

مدل سازی عددی سه بعدی پدیده بالازدگی کف تونل باربری در روش جبهه کار بلند مکانیزه معدن زغال سنگ طبس

حامد منصوری علی آباد^۱؛ جواد غلام نژاد^۲؛ مهدی نجفی^{۳*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشگاه یزد

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد

۳- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۴/۰۷/۱۵؛ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2017.3431.1236

چکیده	واژگان کلیدی
<p>یکی از مشکلاتی که در تونل های بین پهنه ای در روش جبهه کار بلند مکانیزه به وقوع می پیوندد، مساله مچاله شوندگی تونل ها و به طور ویژه بالازدگی کف این تونل ها به دلیل توزیع تنش های القایی ناشی از استخراج پهنه ها است. سیستم نگهداری این تونل ها در اثر فشار تورمی که به سیستم نگهداری وارد می شود، دچار خسارت های شدیدی می شوند. معدن زغال سنگ پروده طبس که به روش مکانیزه در حال استخراج است، با مشکلات ناشی از پدیده بالازدگی در کف تونل های باربری دنباله لایه مواجه است، بگونه ای که در برخی نقاط، مقدار بالازدگی کف تونل بعد از استخراج زغال سنگ در منطقه مورد نظر و در اثر پیشروی جبهه کار به حدود ۱٫۴ متر می رسد. هدف از انجام این پژوهش، مدل سازی عددی سه بعدی پدیده بالآمدگی کف تونل و طراحی مجدد سیستم نگهداری تونل باربری پهنه شرقی شماره ۲ معدن پروده یک طبس (E2M.G) است. ابزار مورد استفاده مدل سازی عددی با نرم افزار $FLAC^{3D}$ است. بدین منظور مقدار بالازدگی کف و اثر پیشروی جبهه کار بر روی این پدیده با استفاده از نرم افزار مذکور بررسی شده است. نتایج حاصل از مدل سازی عددی نشان می دهد که مقدار بالازدگی در نقطه شاهد کف تونل بدون در نظر گرفتن اثر پیشروی جبهه کار ۴۵ سانتیمتر و زمانی که جبهه کار در فاصله ۵ متری نقطه شاهد است به ۱۴۵ سانتیمتر می رسد. در نهایت با پیشنهاد سیستم نگهداری از نوع قاب فولادی $IPB 180$ همراه با حفر کف تونل به شکل قوسی با عمق ۴۰ سانتیمتر و نصب ۸ عدد پیچ سنگ در کف، مقدار آماس کف در ۵ متری جبهه کار به کمتر از ۲۰ سانتیمتر کاهش یافته است.</p>	<p>بالازدگی (آماس) کف مدل سازی عددی معدن زغال سنگ طبس سیستم نگهداری نرم افزار $FLAC^{3D}$</p>

۱- مقدمه

اقتصادی، موازی با سایر فعالیت های معدن کاری، توجه به اصول مکانیک سنگ و مکانیک خاک اجتناب ناپذیر است. به منظور تعیین نوع سیستم نگهداری می توان از روش های تجربی، تحلیلی و عددی استفاده کرد که امروزه روش های عددی کاربرد گسترده ای در تعیین سیستم نگهداری تونل ها و فضاهای زیرزمینی دارند. در حین حفاری تونل ها و یا سایر فضاهای زیرزمینی مسایل و مشکلات گسترده ای از قبیل هجوم آب به داخل تونل، مچاله شونده گی (*Squeezing*)،

قبل از حفر یک سازه زیرزمینی، هر نقطه از زمین تحت تنش هایی قرار دارد و زمین در آن نقطه در حال تعادل است. پس از حفر سازه حالت تعادل اولیه تنش در اطراف فضا دچار تغییر می شود و مناطقی از اطراف فضا تحت تمرکز تنش قرار می گیرند. به منظور حل مشکل برهم زدن تعادل تنش های بعد از حفر سازه، باید از سیستم نگهداری استفاده نمود. بنابراین برای تعیین بهترین روش نگهداری از نظر ایمنی و

* یزد؛ صفایه، دانشگاه یزد- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ کدپستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵؛ شماره ی تلفن: ۰۳۵-۳۱۲۲۲۸۳۴؛ دوزنگار: ۰۳۵-۳۸۲۱۰۰۹۵؛ رایانامه: mehdinajafi@yazd.ac.ir

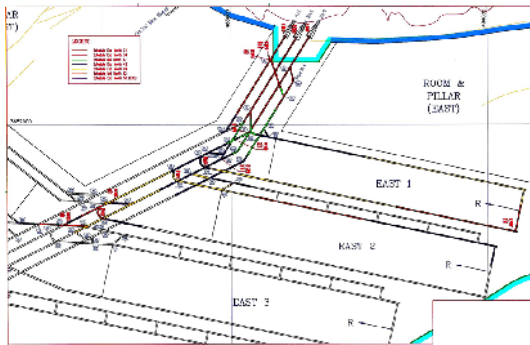
را بررسی و به شبیه‌سازی عددی پدیده آماس ناشی از حفر تونل بر اساس نتایج تجربی پرداخته است (Barla, 2008). ژائو و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از روش‌های تحلیلی توزیع تنش بر روی کف راهرو معدن زغال‌سنگ را بررسی کردند. بر اساس مدل مکانیکی کف و آنالیز توزیع تنش، موقعیت کف نسبتاً ثابت با یکبار پیشروی جبهه کار به دست آمد. نرخ کاهش تنش عمودی در عمق خاصی سریع‌تر از تنش افقی بود و جهت حداکثر تنش اصلی از عمودی به افقی با یکبار پیشروی تغییر کرد. با پیشروی ۳۰ متر تنش افقی از عمودی بیشتر شده است. با توجه به آزمایشات اگر کف از سنگ و یا ماسه سنگ باشد، در مرحله تغییر شکل الاستیک قرار می‌گیرد و هیچ گونه تغییر شکلی در کف با پیشروی جبهه کار بوجود نمی‌آید (Zhu et al., 2008). جین (Jin) و لیانگو (Lianguo) در سال ۲۰۱۱ به شبیه‌سازی تورم کف در راهروهای حفر شده در سنگ نرم، با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود *FLAC* پرداخته است (Jin & Lianguo, 2011). شیماجر (Schumacher) در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش تفاضل محدود (تحت نرم‌افزار *FLAC* دوبعدی و سه‌بعدی) دو نمونه از سیستم‌های نگهداری را در محیط‌های معدن کاری زیرزمینی زغال‌سنگ طراحی و مدل‌سازی نموده است (Schumacher, 2012). چن و همکاران در سال ۲۰۱۲ آنالیز تئوری شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های میدانی در راهرو کارگاه استخراج معدن زغال‌سنگ شماره ۲ پینگمی (Pingmei) انجام دادند. آنها فرآیند کنترل همگرایی و آماس کف در راهرو بوسیله تقویت کناره‌ها و گوشه‌های راهرو و همچنین مقاومت نگهداری متفاوت کناره‌ها بررسی کردند (Chen et al., 2012). چانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ در معدن جینباوتون (Jinbaotun) که با مشکل پایداری در راهرو و آماس کف راهرو روبرو بودند. مطالعاتی انجام دادند و نگهداری جدیدی ارائه دادند و با تجزیه و تحلیل کف و لایه-های آن پیچ‌سنگ هیدرولیکی را پیشنهاد دادند و این نوع بولت‌ها سبب کنترل آماس کف و کاهش کف‌زنی می‌شود (Chang et al., 2013). گائو و همکاران به بررسی عددی پدیده مچاله‌شودگی در تونل‌های معدن زغال‌سنگ در چین با استفاده از نرم‌افزار *UDEC* پرداخته‌اند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داده است که در اثر تنش‌های القایی ایجاد شده ناشی از استخراج پهنه بیشترین همگرایی در دیواره تونل‌ها به

ترکش سنگ (*Rock Burst*)، ورود گاز، آماس (*Sweeling*) و غیره امکان وقوع دارد. یکی از پدیده‌هایی که در حین استخراج روش جبهه‌کار بلند در تونل‌های بین دو پهنه امکان وقوع زیادی دارد، پدیده مچاله‌شوندگی و به طور ویژه بالازدگی کف تونل‌ها به دلیل توزیع تنش‌های جلویی و کناری است و این پدیده به ویژه سنگ‌های رسوبی ضعیف به وقوع می‌پیوندد (Peng, 2006; Hesami et al., 2011; Gao et al., 2015). در تونل‌های ساخته شده در این نوع زمین‌ها فشار تورمی ناشی از بالآآمدگی کف باعث تخریب و حتی شکستگی در قاب‌های فولادی کف گردیده و در تونل‌های کم عمق این فشارهای تورمی حرکت پوشش تونل به داخل آن و همگرایی را به همراه دارد (Anagnostou & Kovari, 1995; Kovari, 2009).

سیستم نگهداری در زمین‌های با قابلیت بالا آمدگی کف معمولاً شامل پیچ‌سنگ، قاب‌های فولادی، ابزارهای مکانیکی، صفحات فومی (*foam plate*)، قاب‌های قوسی کف‌بند و نیز تلفیقی از سیستم‌های مذکور به همراه شاتکریت است. امروزه روش‌های عددی کاربرد گسترده‌ای در تحلیل پایداری فضاهای عمرانی و معدنی و طراحی سیستم نگهداری آنها دارند. از نمونه‌های مدل‌سازی عددی برای مطالعه پدیده مچاله‌شوندگی و آماس کف و طراحی سیستم نگهداری تونل‌ها در روش جبهه‌کار بلند می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

سان در سال ۲۰۰۴ به تحلیل پایداری تونل‌های حفر شده در سنگ‌های آتشفشانی و سیستم نگهداری زمین نصب شده در این تونل‌ها با روش‌های تجربی، عددی و تحلیلی پرداخته است و در این راستا از نرم‌افزارهای *FLAC* و *FLAC^{3D}* جهت انجام تحلیل‌ها بهره گرفته است (Sun, 2004). یاسیتلی و آنور (Yasitli and Unver) با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی جبهه‌کار بلند معدن املر (Omler) در ترکیه، تنش‌های القایی اطراف سینه‌کار را بررسی نموده و فاصله تنش‌های حداکثر و حداکثر جلویی را سینه‌کار را تعیین نمودند (Unver & Yasitli, 2005). آنها همچنین به مدل‌سازی عددی سه بعدی جبهه‌کار بلند در لایه‌های زغال‌سنگ با ضخامت زیاد که به روش تخریبی (*Top Coal Caving*) در معدن زیرزمینی املر در ترکیه استخراج می‌شود، پرداخته‌اند (Unver & Yasitli, 2005b). بارلا (Barla) در سال ۲۰۰۸ رفتار تونل در زمین‌های آماسی

دستگاه شیرر با ارتفاع برش ۲ متر و عرض برش ۰/۸ متر با پیشروی روزانه ۲/۵ متر که با شیلدهای با عرض ۷/۵ متر نگهداری می‌شوند، انجام می‌شود. عمق معدنکاری در معدن زغال‌سنگ طبس از ۲۰۰ متر تا ۶۰۰ متر متغییر است (Anon, 2005). شکل ۱ نمایی از طرح پهنه‌های معدن زغال‌سنگ طبس را نشان می‌دهد.



شکل ۱- جانمایی پهنه‌ها، پایه‌ها و راهروهای استخراجی در معدن زغال‌سنگ طبس (Najafi et al., 2013)

۳- مدل‌سازی تونل باربری دنبال لایه پهنه شرقی شماره ۲ با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$

در این تحقیق مدل‌سازی عددی سه بعدی پهنه شرقی (E2) به همراه تونل باربری دنبال لایه‌ی آن در معدن زغال‌سنگ طبس با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ صورت گرفته است. همچنین از آنجا که شرایط زمین شناسی حاکم بر معدن زغال‌سنگ طبس به گونه‌ای است که می‌توان آن را محیط پیوسته در نظر گرفت، انتخاب این نرم‌افزار جهت انجام مدل‌سازی‌های لازم، مناسب به نظر می‌رسد (Najafi, 2009). برای مدل‌سازی تونل باربری دنبال لایه پهنه شرقی شماره ۲ و کارگاه استخراج آن شش مرحله به ترتیب بصورت زیر انجام شده است:

- تشکیل هندسه مدل و مش بندی. هندسه مدل و مش بندی متناسب با شرایط فیزیکی ناحیه‌ای معدن زغال‌سنگ طبس در نظر گرفته شده است.

- مشخص کردن مرزها و خصوصیات مواد

- اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه

- حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری

- حفر تونل باربری و اعمال سیستم نگهداری فعلی به مدل و

وقوع می‌پیوندد (Gao et al., 2015).

در ایران، معدن زغال‌سنگ طبس به روش جبهه‌کار بلند مکانیزه در حال استخراج است. یکی از مشکلاتی که در تونل‌های باربری این معدن وجود دارد، پدیده بالآمدگی کف تونل است. بر اساس مشاهدات انجام شده در تونل‌های معدن مشاهده شده کف تونل که از جنس زغال‌سنگ و آرژیلیت است دچار پدیده بالآمدگی گردیده، به گونه‌ای که سیستم ریل‌گذاری موجود در این تونل را تحت تأثیر قرار داده است و به طوری است که مرتب باید حین پیشروی پهنه استخراجی عملیات کف برداری انجام شود. هم اکنون برای مقابله با این پدیده یک گروه به طور مستمر در حال کف‌برداری تونل‌های باربری هستند (TCMDO, 2013). این روش حل، هزینه‌های زیادی را به همراه دارد و لازم به ذکر است که در حال حاضر هیچ‌گونه سیستم نگهداری برای مقابله با آماس کف در این تونل طراحی نشده است. بر این اساس هدف اصلی این تحقیق مطالعه پدیده بالآمدگی کف تونل‌های بین دو پهنه در اثر تنش‌های القایی ناشی از استخراج پهنه است. در نهایت به منظور مقابله با پدیده بالآمدگی کف با انجام مدل‌سازی‌های مختلف از سیستم‌های نگهداری، سیستم نگهداری مناسب برای تونل باربری دنبال لایه پهنه شرقی شماره ۲ (Main gate East2) پیشنهاد شده است.

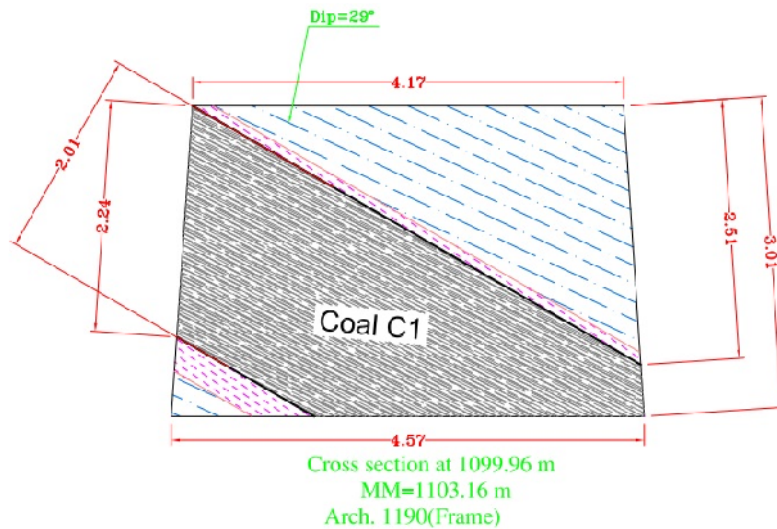
۲- منطقه مورد مطالعه

ناحیه پروده با وسعتی حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع در ۷۰ کیلومتری جنوب شهرستان طبس قرار گرفته است. معدن شماره یک بخشی از معدن پروده طبس است. در این معدن لایه CI مهم‌ترین لایه زغال‌سنگ قابل کار بشمار می‌آید. سنگ‌های در برگرفته این لایه از سیلتستون، ماسه‌سنگ و آرژیلیت بسیار سست تشکیل شده است. این معدن به روش جبهه‌کار بلند پسر و به طور تمام مکانیزه استخراج می‌شود. در این روش، ابتدا دو راهرو اصلی و فرعی در دو طرف پهنه‌ای که قرار است استخراج شود، حفر شده و تا انتهای پهنه پیش می‌روند. در این زمان پهنه استخراجی و راهروهای دوطرف به طور کامل آماده‌سازی شده و این دو راهرو به هم متصل می‌شوند. خط اتصال این دو راهرو کارگاه استخراج را تشکیل می‌دهد و استخراج به سمت عقب آغاز می‌شود. در این معدن طول جبهه‌کار بیشتر از ۲۰۰ متر است. استخراج توسط

۳-۱- هندسه مدل و مش بندی

در مدل سازی، مرحله اول ساخت هندسه مدل و مش بندی آن است. در شکل ۲ هندسه تونل باربری مورد نظر و لایه‌های اطراف آن نشان داده شده است.

رسیدن به تعادل و سپس استخراج پهنه $E2$ ، شبیه‌سازی تخریب و تحلیل نتایج مربوط به آن.
- حفر تونل باربری و اعمال سیستم نگهداری پیشنهادی به مدل و رسیدن به تعادل و سپس استخراج پهنه $E2$ و شبیه‌سازی تخریب و تحلیل نتایج مربوط به آن.

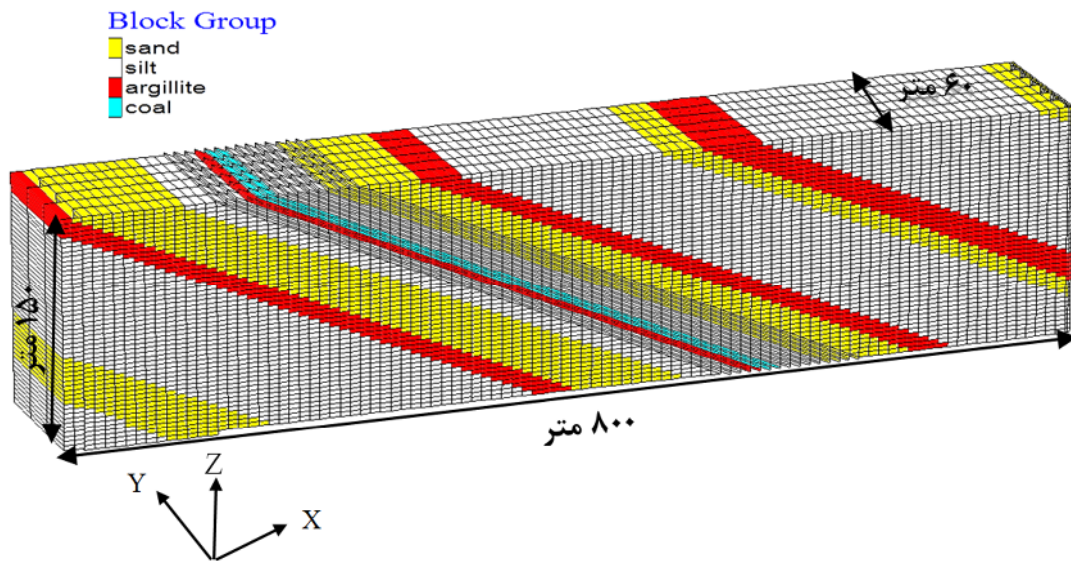


شکل ۲- هندسه تونل باربری پهنه شرقی شماره ۲ (ابعاد بر حسب متر) (Sharifzadeh, 2011)

۳-۲- مشخص کردن مرزها و خصوصیات مواد

بعد از ساخت هندسه مدل، مرحله بعد نسبت دادن خصوصیات مواد به مدل است. رفتار مدل بیان کننده واکنش آن تحت شرایط بارگذاری معین است. مدل ساخته شده دارای چهار لایه بندی سیلتستون، زغال‌سنگ، آرژیلیت و ماسه‌سنگ است. به منظور تحلیل مدل، مدل‌های رفتاری موهر-کلمب و کرنش نرمی که برای مدل‌سازی مچاله‌شوندگی و پیشروی جبهه کار در زغال‌سنگ استفاده می‌شود در نظر گرفته شده است (Najafi, 2009; Barla, 1999). رفتار کرنش نرمی در توده سنگ، ناشی از رشد و توسعه ترک‌ها و به هم پیوستگی ریز ترک‌ها و تبدیل آنها به ترک‌های بزرگ می‌باشد. این مدل یکی از مدل‌هایی است که قادر است تمام فازهای تغییر شکل تونل (الاستیک، تسلیم، مقاومت باقی مانده) را شرح دهد (Mortazavi et al., 2009). خصوصیات فیزیکی لایه زغال‌سنگ و سنگ دربرگیرنده آن در جدول ۱ بیان شده است.

با توجه به شرایط هندسی پهنه‌های استخراجی در معدن زغال‌سنگ طیس، طول مدل در امتداد محور X برابر ۸۰۰ متر و با توجه به شیب و طول کارگاه استخراج و شیب لایه‌بندی، ارتفاع مدل در امتداد مثبت محور Z برابر ۱۵۰ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به تجربیات اجرایی حاصل شده در معدن زغال‌سنگ در مورد شروع پدیده بالآمادگی کف و این‌که این پدیده از فاصله ۵۰ الی ۶۰ متری از جبهه کار شروع به ایجاد شدن می‌نماید (TCMDO, 2013)، طول مدل در امتداد محور Y (جهت پیشروی استخراجی)، ۶۰ متر در نظر گرفته شده و به منظور مش‌بندی از المان‌های آجری (Brick) و گوه‌ای (Wedge) استفاده گردیده است. علاوه بر این جهت حل دقیق‌تر مدل ابعاد مش‌ها در اطراف تونل باربری ریزتر در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ شمایی از هندسه مدل عددی به همراه لایه بندی آن نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایشی از هندسه مدل عددی ساخته شده همراه با لایه بندی

مدل، در هر مرحله از عملیات استخراج، مدل به صورت الاستیک به تعادل می‌رسد. بنابراین مدل بلوکی جبهه‌کاربلند که هیچ‌گونه عملیات استخراج پهنه و حفر تونل‌ها در داخل آن صورت نگرفته است، در اولین مرحله به تعادل می‌رسد. بعد از این مرحله عملیات حفر تونل‌ها و استخراج پهنه شروع می‌شود. بر این اساس در ابتدا تونل مورد نظر با هندسه مربوطه در مدل ایجاد می‌گردد، سپس بسته به این که حل مدل با نصب سیستم نگهداری یا بدون نصب سیستم نگهداری مدنظر باشد، شرایط متفاوت خواهد بود.

۳-۳- اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه

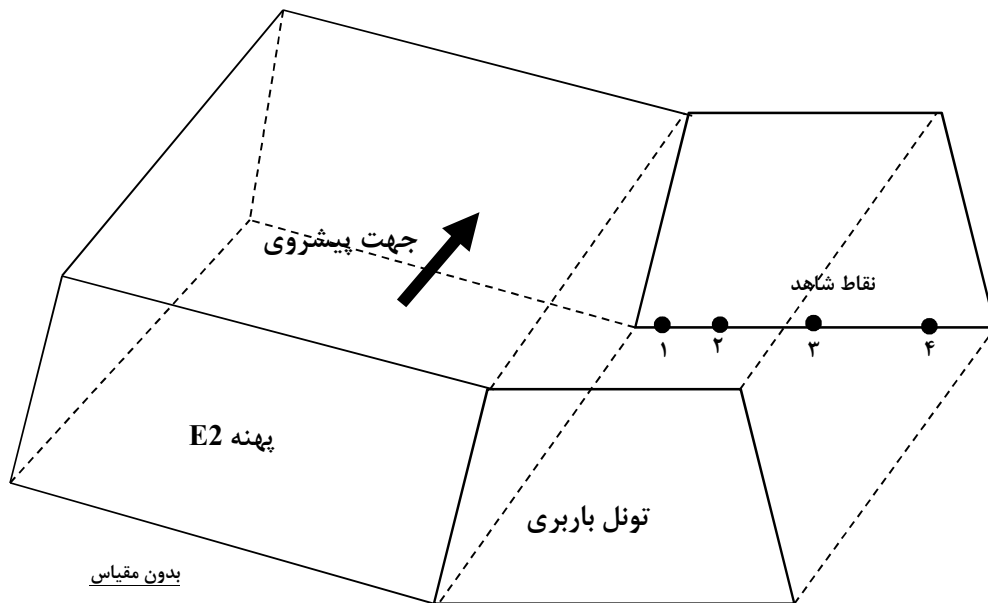
با استفاده از شرایط اولیه و مرزی، محدودیت‌های فیزیکی مدل و شرایط اصلی توضیح داده می‌شود. در این تحقیق ابعاد مدل در جهت‌های X و Y و کف مدل ثابت شده است و فقط جابه‌جایی در جهت قائم مجاز است. علاوه بر این بر اساس مطالعات قبلی صورت گرفته در معدن زغال‌سنگ طیس (Shahriar et al., 2009)، مقدار نسبت تنش‌های افقی به قائم (K) برابر ۱٫۵ در نظر گرفته شده است.

۳-۴- نحوه‌ی تحلیل مدل عددی

پس از اجرای نرم افزار، با اعمال بار حاصل از روباره بر

جدول ۱- خصوصیات توده سنگ اطراف تونل باربری دنباله لایه پانل شرقی شماره ۲ (Anon, 2005)

نوع سنگ	مدول برشی (مگاپاسکال)	مدول حجمی (مگاپاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	چسبندگی (مگاپاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
زغال سنگ	۲۹۹	۴۹۹	۱۵٫۷۶	۰٫۰۰۲	۰٫۰۸۴	۱۶۰۰
آرژیلیت	۷۶۱	۱۷۵۰	۲۰٫۱۳	۰٫۰۱۳	۰٫۲۳۱	۱۶۳۰
ماسه سنگ	۱۴۱۹	۲۳۶۵	۴۳٫۵۲	۰٫۷۶۷	۰٫۷۶۷	۲۷۰۰
سیلتستون	۸۹۵	۱۴۹۲	۲۷٫۴۲	۰٫۰۱۲	۰٫۳۵۷	۲۷۲۰



شکل ۴- شمایی از نقاط شاهد در کف تونل به همراه موقعیت پهنه استخراجی E2

مگاپاسکال است. لازم به ذکر است در این حالت هنوز پهنه E2 استخراج نشده است.

۳-۴-۲- مدل‌سازی حفر تونل با در نظر گرفتن سیستم نگهداری فعلی

در معدن پروده ۱ به منظور نگهداری فضاها اغلب از پیچ‌سنگ‌های رزینی و قاب‌های فولادی استفاده می‌شود (Anon, 2005). ایجاد یک فاصله زمانی بین پیشروی یا حفر تونل و نصب سیستم نگهداری، باعث کاهش حجم تحکیمات و در نتیجه کاهش هزینه نگهداری می‌شود. دلیل این مساله این است که قسمت قابل توجهی از جابجایی‌ها در همین فاصله زمانی رخ می‌دهد و در اثر این جابجایی‌ها قسمت زیادی از تنش‌های القایی رها شده و فشار وارد بر سیستم نگهداری کاهش می‌یابد. با توجه به نظر کارشناسان ۱۰-۵۰ درصد از جابجایی نهایی در همین فاصله کوتاه پس از حفر رخ می‌دهد (TCMDO, 2013). با توجه به این مساله و همچنین جابجایی‌های نقطه شاهد (نقاط شاهد، در کف تونل در نظر گرفته شده‌اند) در مدل نسبت به زمان، تمامی مدل‌ها از مرحله پس از حفر حل شده و پس از ۳۰ درصد جابجایی‌های نهایی، مقدار جابجایی صفر شده و سیستم نگهداری نصب می‌شود. به منظور نگهداری تونل باربری پهنه شرقی شماره ۲

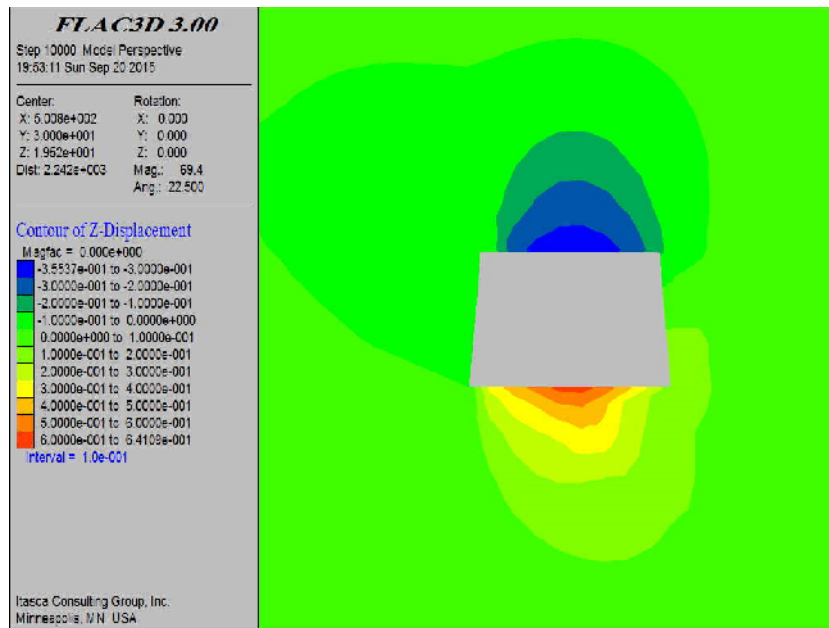
در حالتی که نصب سیستم نگهداری مدنظر نباشد حل مدل تا رسیدن به تعادل کامل ادامه خواهد یافت، اما در حالتی که نصب سیستم نگهداری مدنظر باشد عملیات نصب باید در یک فاصله زمانی پس از حفر صورت پذیرد تا مدل‌سازی هر چه بیشتر به واقعیت نزدیک شود. در این حالت مدل، پس از حفر تونل و مقدار گام زمانی مشخص از حل معدل، سیستم نگهداری نصب و سپس حل مدل تا رسیدن به تعادل کامل ادامه می‌یابد. بعد از حفر تونل، پهنه E2 در گام‌های زمانی استخراج می‌شود و به منظور ثبت نتایج با انتخاب نقاطی به عنوان نقاط شاهد در کف تونل، تحلیل نتایج صورت پذیرفته است. در شکل ۴ موقعیت نقاط شاهد در کف تونل نشان داده شده است.

۳-۴-۱- مدل‌سازی حفر تونل بدون در نظر گرفتن سیستم نگهداری

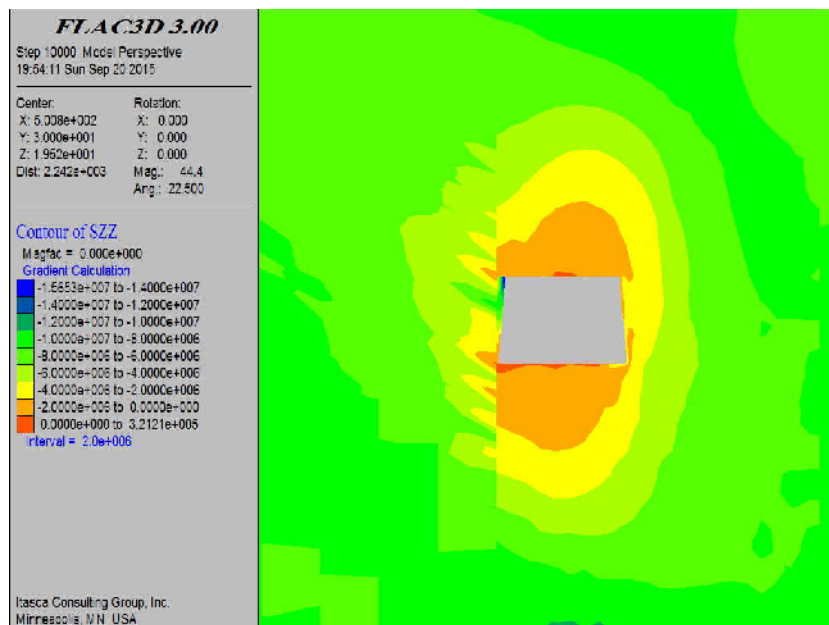
در ابتدا تونل مورد نظر بدون در نظر گرفتن سیستم نگهداری مدل‌سازی شده است که نتایج مربوط به خطوط هم مقدار تنش و جابجایی در اطراف تونل در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور می‌تواند دریافت که مقدار بالازدگی کف تونل در حدود ۶۹ سانتی‌متر و بیشترین مقدار تنش وارد شده بر دیواره سمت چپ تونل به میزان ۱۵/۶

از پیچ‌سنگ و قاب‌های فولادی استفاده می‌شود. در تونل باربری ۱۳ عدد پیچ سنگ ۲٫۴ متری در دو ردیف ۶ و ۷ تایی در سقف بازای هر متر پیشروی و ۷ عدد پیچ سنگ ۱٫۸ متری به همراه ۴ عدد پیچ سنگ در دیواره سمت راست و ۳ عدد

پیچ سنگ در دیواره سمت چپ نصب می‌شود (Anon, 2005). در جدول ۲ مشخصات مربوط به پیچ‌سنگ‌ها و رزین مورد استفاده آورده شده است. قاب فولادی مورد استفاده از نوع V29 است که مشخصات آن در شکل ۶ بیان شده است.



الف: خطوط هم مقدار جابه‌جایی



ب: خطوط هم مقدار تنش قائم

شکل ۵- خطوط هم مقدار تنش و جابه‌جایی در اطراف تونل باربری بدون در نظر گرفتن سیستم نگهداری

در کف تونل باربری پانل شرقی شماره ۲ در شکل ۷ بیان شده است. با توجه به شکل مذکور می‌توان دریافت که بعد از اعمال سیستم نگهداری مقدار آماس کف ۴۷٫۵ سانتی‌متر است که در مقایسه با حالت بدون نگهداری تونل (شکل ۵) مقدار آن به میزان ۲۲٫۵ سانتی‌متر کاهش یافته است. لازم به ذکر است در این حالت هنوز پهنه E2 استخراج نشده است.

۳-۴-۳- اثر پیشروی جبهه‌کار بر بالآمدگی کف

به منظور پیش‌بینی تاثیر پیشروی جبهه‌کار بر روی مقدار آماس کف و با توجه به میزان گام تخریب به دست آمده در معدن، مدل‌سازی تخریب صورت پذیرفته است. بر اساس تجربیات عملی، میزان گام تخریب در معدن طبس برابر با ۱۵ متر است (Sharifzadeh, 2011). به منظور بررسی اثر پیشروی جبهه‌کار بر میزان آماس کف، مدل‌سازی عددی در حالتی که جبهه‌کار در فواصل ۶۰، ۴۵، ۳۰ و ۱۵ متری نقاط شاهد قرار دارد صورت پذیرفته است. نحوه‌ی مدل‌سازی عددی بدین صورت است که ابتدا از فاصله ۶۰ تا ۴۵ متری لایه استخراج شده سپس با توجه به ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ و ارتفاع زون تخریب، قسمت استخراج شده با مواد تخریب شده که خواص آن در جدول ۳ بیان شده، پر می‌گردد و مدل به تعادل می‌رسد. در مرحله بعد از فاصله ۴۵ تا ۳۰ متری نقطه شاهد، کارگاه استخراج شده و خصوصیات تخریبی به مدل اطلاق می‌شود و سپس مدل به تعادل رسیده است. این روند تا زمانی که کارگاه استخراج به فاصله ۵ متری نقاط شاهد برسد ادامه می‌یابد که نتایج مربوط به میزان آماس کف در شکل ۸ بیان شده است. با توجه به شکل ۸ حداکثر مقدار آماس کف زمانی که جبهه‌کار در فاصله ۵ متری نقطه شاهد است برابر ۱۴۵ سانتی‌متر است که با اندازه‌گیری‌های انجام شده در معدن طبس (۱۴۰ سانتی‌متر) مطابقت قابل قبولی دارد. علاوه بر این با توجه به شکل مذکور می‌توان دریافت که در نقطه شاهد شماره ۳ که در وسط تونل قرار گرفته است بیشترین مقدار بالازدگی کف به وقوع می‌پیوندد حال آن که در نقطه شماره ۴ مقدار بالازدگی ایجاد شده کمتر است.

از عوامل اصلی موثر بر بالازدگی کف تونل، تغییرات تنش ناشی از حفاری کارگاه‌های استخراج است. برای این منظور نمودارهای تنش قائم و افقی در هر کدام از نقاط شاهد کف تونل در شکل‌های ۹ و ۱۰ ترسیم شده است.

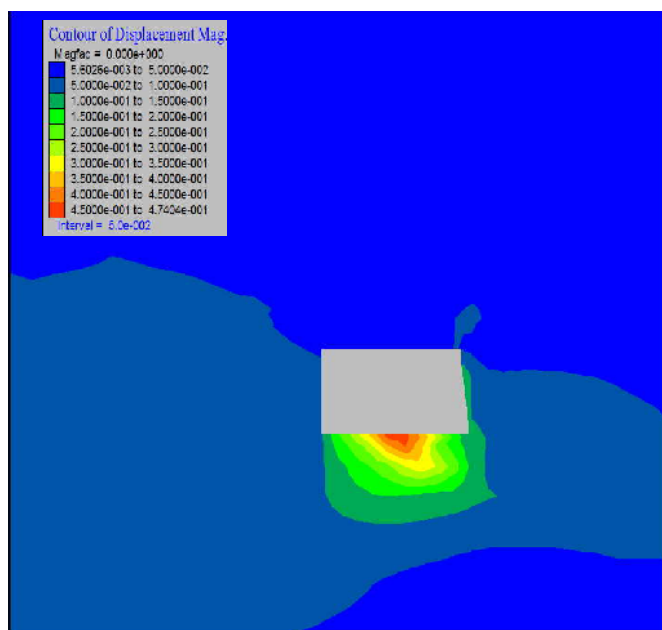
جدول ۲- مشخصات پیچ سنگ و رزین مورد استفاده در معدن زغال‌سنگ طبس (Anon, 2005)

پارامتر	واحد	مقدار
مشخصات پیچ سنگ		
قطر	میلی‌متر	۲۱٫۷
طول	متر	۲٫۴
مدول الاستیسیته	گیگاپاسکال	۲۰۷
حداکثر مقاومت کششی	تن	۳۲
سختی برشی	کیلونیوتن بر میلی‌متر	۶۵
سختی نرمال	مگاپاسکال	۱۰۰
مقاومت فشاری	کیلونیوتن بر میلی‌متر	۵
مشخصات رزین		
مدول برشی	گیگاپاسکال	۹
مقاومت کششی	مگاپاسکال	۲۲٫۱
مقاومت برشی	مگاپاسکال	۱۷
مقاومت فشاری تک محوره	مگاپاسکال	۷۶

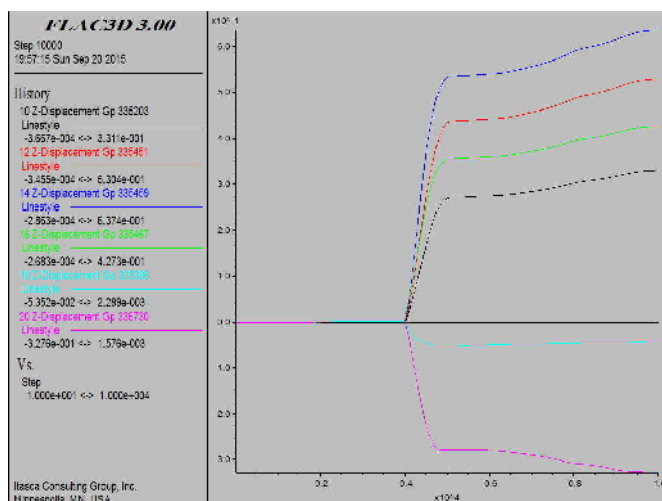
Section	25	29	30
H1 Height 1 (mm)	113	124	138
H2 Height 2 (mm)	28.5	30.0	33.5
H3 Height 3 (mm)	15.0	16.0	17.0
W Width (mm)	137.0	150.5	171.0
C Centroid	56.5	57.8	66.0
A Area (cm ²)	32.2	37.4	46.4
Moment of inertia (cm ⁴)	I_{xx} 465 I_{yy} 593	551 752	693 1284
Elastic modulus (cm ²)	Z_{xx} 76.7 Z_{yy} 82.5	80.2 105.3	129.7 150.2

شکل ۶- مشخصات قاب‌های فولادی V29 (Anon, 2005)

در طراحی نگهداری انجام شده در معدن زغال‌سنگ طبس، کف تونل بدون سیستم نگهداری است. بر اساس طرح مذکور مدل‌سازی عددی صورت پذیرفت که نتایج مربوط به خطوط هم‌مقدار جابه‌جایی و تاریخچه جابجایی چندین نقطه



الف: خطوط هم مقدار جابه‌جایی

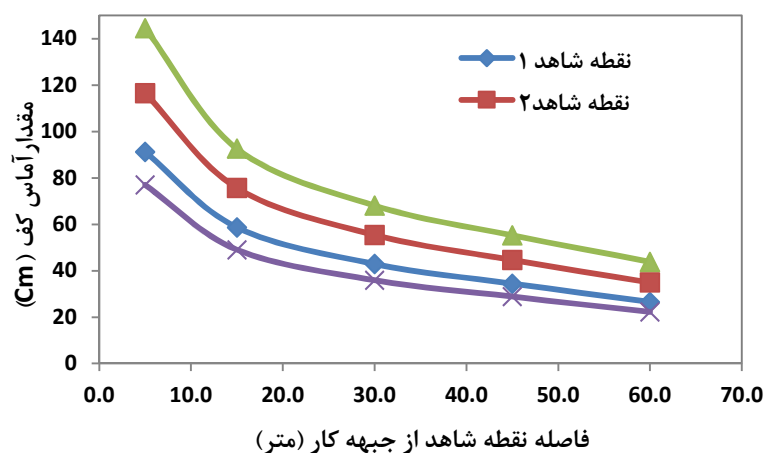


ب: تاریخچه جابه‌جایی در نقاط سقف و کف تونل

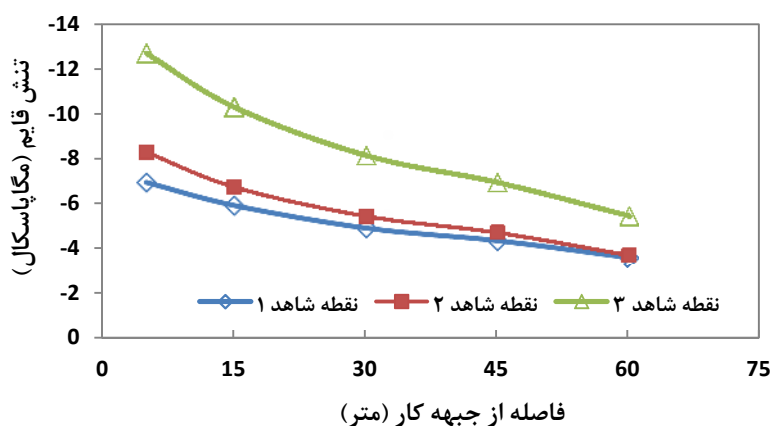
شکل ۷- جابجایی در اطراف تونل با نگهداری در حالتی که $E2$ هنوز استخراج نشده است

جدول ۳- خصوصیات مواد تخریب شده بکارگرفته در مدل‌سازی عددی

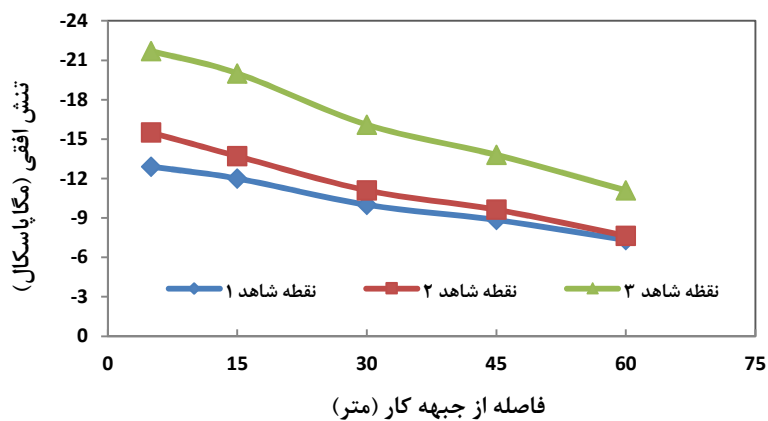
مقدار	واحد	خصوصیات مواد تخریب شده
۵۰۰ - ۱۵	مگاپاسکال	مدول تغییر شکل توده سنگ
۲۶۲۶ - ۲۰۲۰	کیلوگرم بر متر مکعب	وزن مخصوص
۱۰۰۰	پاسکال	چسبندگی
۲۲	درجه	زاویه اصطکاک داخلی
۴	درجه	زاویه اتساع



شکل ۸- اثر پیشروی جبهه‌کار بر روی مقدار آماس کف در نقاط شاهد کف تونل



شکل ۹- تغییرات تنش قائم در نقاط شاهد ناشی از پیشروی جبهه‌کار



شکل ۱۰- تغییرات تنش افقی در نقاط شاهد ناشی از پیشروی جبهه‌کار

ردیف ۶ و ۷ تایی در سقف بازای هر متر پیشروی و ۷ عدد پیچ سنگ ۱/۸ متری به همراه ۴ عدد پیچ سنگ در دیواره سمت راست و ۳ عدد پیچ سنگ در دیواره سمت چپ نصب گردید. سپس برای کاهش بالازدگی، در اولین پیشنهاد قوسی به میزان ۴۰ سانتیمتر در کف تونل ایجاد و ۸ عدد پیچ سنگ ۳ متری به ازای هر متر پیشروی نصب گردید. نتایج حاصل از حل مدل عددی نشان داد که جابه‌جایی کف بیشتر از حد مجاز (۳۰ سانتی‌متر) است. بر این اساس در پیشنهاد بعدی در مدل عددی برای نگهداری کف علاوه بر کف برداری و استفاده از پیچ سنگ از قاب‌های فولادی $V29$ استفاده شده است. در این حالت نیز نتایج حل مدل عددی نشان داد که میزان جابجایی کف از مقدار مجاز تجاوز نموده است. بر این اساس در نهایت در مدل عددی به منظور نگهداری کف از قاب‌های فولادی نوع IBP استفاده شده است و در سیستم نگهداری سقف و دیواره‌ها تغییراتی ایجاد شده است. سیستم نگهداری جدید، تلفیقی از پیچ سنگ‌ها با الگوی جدید (۸+۸) به صورت نصب ۴ پیچ سنگ ۳ متری در دو طرف سقف و ۴ بولت کابلی ۷ متری در وسط سقف بازای هر متر پیشروی و ۸ پیچ سنگ فایبرگلاسی ۴ متری (۴ پیچ سنگ در دیواره سمت راست و ۴ پیچ سنگ در دیواره سمت چپ) است که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که فاصله قاب‌ها در سیستم نگهداری پیشنهادی یک متر و فاصله پیچ سنگ‌ها در هر ردیف نیم متر و فاصله ردیف پیچ سنگ‌ها یک متر در نظر گرفته شده است.

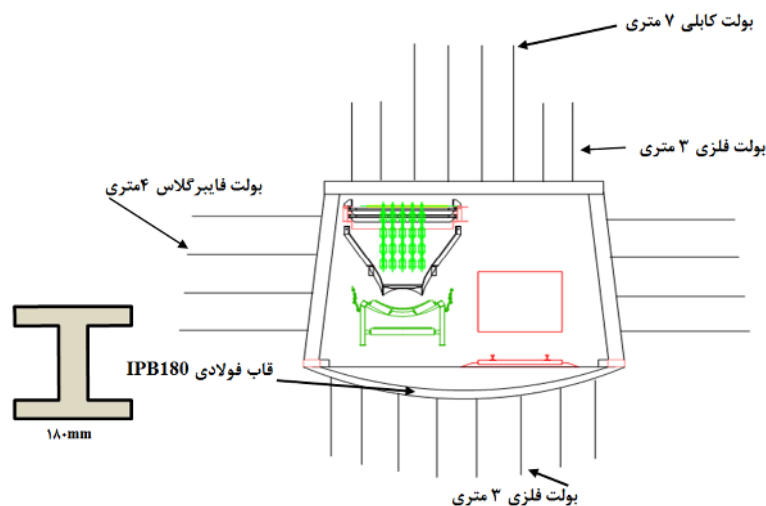
با توجه به شکل‌های مذکور می‌توان نتیجه گرفت که پیشروی جبهه کار سبب می‌شود که میزان تنش‌های قائم در کف تونل ۲ تا ۲٫۵ برابر و تنش‌های افقی ۱٫۵ تا ۲ برابر افزایش یابد که خود عامل اصلی در میزان بالازدگی کف تونل است. نکته قابل توجه دیگر این است که اختلاف میزان تنش‌های قائم برای نقطه شاهد شماره ۳ و ۱ در حالتی که جبهه کار در ۵ متری آن قرار دارد به میزان ۶ مگاپاسکال و برای تنش افقی به میزان ۹ مگاپاسکال است.

۳-۵- طراحی مجدد سیستم نگهداری تونل

باربری معدن پروده

در تونل‌های باربری دنبال لایه معدن شماره یک پروده طبس با توجه به وضعیت لایه بندی و سنگ‌های در برگرنده لایه زغال سنگ و سیستم ترابری مورد استفاده، بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط ابزار بندی، مقادیر جابجایی مجاز در سقف تونل باربری دنبال لایه برابر ۲۰ سانتیمتر و مقدار مجاز آماس کف برابر ۳۰ سانتیمتر است (TCMDO, 2013).

در این تحقیق به منظور رسیدن به نتایج قابل انتظار از میزان جابه‌جایی کف تونل در اولین مرحله، دیواره و سقف تونل با سیستم نگهداری پیچ سنگ، با الگوی نصب (۶+۷) که در طراحی پایه معدن طبس تعریف شده و قاب فولادی $V29$ نگهداری شده است. برای این منظور بر اساس الگوی معدن طبس، در مدل عددی، ۱۳ عدد پیچ سنگ ۲٫۴ متری در دو



شکل ۱۱- نمایی از سیستم نگهداری پیشنهادی

مشخصات آن در جدول ۴ بیان شده است.

جدول ۴- مشخصات قاب فولادی IPB180

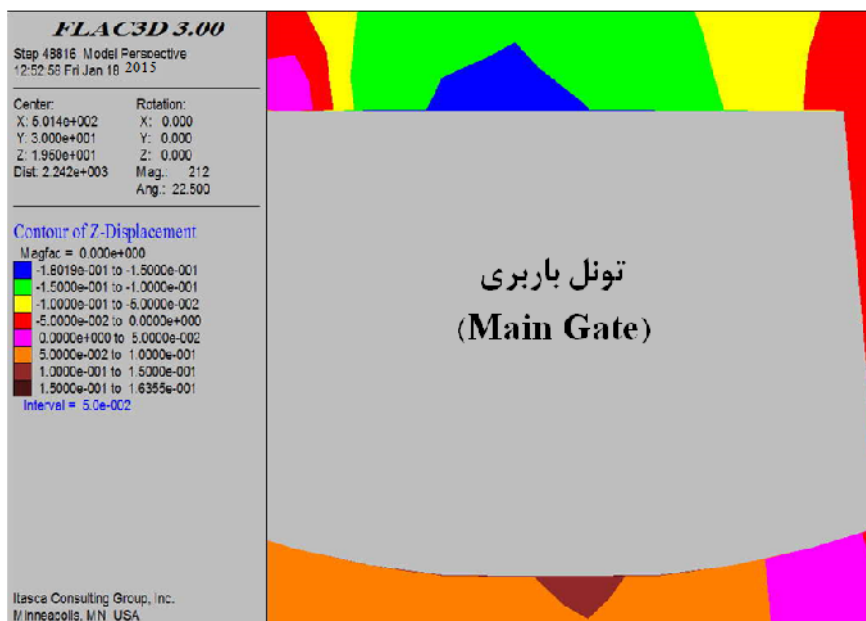
مقدار	واحد	پارامتر
۶۵٫۳	Cm ²	سطح مقطع
۵۱٫۲	Kg/m	وزن
۳۸۳۰	Cm ⁴	ممان دوم حول محور X
۱۳۶۰	Cm ⁴	ممان دوم حول محور Y

۳-۵-۱- تحلیل سیستم نگهداری پیشنهادی

تحلیل نتایج مربوط به سیستم نگهداری در موقعیت‌های مختلف جبهه کار برای نقطه شاهد واقع در مرکز کف تونل انجام شده است. بر این اساس کنتورهای جابه‌جایی ایجاد شده در اطراف تونل باربری بعد از اعمال سیستم نگهداری پیشنهادی در حالتی که جبهه کار در ۵ متری نقطه شاهد قرار گرفته است، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به سیستم نگهداری پیشنهادی حداکثر جابه‌جایی در سقف حدود ۱۸ سانتی‌متر (کمتر از مقدار مجاز ۲۰ سانتی‌متر) و مقدار بالآمدگی کف حدود ۱۶ سانتی‌متر (کمتر از مقدار مجاز ۳۰ سانتی‌متر) است.

نتایج مدل‌سازی عددی سیستم نگهداری جدید با انواع قاب‌های فولادی نشان می‌دهد که استفاده از قاب فولادی *IBP180* به همراه الگوی جدید پیچ‌سنگ‌ها سبب می‌شود که مقدار جابه‌جایی کمتر از حد مجاز باشد و بر اساس آن بتوان هدف مساله که کنترل آماس (بالازدگی) کف تونل باربری معدن طیس است، کنترل نمود. بر این اساس بهترین سیستم نگهداری به شرح زیر پیشنهاد شده است.

- استفاده از ۴ عدد پیچ‌سنگ فلزی به طول ۳ متر به فاصله‌داری نیم متر در هر ردیف و فاصله ردیفی یک متر در دو طرف سقف تونل
- استفاده از ۴ عدد پیچ‌سنگ کابلی به طول ۷ متر به فاصله‌داری نیم متر در هر ردیف و فاصله‌داری ردیفی یک متر در مرکز سقف به گونه‌ای که پیچ‌سنگ کابلی در لایه مقاوم نفوذ نماید.
- استفاده از ۴ عدد پیچ‌سنگ فایبر گلاسی به طول ۴ متر به فاصله‌داری نیم متر در هر ردیف و فاصله‌داری یک متر در دیواره سمت راست تونل
- استفاده از ۴ عدد پیچ‌سنگ فایبر گلاسی به طول ۴ متر به فاصله‌داری نیم متر در هر ردیف و فاصله‌داری یک متر در دیواره سمت چپ تونل
- استفاده از قاب‌های فولادی نوع *IPB* شماره ۱۸۰ که



شکل ۱۲- کنتورهای جابه‌جایی در اطراف تونل باربری (جبهه کار در ۵ متری نقطه شاهد)

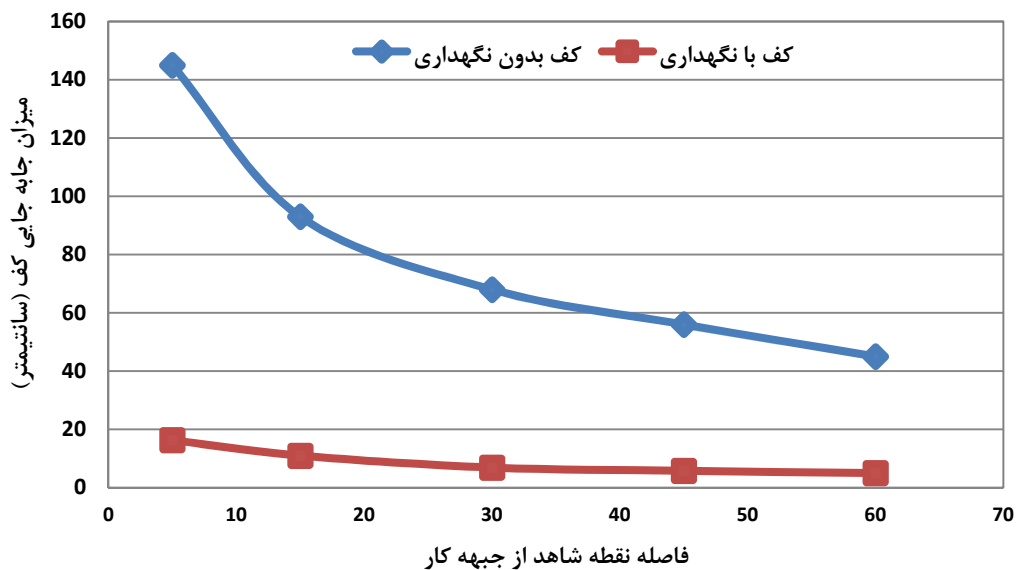
تا ۷ متری لبه جبهه‌کار به حداکثر مقدار خود (۴ تا ۵ برابر تنش‌های برجای اولیه) رسیده‌اند.

ب: درحالی‌که کف بدون نگهداری است، پیشروی جبهه‌کار اثر بسزایی بر میزان بالازدگی کف تونل دارد. در حالتی‌که سینه‌کار در ۶۰ متری نقطه شاهد قرار دارد میزان جابه‌جایی حدود ۴۵ سانتی‌متر است که با رسیدن سینه‌کار به ۵ متری آن، میزان جابه‌جایی کف به ۱۴۵ سانتی‌متر رسیده است. به عبارتی دیگر اثر پیشروی جبهه‌کار بر میزان بالازدگی کف تونل ۱۰۰ سانتی‌متر است.

ج: مقایسه میزان جابه‌جایی کف در دو حالت با نگهداری و بدون نگهداری و برای حالتی‌که جبهه‌کار در ۵ متری نقطه شاهد است نشان می‌دهد که سیستم نگهداری پیشنهادی سبب شده است که میزان جابه‌جایی کف ۹ مرتبه کاهش یابد.

در شکل ۱۳ مقادیر بالازدگی کف با توجه به فاصله جبهه‌کار نسبت به نقطه شاهد مورد نظر با در نظر گرفتن سیستم نگهداری پیشنهادی و بدون در نظر گرفتن سیستم نگهداری برای کف ترسیم شده است. با توجه به شکل مذکور نکات زیر قابل توجه است:

الف: سیستم نگهداری پیشنهادی سبب شده است که اثر فاصله از جبهه‌کار بر میزان جابه‌جایی کف کاهش یابد. به عبارتی دیگر در حالتی‌که جبهه‌کار در ۶۰ متری نقطه شاهد است، میزان جابه‌جایی کف ۵ سانتی‌متر است و با رسیدن سینه‌کار به ۵ متری آن، میزان جابه‌جایی به حدود ۱۶۳ سانتی‌متر می‌رسد. روشن است که اثر پیشروی جبهه‌کار بر میزان آماس کف برابر با ۱۱۳ سانتی‌متر است. علت اصلی این موضوع تنش‌های جلویی توزیع شده بر روی جبهه‌کار (زغال سنگ استخراج نشده) است که مقدار آن‌ها معمولاً در ۳



شکل ۱۳- مقادیر بالازدگی کف با توجه به فاصله جبهه‌کار نسبت به نقطه شاهد

تونل، مدل‌های رفتاری موهر-کلمب و کرنش نرمی در نرم افزار $FLAC^{3D}$ مورد استفاده قرار گرفت و مقادیر آماس کف بدون در نظر گرفتن اثر پیشروی جبهه‌کار و با در نظر گرفتن اثر پیشروی جبهه‌کار محاسبه شد. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که مقدار آماس کف تونل در حالت بدون در نظر گرفتن سیستم نگهداری برای کف و زمانی‌که اثر پیشروی

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل‌سازی عددی پدیده‌ی آماس کف (بالازدگی) تونل در تونل باربری دنبال لایه پهنه شرقی شماره ۲ ($E2M.G$) معدن زغال سنگ مکانیزه طیس صورت پذیرفت و سیستم نگهداری مجدد برای مقابله بر پدیده مذکور پیشنهاد شد. به منظور مدل‌سازی و مشخص شدن مقدار آماس کف

شده مشخص شد بهترین سامانه نگهداری پیشنهادی برای مقابله با آماس کف در تونل باربری *E2M.G* استفاده از قاب‌های فولادی *IPB* شماره ۱۸۰ همراه با نصب ۸ عدد پیچ‌سنگ فلزی ۳ متری و حفر کف به شکل قوسی به عمق ۴۰ سانتیمتر است. در این حالت مقدار آماس کف زمانی که جبهه‌کار در ۵ متری نقاط شاهد است، از ۱۴۵ سانتیمتر به ۱۶٫۵ سانتیمتر می‌رسد. مقایسه میزان جابه‌جایی کف در دو حالت با نگهداری و بدون نگهداری و برای حالتی که جبهه‌کار در ۵ متری نقطه شاهد است، نشان می‌دهد که سیستم نگهداری پیشنهادی سبب می‌شود که میزان جابه‌جایی کف ۹ مرتبه نسبت به حالت اولیه کاهش یابد.

جبهه‌کار در نظر گرفته نشود، ۴۵ سانتیمتر است. هنگامی که جبهه‌کار و اثر پیشروی آن در نظر گرفته شود مقدار آماس کف به تدریج با نزدیک شدن جبهه‌کار به نقطه شاهد افزایش می‌یابد تا این که مقدار آماس زمانی که جبهه‌کار در ۵ متری نقطه شاهد است به ۱۴۵ سانتیمتر می‌رسد. علاوه بر این با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده مشخص شد که پیشروی جبهه‌کار باعث می‌شود مقدار تنش‌های قائم در کف ۲ تا ۲٫۵ برابر و مقدار تنش‌های افقی در کف ۱٫۵ تا ۲ برابر شود که نشان می‌دهد از عوامل مؤثر بر مقدار بالازدگی کف تغییرات تنش‌های جلویی ناشی از پیشرفت جبهه‌کار است و زمانی که جبهه‌کار به نزدیکی نقطه شاهد می‌رسد تغییرات در مقدار آماس کف شدیدتر می‌شود. در نهایت با مدل‌سازی‌های انجام

۴- مراجع

- Anagnostou, G., & Kovári, K. (1995). Numerical analysis of tunnel floor heaves in swelling ground. In *Proceedings of the international symposium on numerical models in geomechanics. Davos* (Vol. 6, No. 8).
- Anon. (2005). Basic Design of Tabas Coal Mine Project, Report-Mining. Vol 1 of 5.
- Barla, M. (1999). *Tunnels in swelling ground: simulation of 3D stress paths by triaxial laboratory testing* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
- Barla, M. (2008). Numerical simulation of the swelling behaviour around tunnels based on special triaxial tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5), 508-521.
- Chang, Q., Zhou, H., Xie, Z., & Shen, S. (2013). Anchoring mechanism and application of hydraulic expansion bolts used in soft rock roadway floor heave control. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(3), 323-328.
- Chen, Y., Bai, J., Yan, S., Xu, Y., Wang, X., & Ma, S. (2012). Control mechanism and technique of floor heave with reinforcing solid coal side and floor corner in gob-side coal entry retaining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(6), 841-845.
- Gao, F., Stead, D., & Kang, H. (2015). Numerical simulation of squeezing failure in a coal mine roadway due to mining-induced stresses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(4), 1635-1645.
- Hesami, S., Bararpour, M., Shakeri, A., 2011. Management of tunnel in subsidence case; case study in swelling ground. 6th civil engineering conferences, semnan university. (in Persian)
- Jin, S., & Lianguo, W. (2011). Numerical simulation of grooving method for floor heave control in soft rock roadway. *Mining Science and Technology (China)*, 21(1), 49-56.
- Kovári, K. (2009). Design methods with yielding support in squeezing and swelling rocks. In *World Tunnel Congress. Budapest, Hungary: [sn]* (pp. 1-10)

- Mortazavi, A., Hassani, F. P., & Shabani, M. (2009). A numerical investigation of rock pillar failure mechanism in underground openings. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 691-697.
- Najafi, M., 2009. Optimized design for Longwall Chain Pillars in the Tabas Coal Mines. *M.Sc Thesis, Shahrood university of technology. (in Persian)*
- Najafi, M., Jalali, S. E., Bafghi, A. Y., & Sereshki, F. (2011). Prediction of the confidence interval for stability analysis of chain pillars in coal mines. *Safety science*, 49(5), 651-657.
- Peng, S. S. (2006). Longwall mining. second edition, Morgantown, WV.621 pp.
- Schumacher, F. P. (2012). *Numerical investigation of pipe umbrella roof support systems in underground coal mining*. The University of Utah.
- Shahriar, K., Amoushahi, S., & Arabzadeh, M. (2009, January). Prediction of surface subsidence due to inclined very shallow coal seam mining using FDM. In Coal Operators' Conference (p. 93).
- Shahrifzadeh, A., 2011. Redesign of support system in Tabas coal mine tunnels. *M.Sc Thesis, Bafgh Azad university. (in Persian)*
- Sun, Y. (2004). Ground Control for Emplacement Drifts for LA (No. 800-K0C-SSE0-00100-000-00A). Yucca Mountain Project, Las Vegas, Nevada (US).
- Tabas coal mine design office (TCMDO), 2013. Extraction report. Tabas coal mine. *(in Persian)*
- Yasitli, N. E., & Unver, B. (2005). 3D numerical modeling of longwall mining with top-coal caving. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 42(2), 219-235.
- Yasitli, N. E., Unver, B. (2005). 3-D Numerical Modelling Of Stresses around a Longwall Panel with Top Coal Caving. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, VOLUME 105.
- Zhu, S. Y., Jian, Z. Q., Hou, H. L., Xiao, W. G., & Pu, Y. A. O. (2008). Analytical model and application of stress distribution on mining coal floor. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(1), 13-17.