Martin & Maybee, 2000), (Hartman, 1996) (Watson, 2004), (Najafi et al., 2001) (Murali et al., 2001) (al., 2016). پایه حائل ستونی از زغال سنگ است که برای حفظ ورودی اصلی پهنه، بین اتاق نصب تجهیزات استخراجی در انتهای پهنه استخراجی بر جای گذاشته می شود. مهم ترین وظایف پایه های حائل به حداقل رساندن تأثیرات منفی پهنه های مجاور، حفاظت از کارهای معدنی در مقابل عوامل پیش بینی نشده، حفاظت از زیرساخت های مهم معدن تا پایان عمر معدن، کنترل توسعه تنش به تونل های اصلی معدن تا پایان عمر معدن است. به طور کلی مراحل طراحی پایه شامل: تعیین عرض پایه، تخمین بار (تنش) وارد بر پایه، تخمین مقاومت پایه، تخمین فاکتور ایمنی پایه است. طراحی عرض پایه های حائل بر اساس روابط تجربی و تحلیلی و عددی صورت می گیرد. در جدول ۱ تعدادی از روابط تجربی طراحی پایه های حائل بیان شده است.

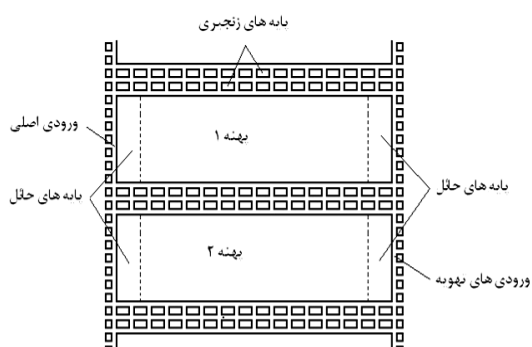
جدول ۱- روابط تجربی طراحی پایه حائل  
(Kendorski & Bunnell, 2007)

$W_p = 0.1H + 13.7$	معدن زغال سنگ بریتانیا
$W_p = 0.4h + 0.1H + 6.1$	بازرسان معدن
$W_p = 0.1H + 4h + 20$	بازرسان معدن پنسیلوانیا
$W_p = 2.675\left(\frac{h}{10} + 20\right)$	قوس فشار
$W_p = \frac{h}{10} + 45$	کینگ و ویتاگر
$W_p = \frac{H * p}{7000 - H}$	آمریکای شمالی

که در آن  $W_p$  عرض پایه حائل به فوت،  $H$  عمق از سطح زمین به فوت،  $h$  ضخامت لایه زغال سنگ به فوت و  $P$  عرض پهنه به فوت است.

در زمینه مدل سازی عددی پایه های زغالی در روش جبهه کار بلند مطالعات زیادی انجام شده است که در ادامه به چند نمونه از آن اشاره شده است. ساستری و نایر با روش المان محدود به بررسی توزیع تنش روی پایه های زنجیری در حین استخراج روش جبهه کار بلند پرداختند. بررسی های آنها نشان داده است که بیشترین تنش به لبه های پایه های زنجیری وارد می شود (Sastry & Nair, 2009). نجفی و همکاران با مدل سازی عددی به بررسی توزیع تنش های کناری و جلویی بر روی پایه های زنجیری در معدن زغال سنگ طبس پرداخته اند. بررسی های انجام شده نشان

(کمتر از ۵ متر) به کار گرفته می شود و در آن یک جبهه کار در عرض یک پهنه بین راهروهای بالایی و پایینی ایجاد و استخراج با کندن برش های کم عرض به صورت پیشرو یا پسرو انجام می شود و معمولاً همراه با آن سقف یا کمر بالا به طور کامل تخریب می گردد. یکی از موارد مهم در طراحی روش جبهه کار بلند طراحی پایه های زنجیری (Chain Pillar)، حائل (Barrier Pillar) و تسلیم شونده (Yield Pillar) است. در این روش پایه های زنجیری بین دو پهنه استخراجی، پایه های تسلیم شونده در مجاورت پایه های زنجیری و پایه های حائل در انتهای پهنه استخراجی بر جای گذاشته می شوند. در شکل ۱، پایه های زنجیری و حائل نشان داده شده است.



شکل ۱- انواع پایه های زغال سنگ در روش جبهه کار بلند مکانیزه (Lu Luo, 1997)

در روش جبهه کار بلند ایمنی تونل ها، تخمین دقیق بار وارد بر آن و جابجایی رخ داده از اهمیت بالایی برخوردار است و در صورت وجود فشار و جابجایی زیاد باید سعی در طراحی مجدد سامانه نگهداری راهروها یا پایه های اطراف کارگاه داشت. اطمینان از سامانه نگهداری انتخاب شده از لحاظ ایمنی و فنی-اقتصادی جهت حفظ تونل ها در یک معدن جبهه کار بلند تا پیش از تخریب کارگاه از اهمیت بالایی برخوردار است. پایه ها با اهداف مختلفی چون کنترل توسعه تنش، حفاظت از تونل ها و پهنه های کناری، کنترل نشست زمین و غیره بر جای گذاشته می شوند. پایه ها باید دارای پایداری کافی باشند و بتوانند فشار حاصل از وزن روباره را تحمل کنند. ابعاد بهینه پایه ها تحت تأثیر پارامترهایی چون عمق روباره، ضخامت لایه سقف، ارتفاع قابل کار، عرض تونل ها، مقاومت لایه زغال سنگ، مقاومت سنگ سقف و کف و عرض و طول جبهه کار است

ژانگ و همکاران به بررسی پاسخ زمین در تونل پایینی روش جبهه کار بلند در شرایط تنش افقی بالا پرداختند. بررسی‌های انجام‌شده نشان داده است که تنش‌های افقی تنش بسزایی در ناپایداری سقف تونل پایینی دارد و لازم است از سیستم نگهداری مناسب در این شرایط استفاده شود (Zhang, et al., 2019).

موضوع بحث این تحقیق بررسی جابجایی‌های ایجادشده در تونل‌های اصلی معادن زغال‌سنگ جبهه‌کار بلند و بررسی نحوه تأثیر فشار حاصل از پیشروی کارگاه استخراج است. به‌هرحال یکی از عواملی که مانع فشار تنش‌های جلویی ناشی از استخراج پهنه بر تونل‌های اصلی می‌شود، عرض پایه حائل برجای‌گذاشته در انتهای پهنه استخراجی است. از این‌رو در این تحقیق سعی شده است با مدل‌سازی سیستم نگهداری در تونل‌های اصلی و در نظر گرفتن پیشروی کارگاه استخراج در پهنه E3 معدن طبس، تأثیر عرض پایه برجای‌گذاشته بر جابجایی ایجادشده در تونل‌های اصلی مورد بررسی قرار دهد و درنهایت عرض مناسب پایه حائل انتخاب شود.

## ۲- توصیف منطقه مورد مطالعه

ناحیه پروده با وسعتی در حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان طبس قرار گرفته است. معدن شماره یک طبس در ناحیه پروده و روی لایه C<sub>1</sub> طراحی شده است. ضخامت روباره در این معدن از ۱۰۰ تا ۶۰۰ متر متغیر است و کانسار مورد نظر با روش جبهه‌کار بلند مکانیزه استخراج می‌شود. بر اساس طراحی انجام شده، عرض پهنه در اولین پهنه ۲۰۰ متر و در بقیه پهنه‌ها ۲۲۰ متر است. طول پهنه‌های استخراجی حدود یک کیلومتر و گاهی بیشتر است که به شیوه پسرو (Retreat) استخراج می‌شوند. نگهداری تونل‌های اصلی توسط پیچ‌سنگ و قاب فلزی قوسی و سیستم بتن مسلح تقویت می‌شود. سقف تونل با استفاده از قاب‌های فلزی کشویی از نوع V29 TH و با سطح مقطع ۱۵/۲ مترمربع نگهداری می‌شود. به‌طور کلی چهار نوع نگهداری در معادن طبس مورد استفاده قرار می‌گیرد که شامل قاب قوسی فلزی با بست‌های کشویی، پیچ‌سنگ، ترکیبی از دو مورد قاب قوسی و پیچ‌سنگ و قاب فلزی جهت نگهداری تقاطع‌ها است. الگوی بولت‌زنی مطابق شکل

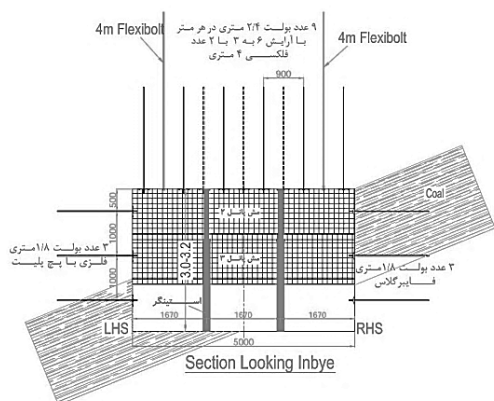
داده است که تنش‌های کناری در فاصله ۴ تا ۵ متری لبه پایه‌های زنجیری به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همچنین پایه زنجیری با عرض ۲۸ متر دارای ضریب اطمینان کافی بوده و از پایداری خوبی برخوردار است (Najafi, et al., 2010). با استفاده از مدل‌سازی عددی به بررسی توزیع تنش بر روی پایه‌های حائل در معدن سوا نورد (Svea Nord) پرداختند. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان داده است که حدود ۱۲ متر از پایه دچار شکست می‌شود و بیشتر پایه به‌صورت سالم و دست‌نخورده باقی می‌ماند. همچنین بررسی‌های آنها نشان داده است که پایه با عرض ۲۵-۳۰ متر می‌تواند پایداری تونل‌های اصلی را تأمین کند (Shabanimashcool & Li, 2013). نجفی و همکاران با استفاده از تحلیل احتمالاتی و مدل‌سازی عددی به احتمال شکست پایه‌های زنجیری در معدن زغال‌سنگ طبس پرداختند (Najafi, et al., 2016). دامغانی به بررسی تأثیر شیب لایه بر میزان تنش‌ها و جابه‌جایی اطراف پهنه در معدن زغال‌سنگ طبس با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D پرداخته است. بررسی‌های انجام‌شده نشان داده است که میزان حداکثر فشار پایه‌ای کناری برای دو شیب ۱۲ و ۴۲ درجه تقریباً یکسان است؛ با این تفاوت که در شیب ۴۲ درجه حداکثر تنش در فاصله کمتری از دیواره راهرو تشکیل می‌شود (Damghani, 2014). کیانگ‌لینگ و همکاران به بررسی توزیع تنش‌های کناری بر روی راهروهای روش جبهه‌کار بلند در اثر فرآیندهای دینامیکی پرداختند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داده است که ماکزیمم تنش‌های کناری وقتی به راهروها وارد می‌شود که فاصله از منطقه تخریب حدود ۸ متر است (Qiangling, et al., 2015). منصوری و همکاران به بررسی بالآمدگی کف تونل‌های معدن زغال‌سنگ طبس با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداختند و با توجه به شرایط مختلف سیستم نگهداری کف تونل‌های باربری معدن زغال‌سنگ طبس را پیشنهاد دادند (Mansoori, et al., 2017). کوی و همکاران به بررسی توزیع تنش در کف لایه زغال‌سنگ در روش استخراج جبهه‌کار بلند با تخریب زغال بالایی پرداختند. بررسی‌های انجام شده با مدل‌سازی عددی و مطالعات میدانی نشان داده است که شکل راهروها و آرایش آنها تأثیر بسزایی بر توزیع تنش دارد (Cui, et al., 2018).

تعیین عرض مناسب پایه حائل در معدن زغال سنگ طبس با استفاده از مدل سازی عددی: ص ۱۸۳-۲۰۱

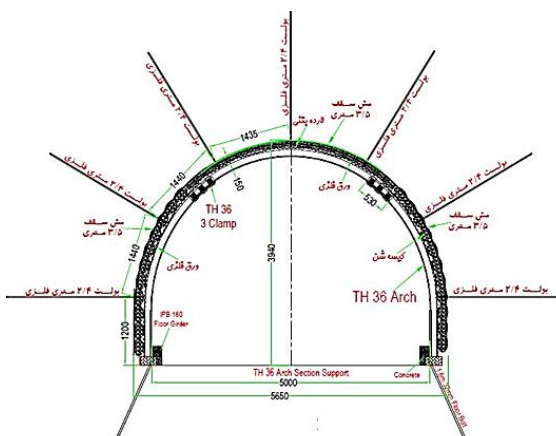
راهرو به نصب ۹ پیچ سنگ در یک متر سقف کاهش می یابد که در دو ردیف ۶ تایی و ۳ تایی نصب می شوند. در کنار آرایش فوق همواره در سمت پهنه در فواصل یک متر فلکسی بولت ۴ متری حفر می شود همان طور که در شکل ۳، نشان داده شده است (Anon, 2005).

از آنجا که هدف این تحقیق بررسی عرض پایه حائل در معدن زغال سنگ طبس در پهنه E3 است، وضعیت تونل های اصلی پایه حائل و نیز تونل های Main Gate و Tail Gate در شکل ۴ نشان داده شده است.

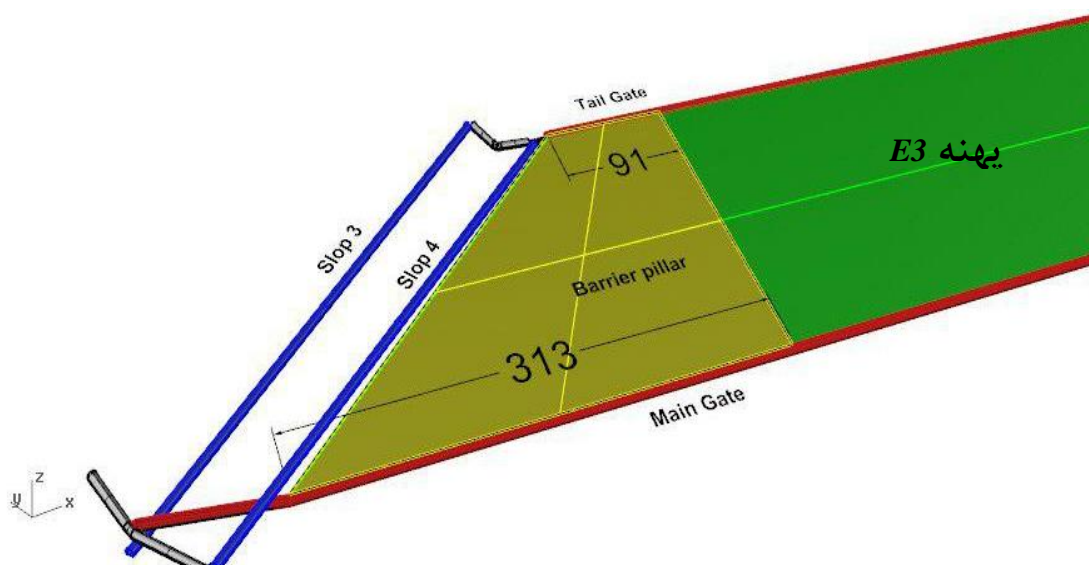
نصب شده است. قاب های فولادی کاملاً با شیت های موج دار یا لارده های بتونی پوشش داده شده اند. فضای پشت شیت ها با واریزه یا کیسه شن پر شده است (Anon, 2005). سیستم نگهداری تونل های باربری (Main Gate) و تهویه (Tail Gate) بدین صورت است که در هر متر از سقف تونل باربری ۱۳ عدد پیچ سنگ در دو ردیف ۷ تایی و ۶ تایی با طول ۲/۴ متر و علاوه بر آن سه عدد پیچ سنگ فایبرگلاس با طول ۱/۸ متر در دیواره سمت کارگاه و سه عدد پیچ سنگ فلزی در دیواره سمت پایه حائل نصب می شوند. در تونل تهویه به علت فشار کمتر چگالی نصب پیچ سنگ در سقف



شکل ۳- سیستم نگهداری راهرو باربری (Anon, 2005)



شکل ۲- سیستم نگهداری تونل های اصلی (Anon, 2005)



شکل ۴- وضعیت تونل های اصلی، پایه حائل و تونل های Main gate و Tail gate در معدن زغال سنگ طبس

### ۳- مدل‌سازی عددی

در حالت کلی طراحی پایه و راهروها جزئی از طراحی معدن است که در مراحل مختلف و با توجه به اطلاعات مرحله، صورت می‌پذیرد. در معدن طبس، ابتدا با روشی محافظه‌کارانه در جمع‌آوری اطلاعات و استفاده از ضریب ایمنی بالا، با روش‌های تجربی به طراحی پایه و راهروها پرداخته شده که طراحی به علت عدم وجود تجربه قبلی، اطلاعات اولیه اندک و شرایط خاص منطقه مشکل بوده است. در ادامه با مقایسه ویژگی‌ها و رفتار لایه زغال‌سنگ با سایر نقاط جهان بررسی‌هایی صورت گرفته که هدف تطبیق و سازگاری روش‌های موجود با این معدن بوده است. پس از شروع کار معدن لازم است رفتار پایه و راهرو از طریق جمع‌آوری داده در خصوص استحکام لایه زغال‌سنگ و لایه‌های اطراف آن به‌دقت تحت نظر باشد که این کار با بررسی عددی منطقه امکان‌پذیر است. از این‌رو در این تحقیق به‌منظور بررسی میزان تنش‌های واردشده بر تونل‌های اصلی و محاسبه عرض پایه حائل در انتهای پهنه استخراجی  $E3$  از روش عددی تفاضل محدود (*Finite Difference*) (نرم‌افزار *FLAC3D*) استفاده شده است. بر این اساس مدل‌سازی عددی منطقه مورد مطالعه جهت رسیدن به هدف تحقیق به شرح زیر انجام شده است:

- ساخت هندسه مدل اولیه
- انتخاب مدل رفتاری و تعیین خصوصیات ماده
- اعمال شرایط مرزی و اولیه
- حفر تونل‌های اصلی معدن و به تعادل رسیدن مدل
- اعمال سیستم نگهداری تونل‌های اصلی و به تعادل رسیدن مدل
- حفر راهروهای بالایی و پایینی پهنه (گالری باربری و تهویه) و اعمال سیستم نگهداری، انجام عملیات استخراج پهنه مدل‌سازی تخریب، مدل‌سازی نگهداری قدرتی و به تعادل رسیدن مدل
- حل و بررسی مدل ساخته‌شده و اصلاح آن در صورت نیاز
- تفسیر نتایج

### ۳-۱- ساخت هندسه اولیه مدل

در مدل‌سازی پهنه جبهه‌کار بلند به علت محدودیت ظرفیت مدل‌سازی و زمان‌بر بودن حجم بالای پردازش داده‌ها، معمولاً از ابعادی کوچک‌تر از ابعاد واقعی استفاده می‌شود؛ اما این ابعاد را باید به‌نحوی در نظر گرفت که بیانگر نتایج واقعی برای پهنه باشد. عرض واقعی پهنه برابر ۱۹۰ متر در شیب ۱۸ درجه است. عمق لایه زغال‌سنگ در ۳۴۰ متری از سطح زمین واقع شده که به‌منظور اجتناب از افزایش المان‌های مدل‌سازی و آسان‌سازی مدل، مقدار اضافی آن (۲۵۰ متر) به‌صورت بار اعمال شده است. طول واقعی پهنه ۱۲۰۰ متر است که در مدل‌سازی به‌منظور کاهش حجم محاسبات غیرضروری، طول مدل در راستای محور  $Y$  ۲۲۰ متر در نظر گرفته شد. محدوده ۱۵۰ متر از این طول جهت اجرای برش‌های استخراجی و برداشت داده‌های مدل‌سازی مدل شده است. بر این اساس ابعاد مدل بر اساس اطلاعات موجود، ۲۲۰ متر در جهت محور  $X$  (به‌موازات عرض پهنه)، ۲۵۰ متر در جهت محور  $Y$  (به‌موازات طول پهنه) و ۱۸۰ متر در جهت محور  $Z$  (عمق کار معدنی) در نظر گرفته شده است.

تونل‌های اصلی شامل تونل ۳ و ۴ است که با مقطع نعل اسبی به عرض ۵ متر و ارتفاع ۴ متر با گام پیشروی ۵ متر حفر شده‌اند. گالری تهویه (*Tail Gate*) و باربری (*Main Gate*) (گالری‌ها) به شکل مستطیلی با ابعاد ۵ متر عرض و ۳ متر ارتفاع در دو طرف پهنه طراحی و اجرا شده‌اند. این تونل‌ها به شکل مرحله‌ای با گام ۵ متر حفر شده‌اند. ضخامت لایه‌های سقف و کف لایه زغال‌سنگ در جهت پیشروی و همچنین در جهت امتداد کارگاه تا حدودی متغیر است اما بر اساس شرایط کاری با نرم‌افزار، ضخامت لایه‌ها در تمام جهات یکسان در نظر گرفته شده است. در مجموع ۵ لایه از عمق تا فاصله ۲۵۰ متری از سطح زمین در نظر گرفته شده‌است. برای مدل‌سازی هندسی مدل اولیه ابتدا ابعاد مدل (پهنه استخراجی، تونل تهویه، تونل باربری و کارگاه استخراج و برش‌های استخراجی، عمق لایه زغال‌سنگ، ضخامت لایه‌های بالایی و پایینی زغال‌سنگ و ...) با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی *Rhinoceros 5.0* شبیه‌سازی شده است؛ سپس با کمک نرم‌افزار تبدیلی *Kubrix* مدل، مش‌بندی شده و به نرم‌افزار *FLAC3D* منتقل شده است.

### ۲-۳- مدل رفتاری، تخصیص خصوصیات لایه ها و تعادل اولیه

بعد از ساخت هندسه مدل، خصوصیات مواد به مدل اعمال می شود. در این تحقیق به منظور تحلیل مدل، از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. هندسه مدل و مش بندی، مربوط به شرایط فیزیکی مسئله هستند. پاسخ مدل در واقع نتیجه عملکرد بارها و تنش های اعمالی به مدل است. خصوصیات لایه ها مربوط به توده سنگ مطابق با جدول ۲، به مدل اختصاص داده شده است.

شرایط مرزی برای تمام صفحات قائم به صورت غلتکی تعریف شده و جابجایی مواد در راستای قائم مجاز است (کف مدل نیز ثابت شده است). در مدل سازی لایه زغال سنگ به صورت شیب دار امکان استفاده از دستور محدوده (*Range*) نیست. از این رو تمامی بخش های مدل باید از ابتدا جداگانه ایجاد و نام گذاری شوند تا بتوان در بخش برداشت برش ها (*Cut*) زون های مورد نظر را حذف کرد. در شکل ۵ مدل خروجی از نرم افزار *Rhinoceros* در نرم افزار *FLAC3D* نشان داده شده است.

جدول ۲- خواص اختصاص داده شده به لایه ها در مدل سازی عددی (*Tabas Coal mine, 2014*)

پارامتر	آحاد	ماسه سنگ	گل سنگ	سیلت استون ماسه ای	سیلت استون	زغال سنگ	ناحیه تخریب
چسبندگی	مگاپاسکال	۸,۶۹	۰,۹۴	۰,۴۴۳	۱,۳	۰,۵	۰,۵
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۲۱,۷۵	۱۸,۶۲	۳۱,۷۵	۲۴,۱۲	۱۵-۲۵	۱۸
جرم مخصوص	کیلوگرم بر مترمکعب	۲۷۰۰	۲۶۳۰	۲۵۰۰	۲۷۲۰	۱۶۰۰	۱۵۰۰
مدول برشی	گیگاپاسکال	۱,۴۱۹	۰,۷۶۱	۱,۱۲۷	۰,۸۹۵	۱,۲۶	۰,۷
مدول حجمی	گیگاپاسکال	۲,۳۶۵	۱,۷۵	۱,۸۷۸	۱,۴۹۲	۲,۱۱	۱
مدول یانگ	گیگاپاسکال	۳,۵۴	۱,۹	۲,۸۱	۲,۲۵	۳,۱۵	۱,۶
متوسط مقاومت فشاری تک محوری (سنگ بکر، گمانه SA2)	مگاپاسکال	۶۱,۱	۱۰,۱	۲۸,۱	۲۵,۶	۱۶	-

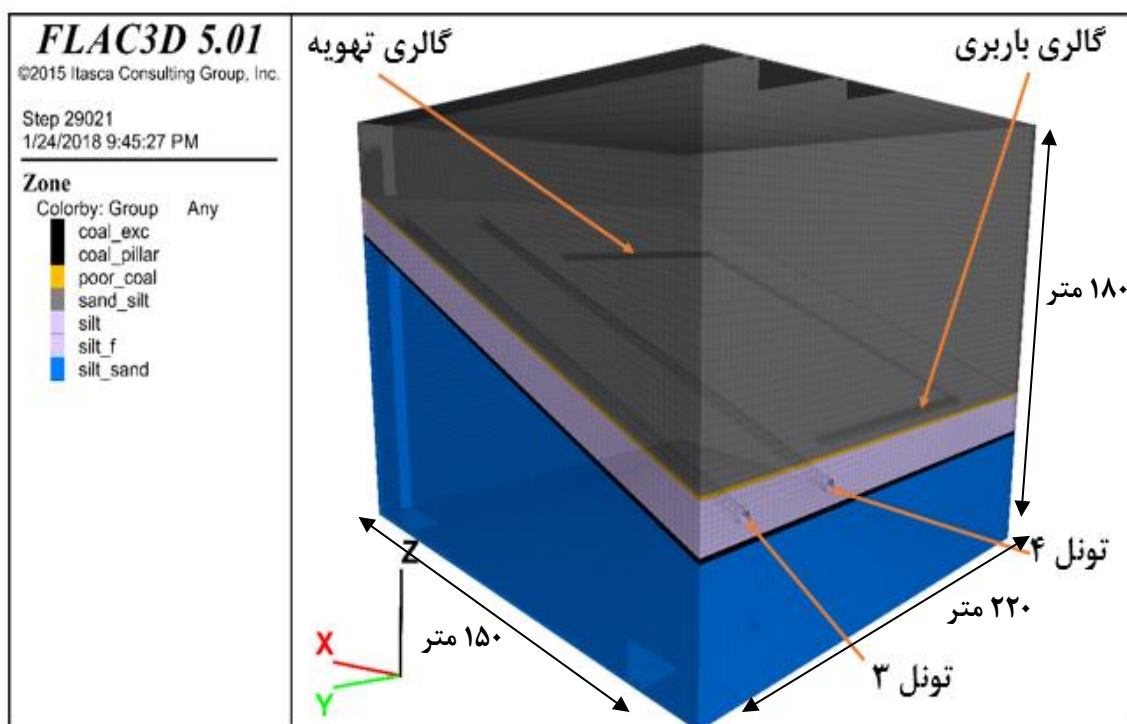
نحوه اجرای برنامه به این صورت است که ابتدا مدل بلوکی با وارد شدن بار لیتواستاتیک بدون هیچ گونه عملیات استخراج به تعادل می رسد. در این مدل ۲۵۰ متر از فشار روباره به صورت بار به سطح مدل اعمال شد. جهت تسهیل در ایجاد تعادل اولیه و بررسی تمرکز تنش ها از مدل الاستیک استفاده شده است.

پس از به تعادل رسیدن مدل، باید جابجایی های رخ داده در مدل صفر شود. در اولین مرحله، تونل های اصلی به صورت نعل اسبی حفر می شود و برای نگهداری تونل های اصلی از ۹ پیچ سنگ به صورت شعاعی و قاب ها با مشخصات معادل با لایه لاینر به ضخامت ۷ سانتیمتر و مدول الاستیک ۶,۰۹۸ گیگاپاسکال نصب شده است. پس از آن حفر راهروهای دسترسی به صورت پیشرو صورت پذیرفته است و مطابق با شرایط معدن طبس عرض گالری های باربری و

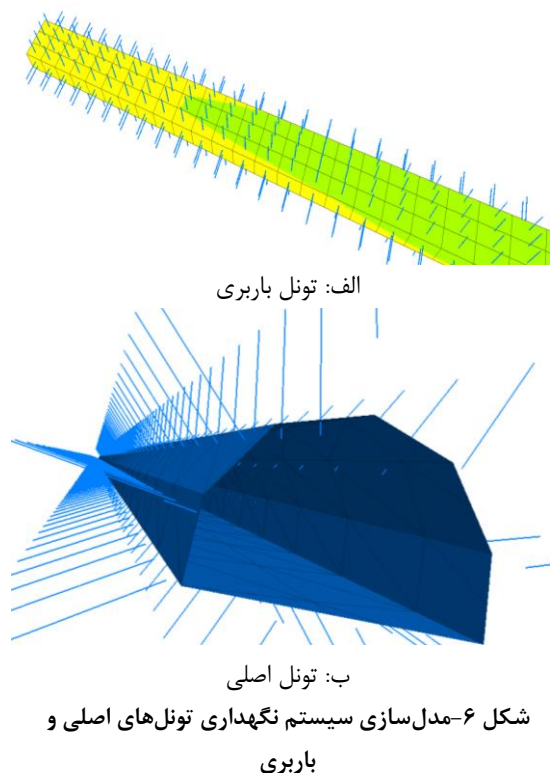
تهویه ۵ متر و ارتفاع آن ۳ متر در نظر گرفته شده است. سیستم نگهداری در نظر گرفته شده برای گالری ها شامل نصب پیچ سنگ در هر متر سقف و دو ردیف پیچ سنگ ۴ تایی و در دیواره ها دو ردیف پیچ سنگ ۲ تایی است که پیچ سنگ های سمت کارگاه از نوع فلکسی اند همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است. مشخصات هر سه نوع پیچ سنگ مورد استفاده در تونل ها در جدول ۳، نشان داده شده است.

پس از به تعادل رسیدن مدل بعد از حفاری گالری تهویه و باربری داده های مربوط به جابجایی قائم آنها از مدل استخراج شده که حدود ۲۰ میلی متر بوده است. بررسی داده های ابزار دقیق برداشت شده از تل تیل ها در معدن طبس نشان داده است که متوسط جابجایی این تونل ها حدود ۱۸ میلی متر و در یک نقطه به ۲۲ میلی متر رسیده است (*Tabas coal mine, 2018*).





شکل ۵-مدل اولیه در *FLAC3D*



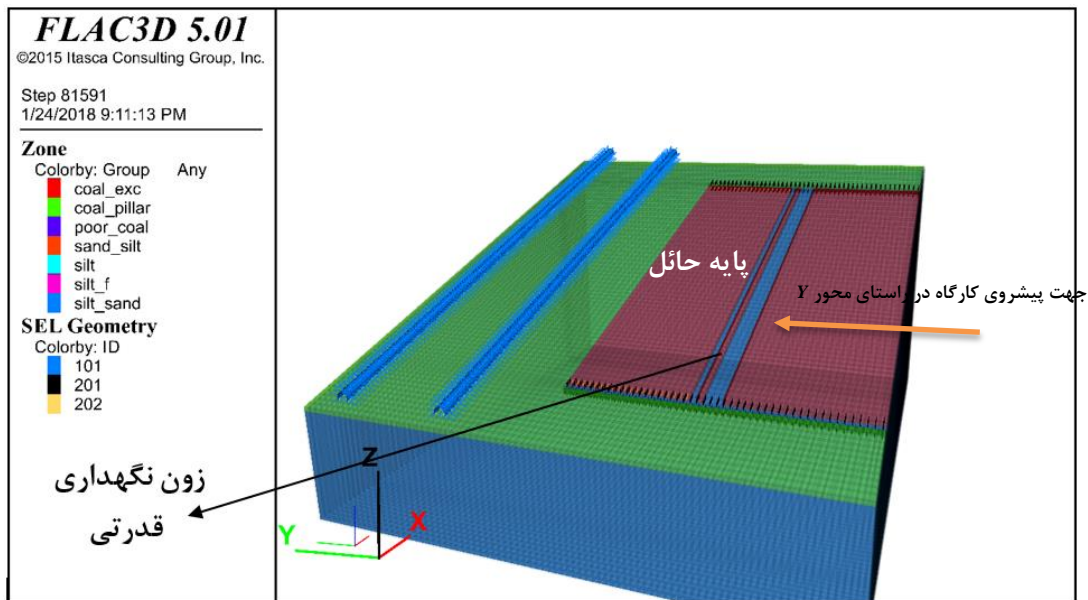
شکل ۶-مدل‌سازی سیستم نگهداری تونل‌های اصلی و باربری

با مقایسه این داده‌ها با داده‌های برداشت‌شده از تیل‌ها میزان صحت مدل ساخته شده مشخص شده است. پس از حفر تونل‌ها، کارگاه به‌صورت پسر و از سمت تونل باربری به سمت تونل تهویه حفر شده است و با برداشت هر برش پیچ‌سنگ‌های فلکسی سمت کارگاه حذف شده است. قبل از حل مدل زون معادل نگهداری‌های قدرتی اعمال شده و پس از آن مدل حل شده و به تعادل رسیده است (شکل ۷). در این تحقیق به‌منظور مدل‌سازی تخریب پس از هر برش، فضای خالی ایجادشده، توسط مواد پرکننده با خصوصیات پایین پر می‌شوند. خصوصیات مواد پرکننده به‌نحوی در نظر گرفته شده است که با مواد تخریب‌شده از سقف یکسان باشد. ابعاد واقعی برش در معدن زغال‌سنگ طبس ۰/۸ متر است. در این تحقیق فرض شده است که حدود ۳ برش با یکدیگر در مدل عددی در نظر گرفته شود. البته به‌منظور ساده‌سازی و کاهش زمان اجرای حل مدل و نیز یکسان بودن ابعاد مش‌ها و برش‌ها، عرض هر برش ۲/۵ متر در نظر گرفته شده است.

تعیین عرض مناسب پایه حائل در معدن زغال سنگ طبس با استفاده از مدل سازی عددی: ص ۱۸۳-۲۰۱

جدول ۳- خصوصیات پیچ سنگ های استفاده شده در تونل های اصلی و راهروها (Tabas Coal mine, 2014)

ردیف	خصوصیات	آحاد	فلکسی	فایبرگلاس
۱	مدول یانگ	گیگاپاسکال	۷,۲۲	۱,۰۵
۲	نیروی چسبندگی دوغاب	مگانیوتن بر متر	۱,۴۲	۱,۵۸
۳	سختی دوغاب	مگاپاسکال	۲۰,۹۵	۱۰,۸۳
۴	محیط آشکار دوغاب	میلی متر	۸۴,۸	۹۴,۲
۵	سطح مقطع	میلی متر مربع	۰,۴۱	۰,۳۸
۷	مقاومت کششی	مگانیوتن	۰,۶	۰,۰۸



شکل ۷- مدل سازی نگهداری قدرتی

تعریف شده، این زون از همگرایی سقف و کف کارگاه جلوگیری می کند. این مدل سازی دقیقاً مشابه فرآیند نگهداری در کارگاه استخراج جبهه کار بلند است.

برای مدل سازی نگهداری قدرتی ابتدا یک ناحیه (Zone) با مشخصات فولاد تعریف شده است (جدول ۴)؛ سپس با استفاده از تابع برنامه نویسی (Fish) این زون به محل حفاری شده منتقل می شود. با توجه به صلب بودن زون

جدول ۴- پارامترهای ورودی مدل سازی نگهدارنده قدرتی

آحاد	مقادیر	نماد	خصوصیات
کیلوگرم بر مترمکعب	۴۰۰۰	$\gamma$	چگالی
گیگاپاسکال	۳۰	$G$	مدول برشی
گیگاپاسکال	۱۰۰	$K$	مدول حجمی



#### ۴- تعیین عرض مناسب پایه حائل

به‌منظور تعیین عرض مناسب پایه حائل، جابه‌جایی‌های ایجادشده در اثر پیشروی کارگاه در تونل‌های اصلی، تنش‌های کناری و جلویی بر روی راهروها و پایه حائل و وضعیت کنتورهای پلاستیک در اطراف پهنه بررسی شده است.

#### ۴-۱- بررسی جابجایی تونل‌های اصلی در اثر استخراج پهنه

در اثر حفر کارگاه استخراج و تخریب سقف تعادل تنش‌ها در منطقه به هم می‌خورد و برای این که مجدداً به تعادل برسند، جابه‌جایی در اطراف کارگاه استخراج اتفاق می‌افتد. این جابجایی‌ها در پشت جبهه‌کار به علت تخریب سقف زیاد است و در جلوی جبهه‌کار با دور شدن از جبهه‌کار کاهش می‌یابد. به‌منظور به دست آوردن میزان جابه‌جایی مجاز در تونل‌های اصلی از مفهوم کرنش بحرانی (*Critical Strain*) ساکورایی استفاده شده است. ساکورایی در سال ۱۹۸۶ شیوه‌ای را به‌منظور پایداری سازه با استفاده از کرنش بحرانی حاصل از نتایج آزمایش‌های فشار نامحصور روی سنگ پیشنهاد کرده است (*Sakurai, 1997*). بر این اساس کرنش بحرانی برابر با نسبت مقاومت فشاری تک‌محوره به مدول الاستیسیته است.

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \quad (1)$$

که در آن  $\varepsilon_c$  کرنش مجاز تک‌محوری،  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک‌محوری (*MPa*) و  $E$  مدول یانگ (*MPa*) است. ساکورایی سه تراز هشدار خطر برای بررسی پایداری تونل‌ها ارائه کرده است.

$$\text{Log } \varepsilon_c = -0/25 \text{ Log } E - 0/85 \quad (2) \quad \text{تراز بالا}$$

$$\text{Log } \varepsilon_c = -0/25 \text{ Log } E - 1/22 \quad (3) \quad \text{تراز میانی}$$

$$\text{Log } \varepsilon_c = -0/25 \text{ Log } E - 1/59 \quad (4) \quad \text{تراز پایین}$$

که در این روابط  $E$  مدول یانگ توده‌سنگ سالم ( $\frac{kgf}{cm^2}$ ) و  $\varepsilon_c$  کرنش بحرانی در حالت مقاومت فشاری تک‌محوره است (*Ahmadi et al., 2013*).

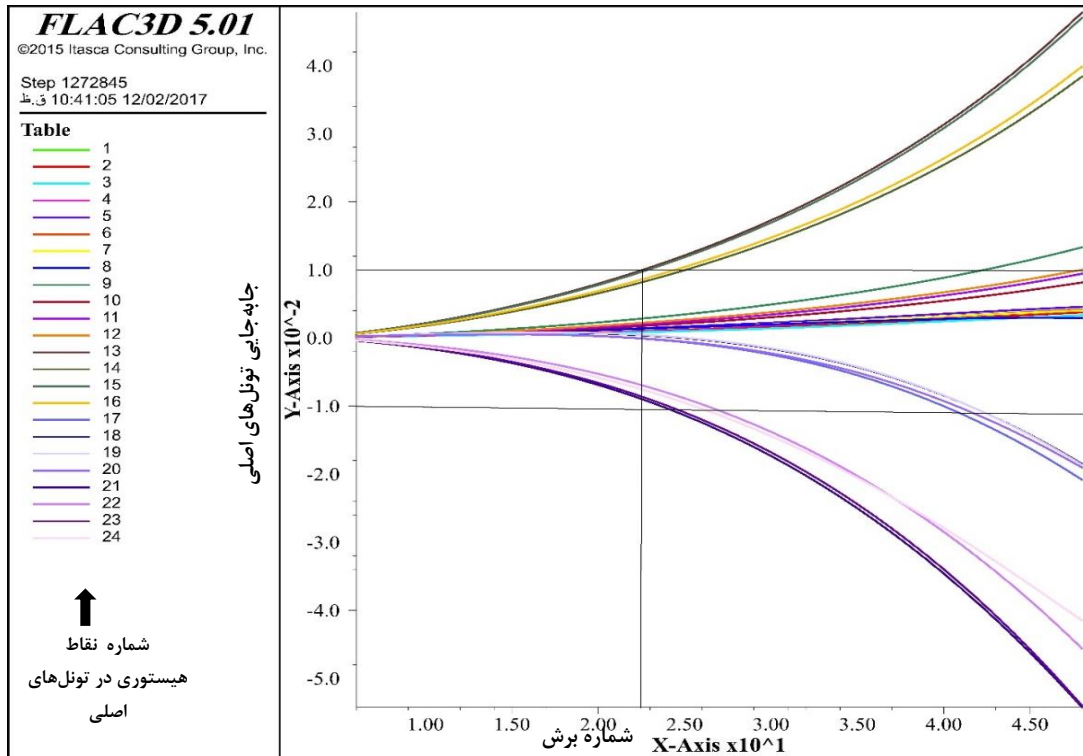
با توجه به پایداری بلندمدت تونل‌های اصلی معدن

طیس، برای ارزیابی پایداری از مقدار حد پایینی کرنش بحرانی برای تعیین کرنش برشی بحرانی استفاده می‌شود. تونل‌های اصلی در سنگ سیلتستون قرار دارند و طبق رابطه ساکورایی جابجایی مجاز ۱۰ میلی‌متر است. در مدل‌سازی به‌منظور بررسی اثر پیشروی کارگاه استخراج بر همگرایی تونل‌های اصلی، مقدار جابجایی در نقاط سقف، کف و دیواره تونل‌های اصلی به ثبت رسیده است. نمودار جابجایی تونل‌های اصلی برحسب تعداد برش‌ها در مدل عددی (طول هر برش ۲/۵ متر است) در شکل ۸ رسم شده است. مطابق شکل مذکور هنگامی که جبهه‌کار در برش ۲۳ که در فاصله ۸۰ متری از تونل‌های اصلی قرار دارد تونل‌های اصلی طبق معیار ساکورایی دارای جابجایی مجاز هستند؛ بنابراین می‌توان بیان کرد پهنه نباید بیشتر از این پیشروی کند و در فاصله ۸۰ متری تونل‌های اصلی باید متوقف شود.

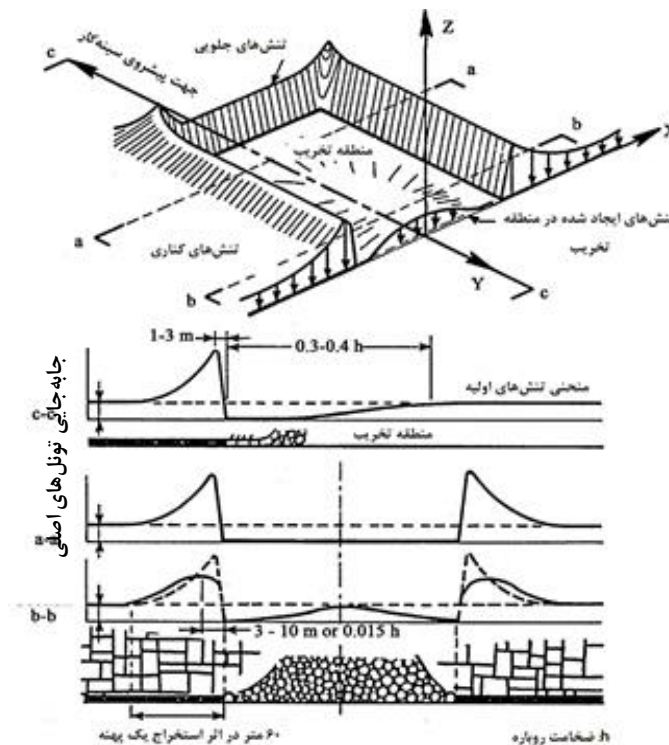
#### ۴-۲- بررسی وضعیت تنش‌های کناری و جلویی

تنش‌های مکانیکی مرسوم‌ترین تنش‌ها در فعالیت‌های عمرانی و معدنی هستند و در اثر حفاریاتی که در داخل زمین ایجاد می‌شوند، شکل می‌گیرند. شدت و مقدار تنش‌های مکانیکی به شکل و ابعاد فضای باز شده و نیز ضخامت روباره بستگی دارد. همزمان با استخراج لایه زغال‌سنگ به روش جبهه‌کار بلند، توزیع تنش در منطقه به هم می‌خورد و تنش‌های کناری (*Side Abutment stresses*) و جلویی (*Front abutment stresses*) ایجاد می‌شوند. تنشی که در امتداد پیشروی سینه‌کار (در امتداد طول پهنه (محور  $Y$ ) اندازه‌گیری می‌شود را تنش جلویی و تنشی که در امتداد جبهه‌کار (در امتداد عرض پهنه (محور  $X$ ) اندازه‌گیری می‌شود را تنش کناری می‌نامند. توزیع تنش‌های ایجادشده در اطراف پهنه‌های استخراجی روش جبهه‌کار بلند مکانیزه در شکل ۹، نشان داده شده است. در مدل مورد بررسی لایه زغال‌سنگ شیب‌دار است و به همین دلیل توزیع تنش‌ها با رفتن به عمق روند افزایشی گرفته‌اند. به‌منظور فهم بهتر از نحوه ثبت تنش‌های کناری و جلویی نقاطی که از آنها نمودارهای تنش‌های کناری و جلویی ثبت شده است، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

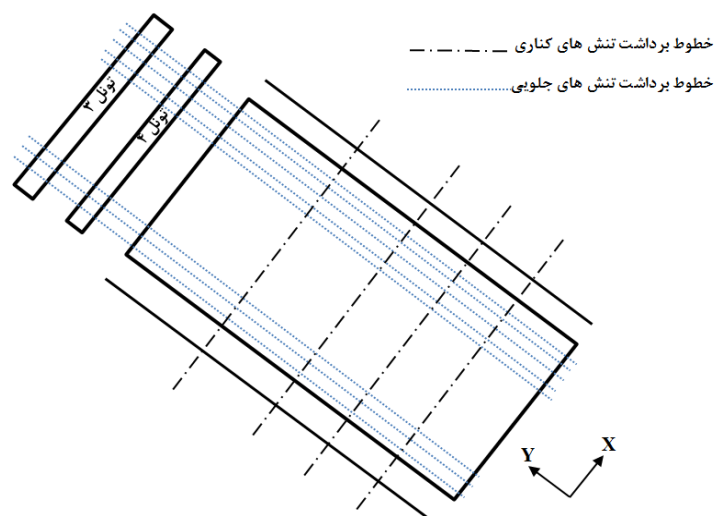
تعیین عرض مناسب پایه حائل در معدن زغال سنگ طبیس با استفاده از مدل سازی عددی: ص ۱۸۳-۲۰۱



شکل ۸- تعیین فاصله جبهه کار از تونل های اصلی



شکل ۹- توزیع تنش در اطراف کارگاه استخراج روش جبهه کار بلند مکانیزه (Peng, 2006)



شکل ۱۰- موقعیت خطوط برداشت تنش‌های کناری و جلویی

#### ۴-۲-۱- بررسی تنش کناری

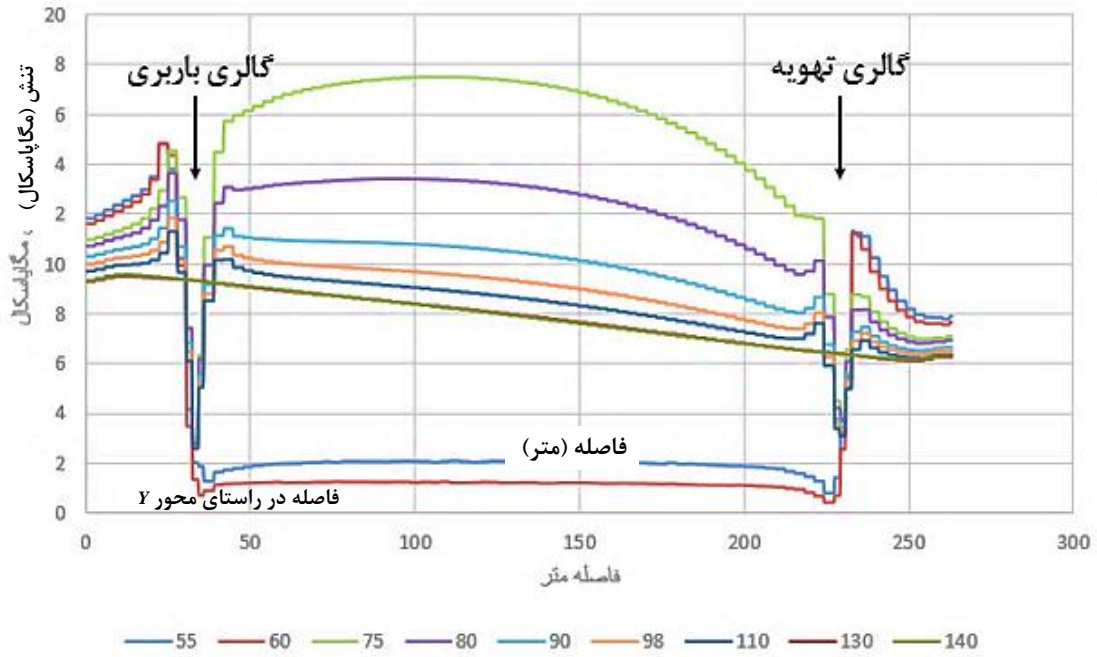
با بررسی تنش کناری در جلو و پشت جبهه‌کار دو نتیجه استدلال می‌شود: اول آنکه حداکثر تنش در لبه جبهه‌کار است و دوم در عرض جبهه‌کار تنش ثابت نیست که به دلیل شیب‌دار بودن لایه است. روند تغییرات تنش‌های کناری نسبت به شیب لایه با فاصله گرفتن از جبهه‌کار در جهت محور  $Y$ ، کم شده و به شیب ثابتی می‌رسد. بررسی روند تغییرات عرضی تنش‌های کناری در امتداد محور  $Y$  نشان می‌دهد (خطوط زیر شکل نشان‌دهنده مترژی است که در راستای محور  $Y$  نمودار تنش‌های کناری استخراج شده است) که نمودار تنش‌های کناری در فاصله حدود ۷۰ متری از جلو جبهه‌کار به شیب ثابت رسیده است همان‌طور که در شکل ۱۱، نشان داده شده است. در نزدیک گالری باربری تنش‌ها به حداکثر مقدار خود می‌رسد که نشان‌دهنده شرایط حساس‌تر در تونل باربری است. البته با توجه به اینکه در طرح اولیه معدن عرض پایه حائل در قسمت گالری باربری حدوداً به ۳ برابر عرض پایه حائل در قسمت تونل تهویه یعنی ۳۵۰ متر در نظر گرفته‌اند (Anon, 2005) جای نگرانی از آسیب‌دیدگی کلی تونل باربری نیست. به علت متغیر بودن عرض پایه در بالا و پایین پهنه و محدودیت مدل‌سازی کل پهنه، برای بررسی پایه حائل از نظر تنش‌های جلویی از قسمت بالایی پهنه اطلاعات برداشت شده است.

#### ۴-۲-۲- بررسی تنش‌های جلویی

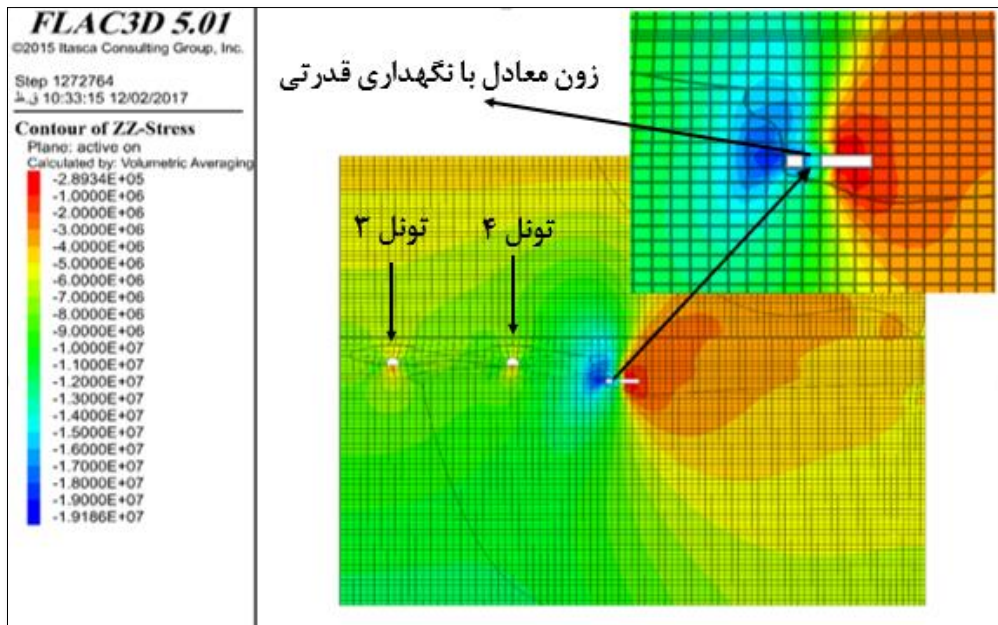
برای بررسی اثر پیشروی جبهه‌کار بر روی تونل‌های اصلی می‌توان از نمودار تنش‌های جلویی نیز کمک گرفت و نموداری را که حداقل اثر بر تنش‌های اطراف تونل دارد، در نظر گرفت و گام پیشروی مربوط به آن را حداکثر گام پیشروی انتخاب کرد. کنتور تنش‌های جلویی نسبت به پیشروی جبهه‌کار در شکل ۱۲ نشان داده شده است. علاوه بر این نمودار تنش‌های جلویی در سه وضعیت نزدیک تونل تهویه، باربری و میانه پهنه در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۳ با پیشروی جبهه‌کار، توزیع تنش‌ها در نیمه فوقانی پهنه در نزدیکی تونل تهویه در فاصله حدود ۸۰ متری از تونل‌های اصلی اثری بر توزیع تنش‌های اطراف تونل نداشته است؛ همچنین با پیشروی جبهه‌کار، توزیع تنش‌ها در نیمه پایینی پهنه در نزدیکی تونل باربری در فاصله ۱۳۳ متری از تونل‌های اصلی اثری بر توزیع تنش‌های تونل‌های اصلی نداشته است (شکل ۱۴). در عمل هم این موضوع در طرح پایه طیس در نظر گرفته شده است و طول پایه حائل در پایین پهنه و نزدیک تونل باربری نزدیک به ۳/۵ برابر بالای پهنه در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۶ توزیع تنش قائم در کف جبهه‌کار و در راستای طول جبهه‌کار (محور  $Y$ ) آورده شده است.

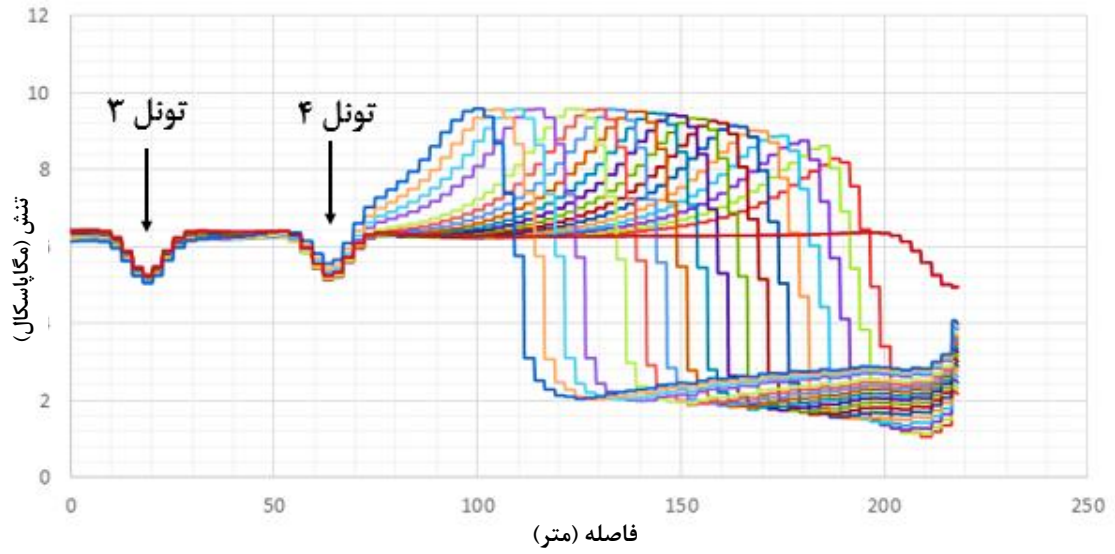
تعیین عرض مناسب پایه حائل در معدن زغال سنگ طیس با استفاده از مدل سازی عددی: ص ۱۸۳-۲۰۱



شکل ۱۱- روند تغییرات تنش های کناری در امتداد محور Y

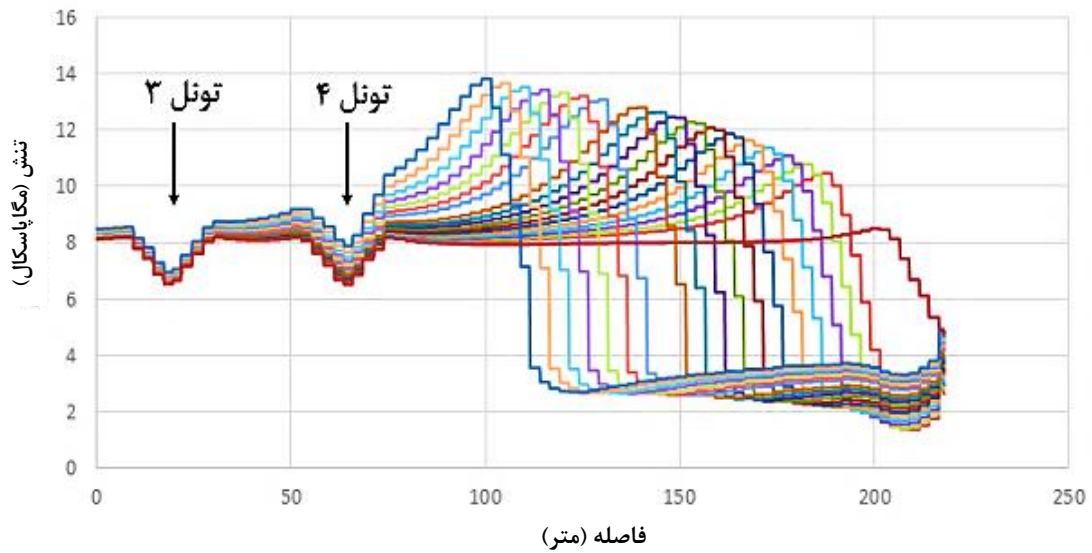


شکل ۱۲- کنتورهای تنش ها در صفحه عمود بر پیشروی جبهه کار



فاصله از تونل تهویه در راستای X  
 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22  
 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42

شکل ۱۳- تغییرات تنش تکیه‌گاهی جلویی در نزدیکی تونل تهویه

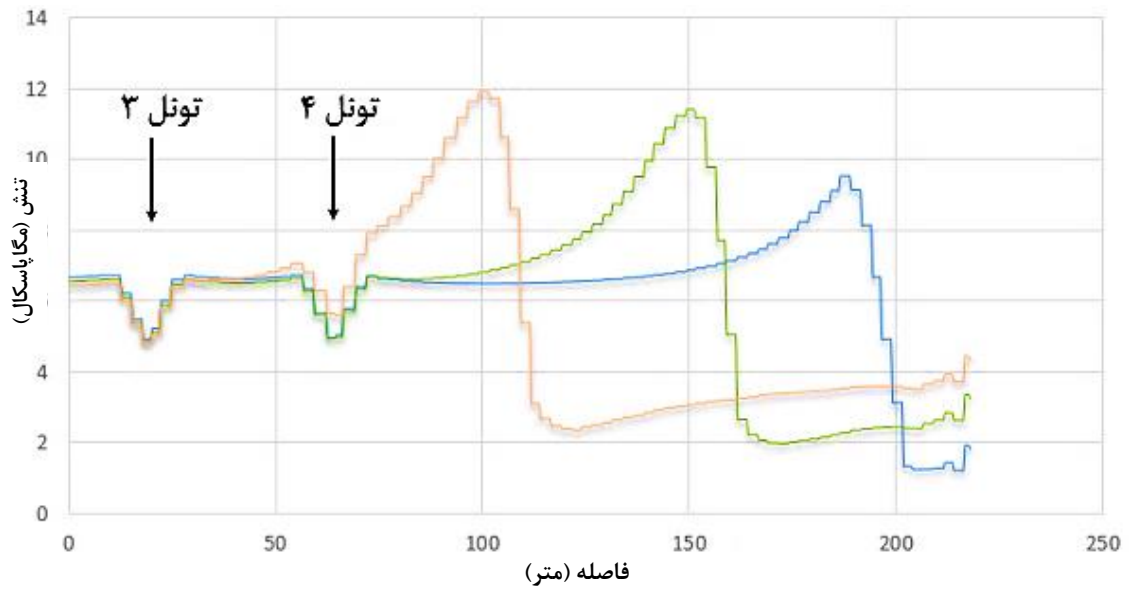


فاصله از تونل باربری در راستای X  
 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22  
 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42

شکل ۱۴- تغییرات تنش تکیه‌گاهی جلویی در نزدیک تونل باربری

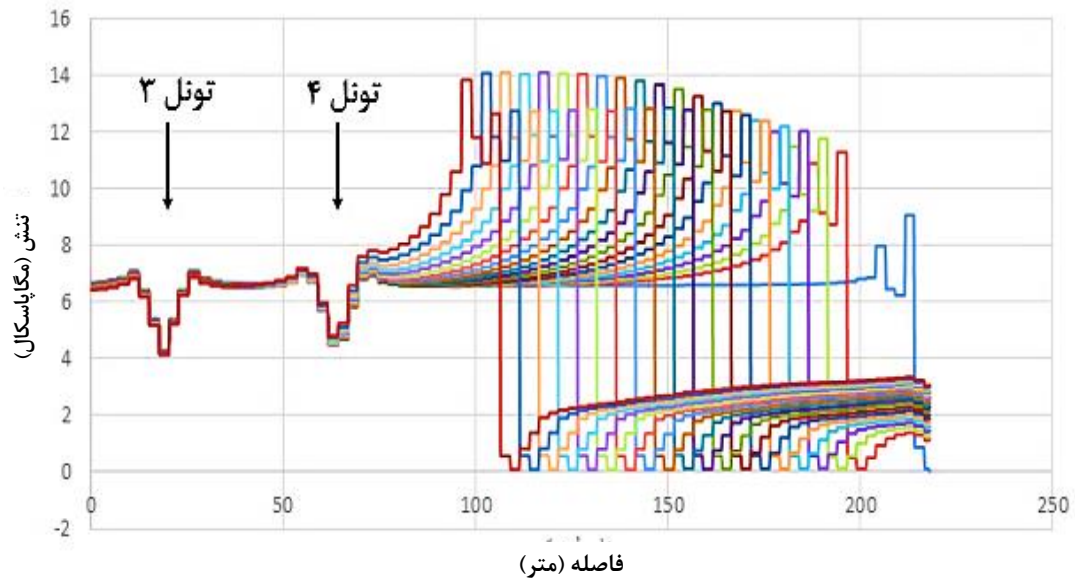


تعیین عرض مناسب پایه حائل در معدن زغال سنگ طبس با استفاده از مدل سازی عددی: ص ۱۸۳-۲۰۱



فاصله از تونل تهویه در راستای X — 6 — 24 — 42

شکل ۱۵- روند پیشروی تنش القایی با پیشرفت جبهه کار در میانه عرض پهنه



فاصله از تونل تهویه در راستای X — 4 — 6 — 8 — 10 — 12 — 14 — 16 — 18 — 20 — 22 — 24 — 26 — 28 — 30 — 32 — 34 — 36 — 38 — 40 — 42

شکل ۱۶- توزیع تنش قائم در کف جبهه کار در راستای طول کارگاه



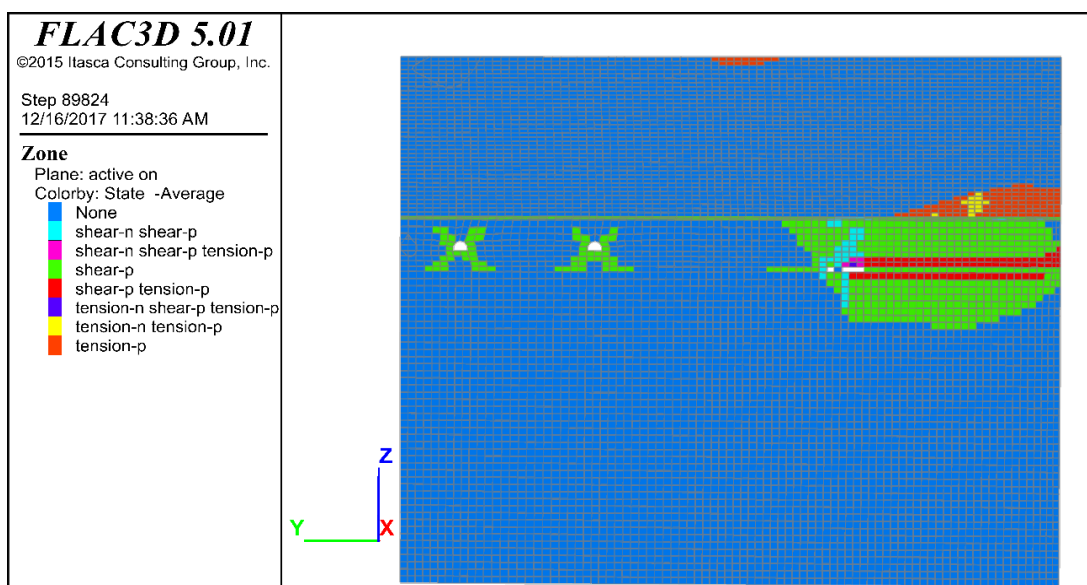
را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که شکست‌های کششی بیشتر در سقف و کف پهنه استخراجی اتفاق می‌افتد. دلیل این موضوع آن است که وقتی لایه زغال‌سنگ استخراج می‌شود زیر لایه سقف و بالای لایه کف خالی و سبب ایجاد شکستگی کششی در سقف و کف لایه زغال‌سنگ می‌شود. همچنین با دور شدن از منطقه کاملاً خردشده به سمت بالا و پایین کارگاه شکست‌های برشی به وجود می‌آید. با توجه به این‌که در تونل‌های اصلی بیشترین تنش بر دیواره‌ها و به صورت تنش مماسی وارد شده است و سپس به کف تونل‌های بدون نگهداری منتقل شده است؛ لذا در این نواحی شکست برشی مشاهده شده است. همچنین با بررسی پایه حائل برجای‌گذاشته مشخص است که بیشتر پایه دارای رفتار الاستیک و پایدار است.

با توجه به شکل ۱۶ توزیع تنش قائم از تونل‌های اصلی به سمت جبهه کار روند افزایشی دارد و در لبه جبهه کار به حداکثر مقدار می‌رسد و سپس با وارد شدن به منطقه تخریب به شدت افت می‌کند. زمانی که توزیع تنش‌های قائم در حالت حداکثری باشد نمودار دارای دو نقطه ماکزیمم تنش است که از طرف تونل‌های اصلی به ترتیب میزان تنش قائم را روی لبه جبهه کار و زون نگهداری قدرتی نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های فوق می‌توان بیان کرد، فاصله ۸۰ متری پیشروی سینه کار به نحوی است که تنش‌های جلویی اثری بر ناپایداری تونل‌های اصلی ندارند.

#### ۳-۴- بررسی کنتورهای پلاستیک

شکل ۱۷ حالت‌های رفتاری مختلف پهنه در حال استخراج



شکل ۱۷- حالت‌های رفتاری ناشی از استخراج کارگاه در مدل عددی

است (Najafi et al., 2016).

$$PS = 2 \times C \times \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \times \sigma_3 \quad (5)$$

که در آن  $PS$  مقاومت پایه  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی و  $\sigma_3$  تنش محصورکننده و  $C$  چسبندگی است. طبق رابطه زیر برای محاسبه ضریب اطمینان پایه از تقسیم مقاومت پایه

#### ۵- بررسی ضریب ایمنی پایه حائل

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد عرض مناسب پایه حائل بر اساس بررسی جایجایی‌ها و تنش‌ها برابر ۸۰ متر است؛ بنابراین برای اطمینان لازم است ضریب ایمنی پایه برجای‌گذاشته محاسبه شود. به منظور محاسبه حداکثر مقاومت پایه از معیار شکست موهر-کلمب استفاده شده است. بر این اساس مقاومت پایه از رابطه زیر قابل محاسبه

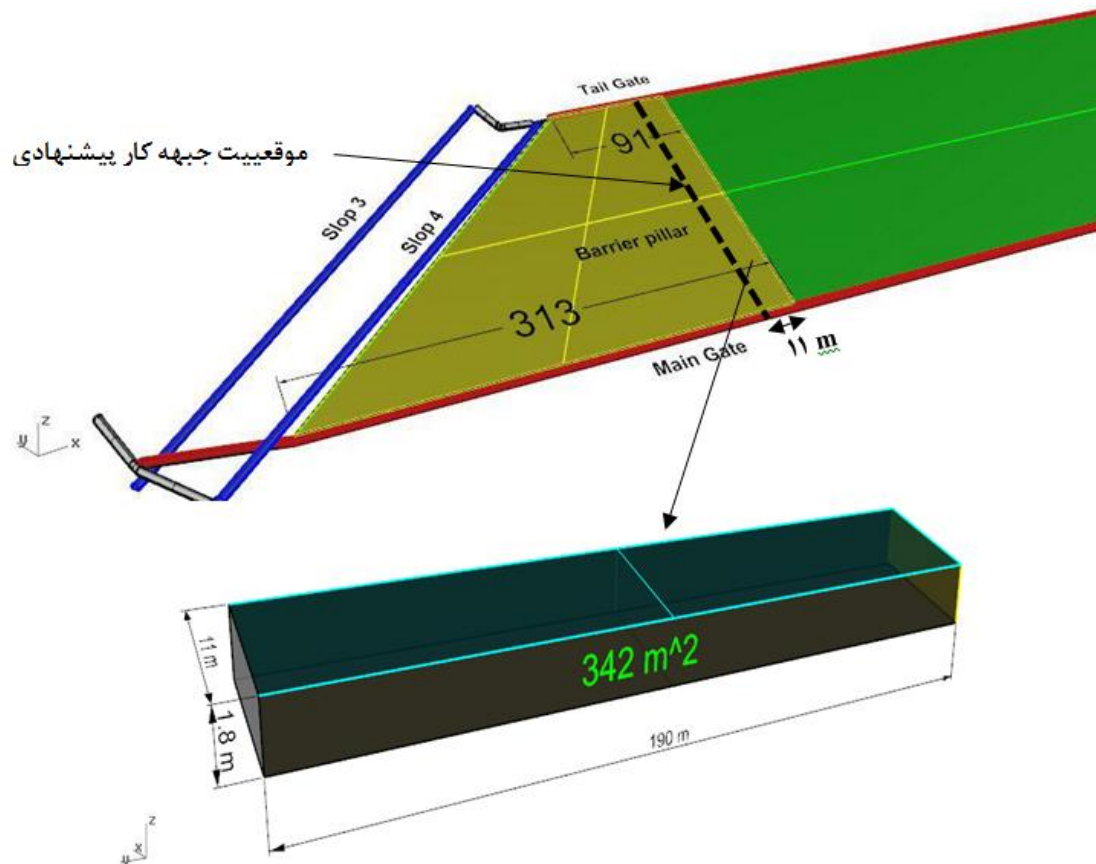
در شکل ۱۸ طرح اولیه برای پایه حائل پهنه ۳ شرقی در معدن زغال سنگ طیس آورده شده است. همگرایی تونل های اصلی به عنوان عامل کلیدی محدودکننده پیشروی جبهه کار یا به عبارتی دیگر عرض پایه حائل برجای گذاشته است. با توجه به مطالعات انجام شده در تحقیق حاضر می توان با حفظ الگوی سیستم نگهداری اولیه در تونل های اصلی، پیشروی جبهه کار را تا ۱۱ متر نسبت به طرح اولیه ادامه داد. این میزان پیشروی با توجه به ضخامت لایه زغال سنگ و عرض کارگاه استخراج معادل با استحصال ۶۰۰۰ تن زغال سنگ است. روشن است که این مقدار زغال سنگ صرفه اقتصادی قابل توجه زیادی دارد و سبب افزایش بازیابی استخراجی می شود.

بر حداکثر تنش وارد بر پایه استفاده شده است. حداکثر تنش وارد بر پایه را برابر تنش قائم در نظر گرفته شده است.

$$SF = \frac{\text{مقاومت پایه}}{\text{بار وارد بر پایه}} = \frac{PS}{SZZ} \quad (6)$$

به منظور محاسبه مقاومت پایه، تنش محصورکننده ( $\sigma_3$ ) از نتایج مدل سازی عددی استفاده شده است که مقدار آن ۹ مگاپاسکال است. بر اساس رابطه ۷ مقاومت پایه برابر با ۲۰ مگاپاسکال محاسبه می شود. بر اساس نتایج عددی تنش قائم وارد بر پایه برابر با ۸٫۸ مگاپاسکال است که در این حالت با توجه به رابطه ۷ ضریب ایمنی پایه حائل برابر ۲٫۳ است و نشان از پایداری پایه حائل دارد.

### ۶- توجیه اقتصادی



شکل ۱۸- طرح اولیه پایه حائل به همراه میزان زغال سنگ قابل استحصال پس از کم شدن عرض پایه حائل با استفاده از مدل سازی عددی

## ۷- نتیجه‌گیری

فاصله گرفتن از جبهه‌کار به صورت نمایی کم می‌شود و در فاصله ۸۰ متری به مقدار تنش‌های برجا رسیده است بنابراین می‌توان این فاصله را به عنوان عرض پایه حائل در نظر گرفت.

- با توجه به معیار ساکورایی جابجایی مجاز تونل‌ها ۱۰ میلی‌متر به دست آمد. در این حالت حداکثر گام پیشروی در فاصله ۸۰ متری از تونل‌های اصلی است.

- با توجه به عرض پایه حائل به دست آمده از بررسی جابجایی مجاز و تنش‌های جلویی، ضریب ایمنی آن برابر با ۲/۳ محاسبه گردید که نشان‌دهنده پایداری پایه حائل است. با توجه به مطالعات انجام شده در پروژه حاضر می‌توان با حفظ الگوی سیستم نگهداری اولیه در تونل‌های اصلی، پیشروی جبهه‌کار را تا ۱۱ متر نسبت به طرح اولیه ادامه داد که این میزان پیشروی با توجه به ضخامت لایه زغال‌سنگ و عرض کارگاه استخراج معادل با استحصال ۶۰۰۰ تن زغال‌سنگ است.

در حالت کلی طراحی پایه و راهروها جزئی از مراحل طراحی معدن است. اهمیت پایه حائل و تونل‌های اصلی در این است که تا پایان عمر معدن باید پایدار باقی بمانند و نقش کلیدی در پایداری معدن زغال‌سنگ ایفا می‌کنند. در صورت وجود فشار و جابجایی زیاد باید سعی در طراحی مجدد سیستم نگهداری تونل‌های اصلی، راهروها یا پایه‌های اطراف کارگاه داشت. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار *FLAC3D* به مدل‌سازی عددی پایه حائل در انتهای پهنه استخراجی *E3* پرداخته شده است و بر اساس میزان پیشروی در پهنه در مورد پایداری آن نتیجه‌گیری شده است. مهم‌ترین نتایج تحقیق به شرح زیر است.

- با توجه شیب‌دار بودن لایه و افزایش عمق در قسمت گالری باربری در پایین پهنه و همچنین اثر تمرکز تنش حاصل از پیشروی جبهه‌کار، بنابراین هم‌پوشانی تنش‌ها در نزدیک گالری باربری به بیشترین مقدار خود در پهنه می‌رسد.
- تنش‌های جلویی وابسته به پیشروی جبهه‌کار با

## ۸- مراجع

- Ahmadi, A.R., Shahriar, K., Asadi, A. (2013). *Stability Analysis of Amir Kabir Water Conveyance Tunnel in Strain Softening Condition Using Self-Similarity Method and Convergence-Confinement Curves. Journal of Tunneling and Underground Space Engineering (TUSE), Volume 2, issue 1, DOI: 10.22044/TUSE.2013.184*
- Anon. (2005). *Tabas coal mine project basic design report-mining. Vol 1 of 5.*
- Cui, Z., Chanda, E., Zhao, J., & Wang, Z. (2018). *Stress distribution characteristics in the vicinity of coal seam floor. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 108, No. 3, p. 032056). IOP Publishing.*
- Damghani, M. (2013). *Evaluation Behavior of Longwall Face, Case Study Parvadeh Tabas coal mine. M. Sc Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman (in Persian).*
- Hartman., H. (1996). *SME Handbook. Inc. Littleton Colorado. Society for Mining, Metallurgy and Exploration.*
- Lu Luo J. (1997), *Gateroad Design in Overlying Multi-Seam Mines. Department of Mining and Minerals Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University.*
- Mansoori, A. A. H., Gholamzhad, J., and Najafi, M. (2017). *3D Numerical Modeling of Tunnel Floor Heave in Tabas Mechanized Coal Mine. Journal of Tunneling and Underground Space*

- Engineering (TUSE)*, Volume 5, issue 2, Page 15-29, DOI: 10.22044/tuse.2017.3431.1236.
- Martin, C.D., Maybee, W.G. (2000). *The strength of hard-rock pillars. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 37, 1239-1246.
- Murali, M.G., Sheorey, P.R., Kushwaha, A. (2001). *Numerical estimation of pillar strength in coal mines. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38, pp 1185–1192.
- Najafi, M. (2009). *Optimum Design of Longwall Chain Pillar in Tabas Coal Mine. Shahrood University of Technology, MSc Thesis (in Persian)*.
- Najafi, M., Jalali, S. M., Sereshki, F., & Yarahmadi Bafghi, A. (2016). *Probabilistic analysis of stability of chain pillars in Tabas coal mine in Iran using Monte Carlo simulation. Journal of Mining and Environment*, 7(1), 25-35.
- Najafi, M., Jalali, S., Sereshki, F., & Yarahmadi, B. A. (2010). *Estimation of the load distribution on the chain pillars of the mechanized longwall panels in tabas coal mine using numerical method. Iranian journal of mining engineering (irjme)*, volume 5, number 9; page (s) 47 to 58.
- Najafi, M., Shishebori, A., and Gholamnejad, J. (2016). *Numerical Estimation of Suitable Distance between Two Adjacent Panels' Working Faces in Shortwall Mining. Int. J. Geomech.* , 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000784 , 04016090.
- Peng, S. S. (2006). *Longwall mining. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Inc.(SME): Englewood, CO, USA, 1-20*.
- Qiangling, Y., Jian, Z., Yanan, L., Yingming, T., & Zhigang, J. (2015). *Distribution of side abutment stress in roadway subjected to dynamic pressure and its engineering application. Shock and Vibration*, 2015.
- Sakurai, S. (1997). *Strength parameters of rocks determined from back analysis of measured displacements. In First Asian Rock Mechanics Symposium. ISRM, Seoul (pp. 95-99)*.
- Sastry, V. R., & Nair, R. (2009). *Stress distribution on longwall barrier pillar due to goaf formation during extraction. IE (I) J*, 89, 19-24.
- Shabanimashcool, M., & Li, C. C. (2013). *A numerical study of stress changes in barrier pillars and a border area in a longwall coal mine. International Journal of Coal Geology*, 106, 39-47.
- Tabas Coal mine. (2014). *Rock mechanics reports. Thecnical office*.
- Watson, j. (2004). *The strength of coal pillars. 23nd Int. Conf. on Ground Control in Mining*.
- Zhang, P., Gearhart, D., Van Dyke, M., Su, D., Esterhuizen, E., & Tulu, B. (2019). *Ground response to high horizontal stresses during longwall retreat and its implications for longwall headgate support. International journal of mining science and technology*, 29(1), 27-33.

## *Determination of Suitable Barrier Pillar Width in Tabas Mechanized Coal Mine Using Numerical Modeling*

*M. Zare<sup>1</sup>; M.Najafi<sup>2\*</sup>; J. Gholamnejad<sup>3</sup>; A. Rooh<sup>4</sup>*

*1- MSc Student, Department of Mining & Metallurgical Engineering, Yazd University*

*2- Associate Professor, Department of Mining and Metallurgical Eng., Yazd University*

*3- Associate Professor, Department of Mining and Metallurgical Eng., Yazd University*

*4- MSc Student of Tunneling and Underground Space Engineering, Tarbiat Modares University*

*Received: 01 Mar 2019; Accepted: 22 Jun 2019*

*DOI: 10.22044/tuse.2019.8151.1358*

---

### **Keywords**

*Longwall Mining  
Stress Distribution  
Barrier Pillar  
Numerical Modeling  
Tabas Mechanized Coal Mine*

---

### **Extended Abstract**

#### **Summary**

*Longwall mining method is one of the most applied methods to extract low-inclined to inclined coal seams. This method is a highly productive process for coal extraction with high recovery rate. High-tech equipment, high efficiency, mechanization and extraction of coal seams with high inclination and depth have made this process attractive for mining engineers. The purpose of this research is to evaluate the effect of panel extraction on the stress distribution upon the barrier pillar using finite difference method by employing FLAC3D software. This aim is achieved by simulation of various longwall face advancement.*

### **Introduction**

*Longwall mining method is one of the most applied methods to extract low-inclined to inclined coal seams. This method is a highly productive process for coal extraction with high recovery rate. In this method, when the face is advanced far enough, the roof strata behind the longwall face collapse and the front abutment and side abutment stresses will be distributed around the longwall panel. To protect the main tunnels and access tunnels (Gaterodas) of the mine, the stresses created from the panel extraction are utilized in two ways. The first solution, which has the most important effect on the stability of the panel, is the placement of the chain pillar and the barrier pillar, and the other way is the installation of the support in the main tunnels to control the tunnel convergence.*

### **Methodology and Approaches**

*The main objective of this research is to obtain the appropriate width of the barrier pillar at the end of the E3 panel in the Tabas mechanized coal mine, so that the main tunnels of the mine have the lowest convergence. The FLAC3D software was used for numerical modeling of the problem. In order to determine the barrier pillar width, main tunnels displacement resulting face advancement, front and side abutment stresses distribution around the panel and plastic contours around the main tunnels and on barrier pillar are investigated.*

### **Results and Conclusions**

*The results of various numerical models of the advancing coal face show that the width of the barrier pillar has an effect on the stress distribution around the pillar. Furthermore, the results indicate that the suitable width of the barrier pillar is 80 meters. Finally, the results of economical investigation show that the 80 m pillar width causes more than 6000 tons of coal to be extracted.*

---