

## مدل سازی تاثیر طول کارگاه استخراج جبهه کار طولانی بر توزیع تنش ها

محمود عبدالله زاده<sup>۱</sup>، جعفر خادمی حمیدی<sup>۲\*</sup>، مسعود منجزی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، [abdolahzade.mahmood@yahoo.com](mailto:abdolahzade.mahmood@yahoo.com)

۲- استادیار دانشگاه تربیت مدرس، [jafarkhademi@modares.ac.ir](mailto:jafarkhademi@modares.ac.ir)

۳- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، [monjezi@modares.ac.ir](mailto:monjezi@modares.ac.ir)

(دریافت ۳۰ شهریور ۱۳۹۲، پذیرش ۱۱ آذر ۱۳۹۳)

### چکیده

در روش جبهه کار طولانی 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 منطقه تخریب توزیع می شود. تعیین مقدار و نحوه توزیع تنش های اطراف پهنه استخراجی و عوامل تأثیرگذار بر آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. طول کارگاه استخراج یکی از عوامل تأثیرگذار بر نحوه توزیع این تنش هاست. برای بررسی تاثیر طول کارگاه استخراج بر توزیع و مقدار تنش های وارده بر پهنه استخراجی می توان از روش های تجربی و عددی استفاده نمود. در این مطالعه، از مدل سازی عددی سه بعدی برای بررسی تاثیر طول کارگاه استخراج بر توزیع تنش ها در معدن زغال سنگ شماره ۱ پروده طبس استفاده شده است. یک تحلیل حساسیت از تاثیر شش مقدار مختلف از طول کارگاه بر شدت تنش های تکیه گاهی انجام شده است. نتایج نشان می دهد که طول کارگاه تاثیر غیرخطی بر توزیع تنش تکیه گاهی جلویی در کارگاه استخراج دارد به نحوی که با افزایش ۳۰ درصدی طول کارگاه از ۱۹۰ به ۲۴۵ متر، تنش در سقف به میزان ۱۰٪ (از ۵/۵۵ به ۶ مگاپاسکال) افزایش می یابد. برای طول های بیشتر از ۲۴۵ متر تا ۳۰۰ متر با افزایش ۲۰ درصدی طول کارگاه، تنش در سقف به میزان ۲۷ درصد (از ۶ به ۴/۴ مگاپاسکال) کاهش می یابد. همچنین با تغییر طول کارگاه از ۱۹۰ تا ۳۰۰ متر، فاصله موقعیت حداکثر تنش از ۵ به ۱۵ متری سینه کار افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: جبهه کار طولانی، طول کارگاه استخراج، توزیع تنش، معدن زغال سنگ شماره ۱ پروده طبس

## ۱- مقدمه

روش جبهه کار طولانی یکی از روش‌های استخراج زغال سنگ با راندمان تولید بالاست که برای تجهیز و آماده‌سازی آن سرمایه-گذاری اولیه زیادی لازم است. استفاده از پهنه‌های با ابعاد بزرگ در این روش باعث افزایش تولید، کاهش هزینه‌های آماده‌سازی، کاهش زمان صرف شده برای استخراج و در نهایت افزایش بهره‌وری می‌شود. اما از سوی دیگر ابعاد پهنه تحت تأثیر عوامل فنی مثل ظرفیت تجهیزات حمل و نقل (ناو زنجیری در کارگاه)، توان سیستم نگهداری، توانایی تهویه معدن، مدیریت کارگاه و غیره محدود می‌شود. علاوه، وجود عوارض زمین‌شناسی مثل چین-خوردگی و گسل‌ها ممکن است ابعاد پهنه‌ها را محدود سازد. به عنوان مثال در طراحی پهنه‌های استخراجی معدن زغال سنگ پروده طبس، اندازه برخی از پهنه‌ها به خاطر گریز از برخورد با گسل کوچک‌تر در نظر گرفته شده است.

استخراج پهنه جبهه کار طولانی منجر به حرکت رو به پایین طبقات سقف، تغییر تنش‌های طبیعی برجا و ضریب هیدرولیکی می‌شود. از اینرو طبقات سقف به درون پهنه استخراجی فرو می‌ریزد. طبقات سقف رفتار متفاوتی دارد که این به عواملی از جمله مقاومت، ضخامت، تعداد لایه‌های سنگی سقف، ضخامت روبراه، ارتفاع لایه زغال قابل استخراج، عرض و طول پهنه بستگی دارد.

یانگ و لین<sup>۱</sup> تغییرات تنش را بر اساس تغییرات موقعیت سینه کار در حال استخراج بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تنش‌های تکیه‌گاهی در فاصله ۵ متری جلوی سینه کار به حداکثر مقدار خود می‌رسد و از فاصله ۱۰ متری به بعد به مقدار اولیه خود باز می‌گردد. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که حداکثر تنش‌ها زمانی شکل می‌گیرد که پیشروی کارگاه بین ۲۰ تا ۳۰ متر است [۱]. کلی و همکاران<sup>۲</sup> در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که تنش افقی وارد بر پانل باعث ایجاد شکست برشی در سنگ و در نتیجه تمرکز تنش تکیه‌گاهی در جلوی کارگاه استخراج می‌شود [۲]. شعبانی مشکول و لی<sup>۳</sup> با ارائه الگوریتمی برای شبیه‌سازی عددی پهنه جبهه کار طولانی به این نتیجه رسیدند که تنش‌های وارد بر پایه‌های زنجیری و سینه کار به دلیل تخریب بلافاصله سقف پشت سینه کار به طور مداوم در حال

تغییر است [۳]. ساچورسکا و همکاران<sup>۴</sup> توزیع تنش‌ها را در لایه‌های زغال بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که وقتی زاویه تکیه‌گاهی ۲۰ درجه است، تنش قائم تقریباً سه برابر مقدار اولیه می‌شود [۴]. زانگ و همکاران<sup>۵</sup> تغییرات تنش را در جلوی سینه کار برای معادن زغال سنگ نرم چند لایه در چین به صورت تجربی بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با پیشروی سینه کار، حداکثر تنش قائم در فاصله ۸ تا ۱۵ متری سینه کار روند صعودی دارد و پس از آن به میزان محسوسی کاهش می‌یابد و در فاصله ۳۰ متری به حالت اولیه باز می‌گردد. همچنین آنها دریافتند که تنش قائم در لایه پایین‌تر کمی بیشتر از لایه بالایی است و روند افزایش تنش در لایه پایینی بیشتر از لایه بالایی است [۵].

تاکنون تحقیق‌های گسترده‌ای در مورد چگونگی توزیع تنش‌ها در اطراف کارگاه جبهه کار طولانی و موقعیت تنش حداکثر نسبت به سینه کار انجام شده است، اما در مورد تاثیر طول کارگاه استخراج بر توزیع تنش‌ها در جلوی سینه کار، مطالعه‌ای انجام نشده است. از اینرو با توجه به اهمیت موضوع، این تحقیق به بررسی تاثیر طول کارگاه استخراج بر نحوه توزیع تنش در پهنه استخراجی معدن زغال سنگ طبس می‌پردازد. برای این کار از روش عددی تفاضل محدود با مدل رفتاری مناسب برای مواد تخریبی استفاده می‌شود.

## ۲- موقعیت و زمین‌شناسی معدن

منطقه زغالی طبس در شرق ایران مرکزی و در شمال شرقی استان یزد واقع شده است. این حوضه زغالی با وسعت ۴۵۰۰۰ کیلومترمربع به شکل دوکی می‌باشد که محور بلندش با نصف النهار ۵۷ درجه طول شرقی مطابقت دارد. این حوضه از شرق به وسیله گسل نایبند از غرب به گسل کلمرد و نائین محدود شده است [۶].

منطقه زغال خیز پروده از رسوبات تریاس فوقانی و ژوراسیک تشکیل شده است که با شیب کمی سکوه‌های وسیعی را تشکیل داده است. لایه‌های زغال سنگ در بخش قدیر در سازند نایبند (تریاس فوقانی) قرار داشته و ضخامت زون اصلی

<sup>4</sup> Suchowerska et al.

<sup>5</sup> Zhang Rui-lin et al.

<sup>1</sup> Yang and Lin

<sup>2</sup> Kelly et al.

<sup>3</sup> Shabanimashcool and Li

### ۳- توزیع تنش ها در جبهه کار طولانی

قبل از معدنکاری، لایه زغال سنگ مابین دو لایه نسبتاً محکم کف و سقف در اثر وزن طبقات بالایی، تحت بارگذاری و تنش یکنواخت قرار می گیرد.

در اثر حفر ورودی ها و با برداشتن لایه زیرین که کار تحمل وزن لایه های بالایی را انجام می داد، تعادل تنش در منطقه به هم خورده و برای رسیدن به وضعیت تعادل جدید، تنش مجدداً اما با وضعیتی متفاوت نسبت به قبل توزیع می شود. در پی آن، یک ناحیه زوده از تنش در سقف ورودی به وجود می آید و باری که قبلاً بوسیله مواد استخراج شده نگهداری می شد، به دو طرف ورودی ها، یعنی پایه های حایل و زغال سنگ دست نخورده پهنه منتقل می شود. بنابراین در مناطق تکیه گاهی مانند پایه ها و لبه پهنه، تنش های قائم که به آن تنش های تکیه گاهی اطلاق می شود، بیشتر از میانگین تنش برجا است. با پیشروی سینه کار جبهه کار طولانی، فشارهای تکیه گاهی در اطراف لبه های محل تخریب با فشارهای آماده سازی (که در اثر حفر ورودی ها شکل می گیرد)، جمع می شود.

فشارهای تکیه گاهی در جلوی خط سینه کار، فشار تکیه گاهی جلویی و در امتداد منطقه تخریب در دو طرف پهنه، فشار تکیه گاهی کناری نامیده می شود. فشارهای تکیه گاهی جلویی و کناری در گوشه های پهنه (در محل تقاطع خط سینه کار با تونل های باربری و تهویه) روی هم قرار می گیرد و تشدید می شود. هر دو فشار با دور شدن از لبه های پهنه به صورت نمایی کاهش پیدا کرده و در فاصله ای دورتر، با تنش برجا برابر می شود. باید توجه داشت که موقعیت مکانی فشار حداکثر در جلوی کارگاه استخراج از منطقه ای به منطقه دیگر و بسته به ویژگی های طبقات روباره تغییر می کند.

### ۴- مدل سازی کارگاه استخراج معدن زغال سنگ طبس

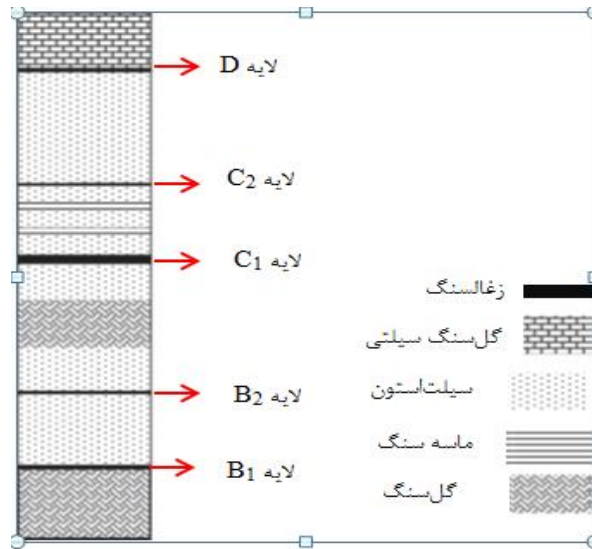
از روش عددی تفاضل محدود و نرم افزار  $FLAC^{3D}$  برای مدل سازی کارگاه استخراج جبهه کار طولانی استفاده شده است. اولین گام در مدل سازی و اجرای برنامه در این نرم افزار ساخت هندسه مدل است. برای این کار ابتدا بایستی ابعاد اجزاء مدل شامل عمق و ضخامت لایه زغال و لایه های بالایی و پایینی،

زغال دار حدود ۱۰۰ متر است. لایه های این زون امتداد جنوب شرقی- شمال غربی و شیب جنوب غربی و حدود ۶/۵ کیلومتر رخنمون دارد. لایه های زغالی این منطقه به وسیله سیستمی از گسل های شرقی- غربی جابجایی عمودی داشته است. این جابجایی بندرت به ۵ متر می رسد و در مناطقی نیز جابجایی وجود ندارد یا به صورت شکستگی یا شکاف نمایان می شود [۶].

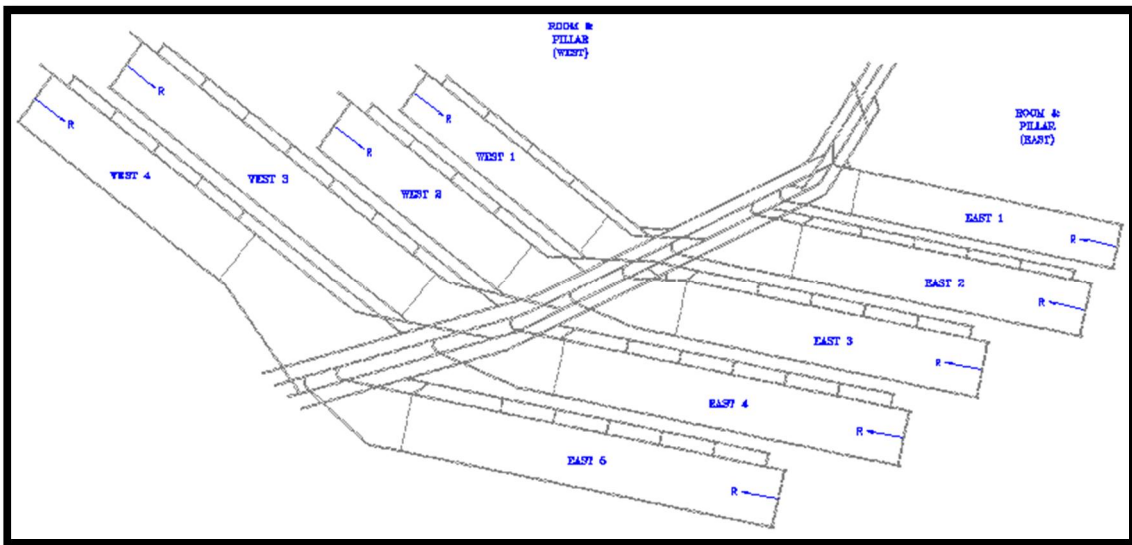
در محدوده معدن می توان به ۵ لایه زغالی شامل  $B_1$ ،  $B_2$ ،  $C_1$ ،  $C_2$  و  $D$  اشاره کرد. استخراج لایه های  $B_1$ ،  $C_2$  و  $D$  به علت درصد گوگرد بالا مورد توجه نیست و فقط دو لایه  $B_1$  و  $C_2$  استخراج می شوند. لایه قابل استخراج در این معدن فعلاً  $C_1$  است. استخراج به روش جبهه کار طولانی پسرو و به طور تمام مکانیزه انجام می شود. ضخامت لایه زغال سنگ  $C_1$  که در حال استخراج است بین ۱/۴۵ تا ۲ متر بوده که از سطح زمین تا عمق بیش از ۷۰۰ متر امتداد دارد. لایه  $C_1$  از دو جهت دارای شیب است؛ در جهت پیشروی استخراج دارای شیب ۳ الی ۴ درجه و در جهت عمود بر پیشروی استخراج دارای شیب ۱۱ تا ۲۶ درجه که با عبور از عمق ۳۰۰ متری از سطح دریا این شیب به کمتر از ۱۰ درجه کاهش می یابد. شکل ۱ ستون چینه شناسی حوزه زغالی پروده طبس را نشان می دهد [۶].

در مجموع، به منظور استخراج این معدن ۲۷ کارگاه استخراجی طراحی شده است و هم اکنون در زمان نگارش این مقاله، دومین کارگاه ( $E_2$ ) در حال استخراج است. در پانل شماره ۲ شرقی ( $East 2$ ) ضخامت لایه بطور میانگین ۱/۹۵ متر است. این پانل در عمق ۱۰۰ تا ۲۰۰ متری از سطح زمین مابین دو تونل تهویه در بالا و باربری در پایین قرار دارد. غیر از پهنه های اول و دوم که دارای دو تونل فرعی هستند، بقیه پهنه ها دارای سه تونل فرعی خواهد بود که از راهروی اصلی منشعب خواهد شد. از این سه تونل، تونل پایینی به عنوان تونل باربری اصلی و دو تونل دیگر که در سمت دیگر پهنه قرار دارند، یکی برای ورود هوای تازه و دیگری برای خروج هوای آلوده برگشتی استفاده می شود. فاصله بین تونل های تهویه ورودی و خروجی ۳۶ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۲ پانل های کارگاه استخراج را در لایه  $C_1$  نشان می دهد [۶].

پهنه استخراجی، تونل‌های تهویه و باربری، کارگاه استخراج به همراه اتاق نصب، راه‌اندازی و غیره تعیین شود.



شکل (۱): ستون چینه‌شناسی منطقه زغالی پروده طبس



شکل (۲): نقشه ۹ پانل استخراجی از پانل‌های معدن شماره یک [۶]

- ارتفاع کارگاه: ۲ متر

تونل‌های تهویه و باربری با ابعاد ۴/۵ متر در عرض و ۳/۵ متر در ارتفاع با مقطع مستطیلی طراحی و اجرا شده‌اند. این تونل‌ها به وسیله رودهدر با ۴ متر پیشروی در هر سیکل و سپس نصب تور سیمی و پیچ‌سنگ حفر می‌شود [۶].

#### ۴-۱- مشخصات پهنه استخراجی و لایه‌ها

بر اساس داده‌های تهیه شده از معدن مکانیزه زغال‌سنگ پروده ۱ طبس، ابعاد پانل E2 به قرار زیر است:

- طول پانل: ۱۲۰۰ متر
- عرض پانل: ۲۱۷ متر

یکسان در نظر گرفته می شود. در مجموع ۶ لایه از عمق ۲۰۰ متری تا سطح زمین در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مشخصات هندسی لایه ها را نشان می دهد.

گرفته شده است. شکل (۳) هندسه مدل ساخته شده در نرم افزار  $FLAC^{3D}$  را نشان می دهد.

#### ۴-۲- مدل رفتاری و تخصیص خصوصیات مواد

پس از ساخت هندسه مدل، نوبت به معرفی مدل رفتاری و تخصیص خصوصیات مواد می رسد. مدل رفتاری انتخاب شده در این تحقیق موهر-کلمب است.

خصوصیات موادی که در نرم افزار استفاده می شود باید تا آنجا که ممکن است به خصوصیات مقادیر واقعی نزدیک باشد. نتایج بدست آمده از آزمون های آزمایشگاهی به ویژه در مورد سنگ ها را نمی توان به صورت مستقیم وارد نرم افزار کرد. از این رو بایستی از روابط و یا نرم افزار تبدیل خصوصیات ماده سنگ به توده سنگ استفاده کرد. جدول (۲) خصوصیات توده سنگ را نشان می دهد.

#### ۴-۳- تعیین حداکثر گام پیشروی تونل های تهویه، باربری و کارگاه استخراج

برای تعیین مقدار گام پیشروی در حفر تونل ها و کارگاه استخراج می توان از معیار ساکورایی<sup>۶</sup> استفاده کرد. ساکورایی در سال ۱۹۸۱ روشی برای ارزیابی پایداری زمین با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرد که بر اساس نتایج آزمایش های فشاری تک محوری بر روی سنگ ها تعریف می شود [۷]. این روش اغلب به عنوان روشی استاندارد برای همگرایی (جابجایی نسبی دیواره های) تونل استفاده می شود که در نتیجه بررسی تونل های مختلف به دست آمده است. ساکورایی علاوه بر انتشار روابط بین مقاومت فشاری تک محوری و کرنش بحرانی برای سنگ های مختلف، روابطی نیز بین مدول تغییر شکل پذیری سنگ های مختلف و کرنش بحرانی ارائه کرد [۸].

ضخامت لایه های سقف و کف زغال سنگ در جهت پیشروی و همچنین در جهت امتداد کارگاه تا حدودی متغیر است اما بر اساس شرایط کاری با نرم افزار ضخامت لایه ها در تمام جهات

#### جدول ۱- مشخصات هندسی لایه ها [۴]

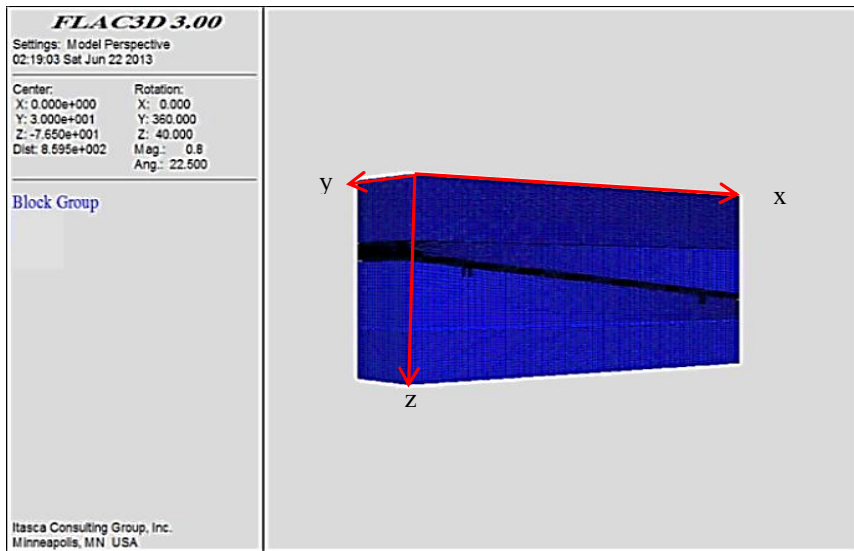
| نوع لایه           | کد لایه | عمق لایه (متر) | ضخامت لایه (متر) |
|--------------------|---------|----------------|------------------|
| سیلت استون         | ۱       | ۰-۱۸۲          | ۱۸۲              |
| سیلت استون ماسه ای | ۲       | ۱۸۲-۱۸۶/۵      | ۴/۵              |
| گل سنگ سیلتی       | ۳       | ۱۸۶/۵-۱۹۴      | ۷/۵              |
| زغال سنگ           | ۴       | ۱۹۴-۱۹۶        | ۲                |
| گل سنگ             | ۵       | ۱۹۶-۱۹۷/۵      | ۱/۵              |
| ماسه سنگ           | ۶       | ۱۹۷/۵-۲۰۰      | ۲/۵              |

ابعاد مدل بر اساس اطلاعات موجود به این شرح انتخاب شده است:

- ۱۵۰ متر در جهت محور  $Z$  (عمق کار معدنی)
- ۶۰ متر در جهت محور  $Y$  (به موازات طول پهنه)
- ۴۰۰ متر در جهت محور  $X$  (به موازات طول کارگاه یا عرض پهنه)

با توجه به قرارگیری لایه زغال در عمق ۱۹۶ متری از سطح زمین در پانل  $E2$  اندازه مدل در این جهت ۲۰۰ متر است که به منظور کوچک کردن و آسان سازی مدل، ۱۵۰ متر در نظر گرفته می شود و ارتفاع باقیمانده به صورت بار به مدل وارد می شود. اندازه واقعی مدل در جهت محور  $Y$  برابر با ۱۲۰۰ متر است که به دلیل کاهش تعداد زون ها و همچنین به دلیل شکل مساله این بعد به ۶۰ متر کاهش یافت. نتایج شبیه سازی از ۳۰ متر پیشروی اولیه کارگاه به دست می آید. اندازه مدل در جهت محور  $X$  با توجه به تغییر طول کارگاه استخراج ۴۰۰ متر در نظر

<sup>6</sup> Sakurai



شکل (۳): هندسه مدل ساخته شده در نرم افزار

جدول ۲- خصوصیات توده سنگ ورودی در مدلسازی عددی [۴]

| نوع سنگ                              | سیلت استون | سیلت استون ماسه‌ای | گل سنگ سیلتی | زغال سنگ | گل سنگ | ماسه سنگ |
|--------------------------------------|------------|--------------------|--------------|----------|--------|----------|
| چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ )           | ۲۷۲۰       | ۲۷۱۰               | ۲۶۸۰         | ۱۶۰۰     | ۲۶۳۰   | ۲۷۰۰     |
| زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) (درجه) | ۲۷/۴۲      | ۳۱/۷۵              | ۲۲/۱۷        | ۱۵/۷۶    | ۲۰/۱۳  | ۴۳/۵۲    |
| چسبندگی (c) (MPa)                    | ۰/۳۵۷      | ۰/۴۴۳              | ۰/۲۵۷        | ۰/۰۸۴    | ۰/۲۳۱  | ۰/۷۶۷    |
| مدول الاستیسیته (E) (MPa)            | ۲۲۳۸       | ۲۸۱۸               | ۱۷۷۸         | ۷۴۹      | ۱۹۹۵   | ۳۵۴۸     |
| مقاومت کششی (MPa)                    | ۰/۰۱۲      | ۰/۰۰۷              | ۰/۰۰۵        | ۰/۰۰۲    | ۰/۰۱۳  | ۰/۰۱۷    |
| نسبت پواسون ( $\nu$ )                | ۰/۲۵       | ۰/۲۵               | ۰/۲۸         | ۰/۲۵     | ۰/۳۱   | ۰/۲۵     |
| مدول بالک (K) (MPa)                  | ۱۴۹۲       | ۱۸۷۸               | ۱۳۴۷         | ۴۹۹      | ۱۷۵۰   | ۲۳۶۵     |
| مدول برشی (G) (MPa)                  | ۸۹۵        | ۱۱۲۷               | ۶۹۵          | ۲۹۹      | ۷۶۱    | ۱۴۱۹     |
| مقاومت فشاری تک محوره (MPa)          | ۰/۲۷۳      | ۰/۲۸۷              | ۰/۱۱۴        | ۰/۰۱۵    | ۰/۱۶۵  | ۱/۰۱     |

$$E=1.778Gpa=15290.52 \left( \frac{kgf}{cm^2} \right)$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22$$

$$\log \varepsilon_c = -2.126 \rightarrow \varepsilon_c = 0.0047 \rightarrow$$

$$\delta = 0.0047 \times 4.5 = 0.0214m = 21.4mm$$

همانطور که ملاحظه می شود حداکثر جابه جایی مجاز در این تونل ها ۲۱/۴ میلی متر است که طی مدلسازی در نرم افزار و اجرای مدل در چند مرحله تکرار، حداکثر گام مجاز پیشروی در هر سیکل، ۶ متر به دست می آید. بنابراین در هر مرحله حفاری

رابطه (۱) مقدار لگاریتمی کرنش بحرانی متوسط را نشان می دهد.

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (1)$$

که در آن  $\varepsilon_c$  کرنش بحرانی در حالت مقاومت فشاری تک محوری و  $E$  مدول تغییر شکل پذیری ماده سنگ بر حسب  $\left( \frac{kgf}{cm^2} \right)$  است [۸]. مدول تغییر شکل پذیری ماده سنگ مربوط به سقف تونل ها و کارگاه استخراج ۱/۷۷۸ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

بنابراین با توجه به داده های موجود حداکثر جابه جایی مجاز برای تونل های تهویه و باربری به این ترتیب تعیین خواهد شد:

شکل (۴): کنتور جابه‌جایی قائم تونل های پیشروی (گام پیشروی ۶ متر)

#### ۴-۴-مدلسازی سپرها

به منظور مدلسازی سیستم‌های نگهداری قدرتی کارگاه استخراج، میزان فشار قابل تحمل سپر به صورت نیروی به سمت بالا در نرم‌افزار اعمال شد. همچنین وزن سپر که به کف کارگاه وارد می شود به صورت رو به پایین در نظر گرفته شد. در کارگاه استخراج معدن شماره ۱ طبس، از ۱۴۱ واحد سپر استفاده می‌شود که البته این تعداد برای طول ۲۱۷ متری فعلی کارگاه است. تعداد ۳ عدد از سپرهای انتهایی دو طرف کارگاه به دلیل همجواری با تونل تهویه و باربری از قدرت و ظرفیت بیشتری برخوردار است و مابقی در بین این سپرها قرار دارد. از اینرو مقدار نیروی اعمالی به کارگاه در مدل به صورت یکنواخت نخواهد بود و این نیروها به صورت غیریکنواخت به کارگاه وارد می شود.

#### ۴-۵-مدلسازی تخریب

تاکنون روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی منطقه تخریب در روش استخراج جبهه کار طولانی ارائه شده است. سالامون<sup>۷</sup> روشی بر پایه مدل کرنش سخت منطقه تخریب ارائه کرده است. در این مدل، مدول الاستیک بالک (K) زون تخریب به طور مستمر بر اساس کرنش قائم قسمت همگرای سقف به روز رسانی می‌شود. در روش سالامون، حداکثر همگرایی سقف برابر با ۰.۵٪ سقف در نظر گرفته می شود [۹].

#### • الگوریتم بروزرسانی مدول بالک (K)

برای ایجاد مدل الاستیک دائم در نرم افزار FLAC<sup>3D</sup> نیاز به وارد کردن مدول بالک (K) است که براساس روش سالامون از روابط (۲) تا (۴) بدست می‌آید [۹].

بدین منظور، ابتدا تنش قائم منطقه تخریب از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

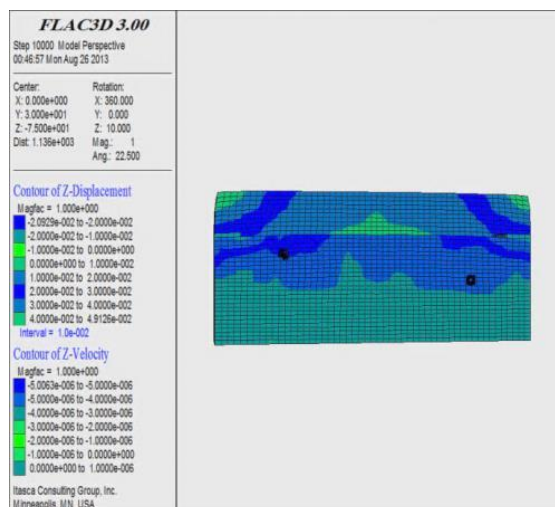
$$\sigma_V = \frac{a \times \varepsilon_V}{b - \varepsilon_V} \quad (2)$$

به اندازه ۶ متر پیشروی به طور همزمان در هر دو تونل انجام می‌شود. پس از حفر اولین مرحله بایستی مقادیر جابجایی ها در ۳ جهت بررسی شود. شکل (۴) تعیین گام پیشروی تونل ها را بر اساس جابجایی مجاز نشان می‌دهد.

مراحل تعیین گام پیشروی کارگاه همانند تعیین گام پیشروی تونل های پیشروی است. برای این کار ابتدا با استفاده از روابط ساکورایی میزان حداکثر کرنش مجاز بدست می‌آید و سپس حفاری کارگاه با گام های پیشروی مختلف در مدل اجرا می‌شود و در نهایت گام پیشروی که در آن جابه‌جایی برابر یا نزدیک مقدار مجاز است به عنوان گام پیشروی کارگاه تعیین می شود.

با استفاده از روابط ساکورایی، حداکثر جابه جایی مجاز برای کارگاه استخراج ۱۷/۴ میلی‌متر بدست آمده است که با مدلسازی در نرم افزار، حداکثر گام مجاز پیشروی در هر سیکل ۷ متر حاصل شده است.

معیار ساکورایی به منظور ارزیابی پایداری حفاریات زیرزمینی بدون نیاز به انجام هرگونه تحلیل تنش و در محدوده جابجایی الاستیک توسعه داده شده است و به عنوان یک معیار قابل قبول، تاکنون کاربردهای گسترده‌ای در تحلیل پایداری تونل‌ها، مغارها و معادن زیرزمینی داشته است. در این مطالعه، با توجه به عدم امکان نصب ابزار و سیستم پایش در کارگاه استخراج جبهه‌کار طولانی، از مدل تجربی ساکورایی برای تخمین کرنش بحرانی و حداکثر جابجایی مجاز استفاده شده است.



<sup>7</sup> Salamon

در این رابطه:  $\sigma_V$  تنش قائم منطقه تخریب،  $a$  مدول تغییرشکل منطقه تخریب،  $b$  کرنش حداکثر منطقه تخریب و  $\varepsilon_V$  کرنش قائم بحرانی منطقه تخریب است.

براساس مطالعات اداره معادن ایالات متحده آمریکا (USBM) مقادیر  $a$  و  $b$  به ترتیب برابر  $\frac{3}{5}$  مگاپاسکال و  $\frac{0.5}{1}$  است [۹]. بنابراین رابطه (۲) به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\sigma_V = \frac{3.5 \times \varepsilon_V}{0.5 - \varepsilon_V}$$

برای ایجاد مدل الاستیک دائم در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> نیاز به وارد کردن مدول بالک ( $K$ ) و مدول برشی ( $G$ ) است. رابطه (۳) ارتباط بین تنش قائم، مدول بالک و مدول برشی را نشان می‌دهد.

$$\sigma_V = \left(K + \frac{4G}{3}\right) \times \varepsilon_V \quad (3)$$

با توجه به اینکه،  $G = \frac{3}{4}K$  است، بنابراین رابطه (۳) به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$\sigma_V = 2K \times \varepsilon_V$$

با توجه به روابط (۲) و (۳) مقدار  $K$  از رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$K = \frac{0.5 \times 3.5}{0.5 - \varepsilon_V} = \frac{1.75}{0.5 - \varepsilon_V} \quad (4)$$

مدول بالک بدست آمده از رابطه (۴) باید به طور مرتب به روزرسانی شود، بدین منظور با توجه به تغییرات کرنش منطقه تخریب ( $\Delta\varepsilon_V$ ) باید  $\Delta K$  محاسبه شود، که می‌توان مقدار آن را از رابطه (۵) بدست آورد:

$$\Delta K = \frac{0.25 \times a}{(b - \varepsilon_V)^2} \quad (5)$$

$$= \frac{0.875}{(0.5 - \varepsilon_V)^2}$$

از رابطه (۴) برای بروزرسانی مدول بالک با توجه به کرنش قائم ناشی از همگرایی سقف استفاده می‌شود. مراحل کدنویسی این روش در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> به صورت زیر است [۹]:

۱- تعیین منطقه زون تخریب

۲- تخصیص مدول بالک اولیه برای زون تخریب

۳- اجرای برنامه برای رسیدن به تعادل

۴- بازیابی کرنش منطقه تخریب و محاسبه  $\Delta K$

۵- تکرار مراحل ۲ تا ۴ با استفاده از  $\Delta K$  تا زمانی که همگرایی سقف برابر ۵۰٪ ضخامت زغال شود.

#### ۴-۶- توزیع تنش‌ها در اطراف کارگاه استخراج

برای تعیین توزیع تنش‌ها در اطراف کارگاه استخراج در نرم‌افزار به این ترتیب عمل می‌شود که کارگاه در هر مرحله حفاری، ۷ متر در امتداد طول کارگاه و ۰/۸ متر (معادل عمق برش شیرر) در جهت پیشروی کارگاه حفر می‌شود. سپس نگهدارنده‌های قدرتی که به صورت نیرو در نرم‌افزار مدل شده است به جلو کشیده می‌شود. در ادامه قسمت پشت کارگاه تخریب می‌شود، این روند تا پیشروی کارگاه تا مرکز آن برای طول‌های مختلف ادامه پیدا می‌کند و نقاطی با مختصات مشخص در قسمت تخریب، جلوی سینه کار و در امتداد طول کارگاه برای تعیین تنش‌ها به عنوان نقاط شاهد مشخص می‌شود. در نهایت تاثیر طول کارگاه بر توزیع تنش‌ها در اطراف کارگاه بررسی می‌شود.

با توجه به طول ۲۱۷ متری کارگاه در حال استخراج ( $E_2$ ) در معدن زغال‌سنگ طبس، طول مبنا برای بررسی توزیع تنش‌ها ۲۱۷ متر انتخاب شده است. همچنین با توجه به طول ۷ متری گام پیشروی، طول‌های ۱۹۰، ۲۱۰، ۲۴۵، ۲۷۳ و ۳۰۰ متر به عنوان ضرایبی از گام پیشروی بررسی شده است و نتایج آن در ادامه آورده شده است.

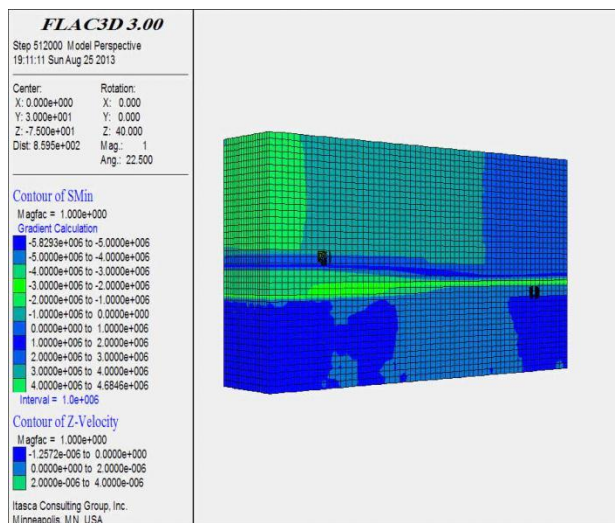
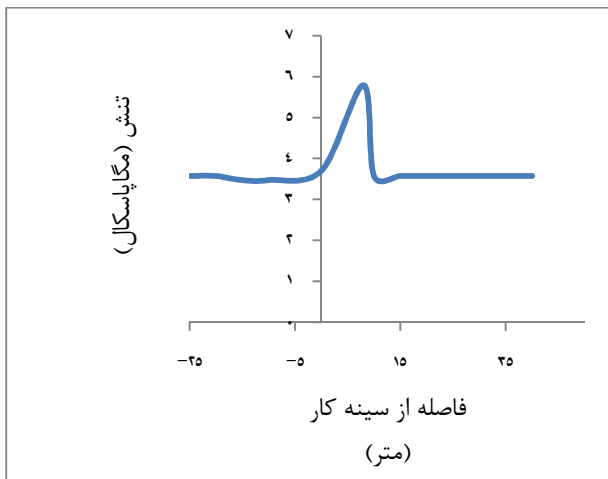
#### ۴-۶-۱- تنش تکیه‌گاهی جلویی

نتایج مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد که حداکثر تنش تکیه‌گاهی جلویی در مرکز طول کارگاه وارد می‌شود. شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب حداکثر تنش تکیه‌گاهی جلویی وارده به مرکز کارگاه با طول ۲۱۷ متر و نمودار تغییرات تنش تکیه‌گاهی جلویی را در جهت پیشروی کارگاه نشان می‌دهند.

همانطور که مشاهده می‌شود، حداکثر تنش تکیه‌گاهی جلویی کارگاه، ۵/۸۲ مگاپاسکال است که در فاصله ۸ متری جلوی سینه‌کار وارد می‌شود.

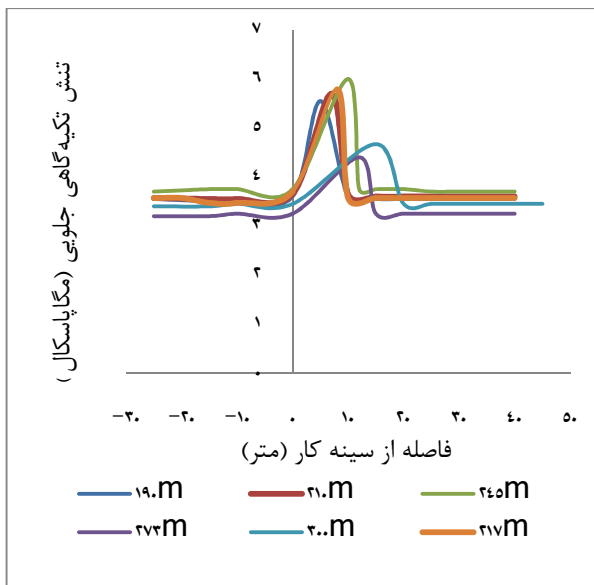


است که با افزایش طول کارگاه، نقطه حداکثر تنش تکیه گاهی جلویی از سینه کار فاصله می گیرد.



شکل (۵): کنتور تنش تکیه گاهی جلویی در مرکز طول کارگاه ۲۱۷ متری

شکل (۶): تغییرات تنش تکیه گاهی جلویی کارگاه (طول ۲۱۷ متر)



شکل (۷): تغییرات تنش تکیه گاهی جلویی برای طول های مختلف

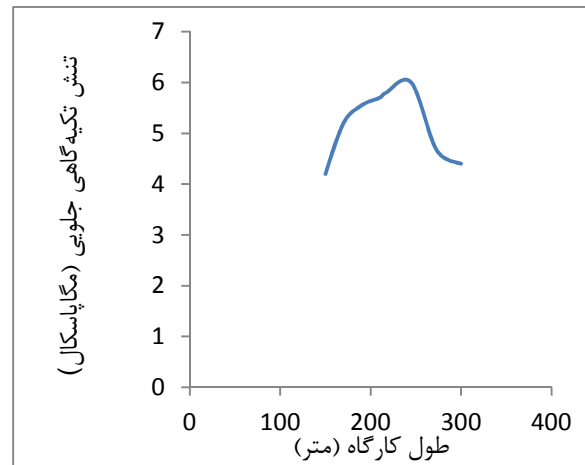
شکل (۷) نمودار تغییرات تنش تکیه گاهی جلویی و فاصله تنش حداکثر تکیه گاهی جلویی از سینه کار را برای طول های ۱۹۰، ۲۱۰، ۲۱۷، ۲۴۵، ۲۷۳ و ۳۰۰ متر و شکل (۸) تغییرات تنش تکیه گاهی جلویی را برای طول های مختلف کارگاه استخراج نشان می دهد. همانطور که از این دو نمودار مشخص است، حداکثر تنش تکیه گاهی جلویی حدود ۶ مگاپاسکال است که برای کارگاه با طول ۲۴۵ متر اتفاق می افتد و برای طول های بیشتر از ۲۴۵ متر تنش تکیه گاهی جلویی روند کاهشی پیدا می کند. دلیل این رفتار غیرخطی را می توان در بروز دو پدیده متعارض دانست که همزمان با افزایش طول کارگاه رخ می دهد. در اثر حفر کارگاه استخراج، طول کارگاه همانند یک تیر دو سرگیردار عمل می کند. در طول های کمتر به علت کوتاه تر بودن این تیر، فشار وارد بر سقف کارگاه استخراج کمتر است و با افزایش طول کارگاه نیز روند افزایشی پیدا می کند. از سوی دیگر هرچه طول کارگاه بیشتر باشد، حجم بیشتری از طبقات سقف در ناحیه تخریب فروریخته و به این ترتیب از شدت تنش های تکیه گاهی در اطراف کارگاه کاسته می شود. این تأثیر دوگانه از طول کارگاه سبب می شود که تنش های تکیه گاهی جلویی به ازای یک طول مشخص از کارگاه به حداکثر مقدار خود برسد. نتایج بدست آمده از مدل سازی نشان می دهد که برای کارگاه شماره ۲ شرقی، این طول مشخص حدود ۲۴۰ متر است. نتیجه دیگری که از دو نمودار شکل های ۷ و ۸ می توان گرفت، این

نتایج مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد که تنش تکیه‌گاهی کناری در دیواره‌های تونل‌های باربری و تهویه بیشترین مقدار را داشته و با فاصله گرفتن از این ورودی‌ها به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب کنترل تنش تکیه‌گاهی کناری را برای طول ۲۱۷ متری کارگاه و نمودار تغییرات تنش تکیه‌گاهی کناری را برای طول‌های ۱۹۰، ۲۱۰، ۲۱۷، ۲۴۵، ۲۷۳ و ۳۰۰ متر نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۹) مشخص است، تنش تکیه‌گاهی کناری کارگاه استخراج برای طول ۲۱۷ متر، ۴/۳ مگاپاسکال است که این مقدار، کمتر از تنش تکیه‌گاهی جلویی است. با توجه به نمودار شکل ۱۰، می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی مقدار تنش تکیه‌گاهی جلویی برای تمام طول‌های بررسی شده بیشتر از تنش تکیه‌گاهی کناری است. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش طول کارگاه، تنش تکیه‌گاهی کاهش می‌یابد و حداکثر تنش تکیه‌گاهی کناری در ورودی‌های ابتدا و انتها رخ می‌دهد.

شکل ۱۱ نمودار مربوط به تغییرات تنش تکیه‌گاهی کناری و موقعیت حداکثر تنش را نسبت به سینه‌کار در مجاورت تونل باربری نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، تنش تکیه‌گاهی کناری در نزدیکی سینه‌کار به حداکثر مقدار خود می‌رسد. البته با توجه به این نمودار می‌توان گفت که در طول‌های کمتر از ۲۱۷ متر، تنش تکیه‌گاهی کناری قبل از رسیدن به سینه‌کار به حداکثر مقدار خود می‌رسد و برای طول‌های بیشتر از ۲۱۷ متر، در چند متری جلوی سینه‌کار به حداکثر مقدار خود می‌رسد.



شکل (۸): نمودار مربوط به رابطه تنش تکیه‌گاهی جلویی با طول کارگاه

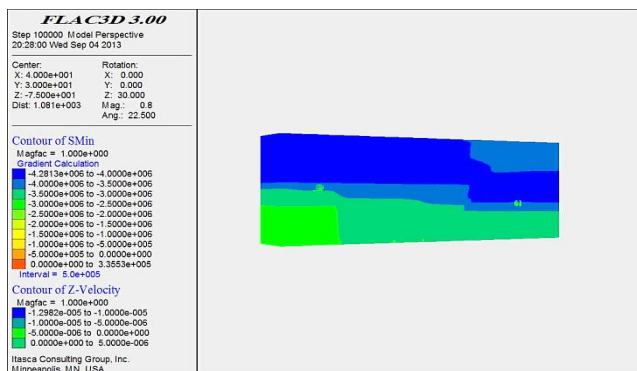
جدول ۳ میزان حداکثر تنش تکیه‌گاهی جلویی وارد بر کارگاه استخراج برای طول‌های ذکر شده و موقعیت آنها را نسبت به سینه‌کار نشان می‌دهد.

جدول ۳- حداکثر تنش تکیه‌گاهی جلویی کارگاه برای طول‌های مختلف و موقعیت تنش حداکثر نسبت به سینه‌کار

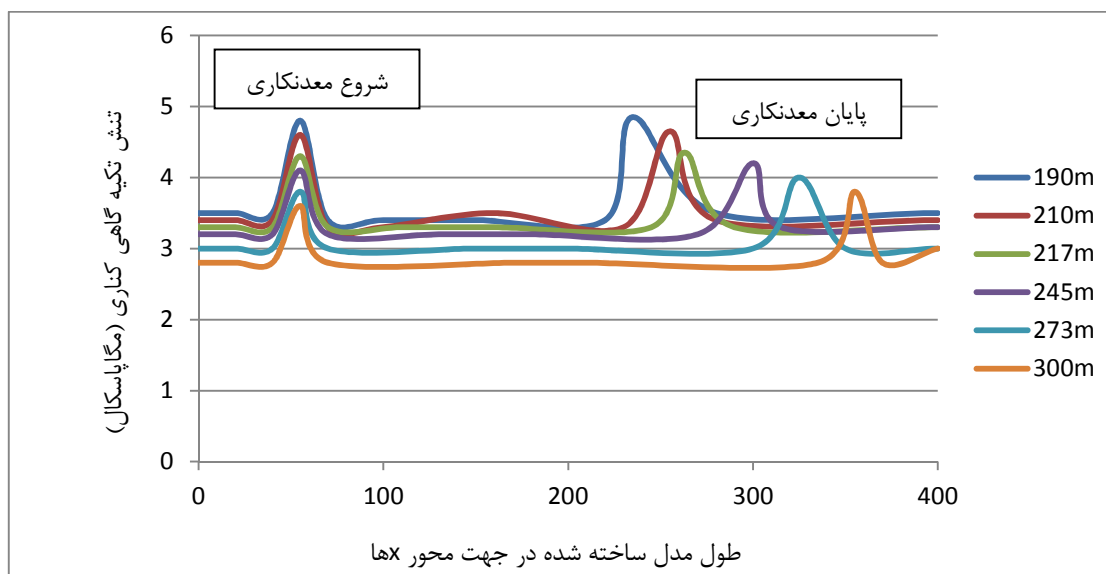
| طول کارگاه استخراج (متر) | تنش قائم حداکثر (مگاپاسکال) | موقعیت تنش حداکثر نسبت به سینه‌کار (متر) |
|--------------------------|-----------------------------|--|
| ۱۹۰                      | ۵/۵۵                        | ۵  |
| ۲۱۰                      | ۵/۷                         | ۷  |
| ۲۱۷                      | ۵/۸۲                        | ۸  |
| ۲۴۵                      | ۶                           | ۱۰                                       |
| ۲۷۳                      | ۴/۶۷                        | ۱۲                                       |
| ۳۰۰                      | ۴/۴                         | ۱۵                                       |

#### ۴-۶-۳ تنش تکیه‌گاهی کناری

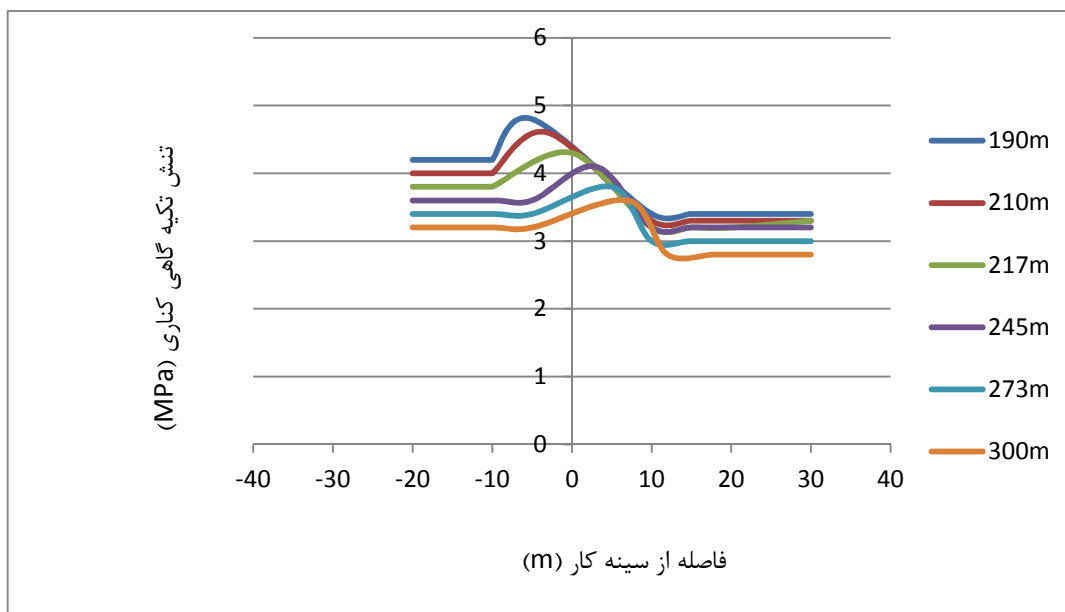
تنش تکیه‌گاهی کناری مانند تنش تکیه‌گاهی جلویی در فاصله‌ای از خط سینه‌کار، در ورودی‌های ابتدا و انتها ایجاد می‌شود. وقتی که فاصله از سینه‌کار کاهش پیدا می‌کند، تنش تکیه‌گاهی کناری به صورت پیوسته شروع به افزایش می‌کند و با فاصله گرفتن از سینه‌کار و در قسمت تخریب، به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از آن تثبیت می‌شود.



شکل (۹): کنترل تنش تکیه‌گاهی کناری کارگاه (طول ۲۱۷ متر)



شکل (۱۰): تغییرات تنش تکیه گاهی کناری برای طول های مختلف کارگاه



شکل (۱۱): تغییرات تنش تکیه گاهی کناری برای طول های مختلف در مجاورت تونل باربری

##### ۵- نتیجه گیری

مکانیزه را شبیه سازی می کند. مدل سازی عددی نشان داد که تغییر تنش های تکیه گاهی جلویی رابطه غیرخطی با افزایش طول کارگاه استخراج دارد. مقدار تنش های تکیه گاهی جلویی با افزایش طول کارگاه از مقدار فعلی آن (۲۱۷ متر) تا ۲۴۵ متر افزایش پیدا کرده است و به حدود ۶ مگاپاسکال رسیده است. برای طول های بیشتر از این مقدار، شدت تنش کاهش پیدا کرده

در این مطالعه، کارگاه استخراج جبهه کار طولانی معدن مکانیزه زغال سنگ طبس به منظور بررسی تاثیر طول کارگاه بر توزیع تنش ها به روش عددی مدل سازی شد. مدل شامل یک پانل و دو تونل باربری و تهویه است و فرآیند استخراج جبهه کار طولانی

- mining under supercritical longwall panels*", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 61, 306–320.
- [5] Rui-lin, Z; Zhi-jun, W; Jian-wei,C; 2012; "*Experimental research on the variational characteristics of vertical stress of soft coal seam in front of mining face*", Safety Science, 50, 723–727.
- [6] "*Tabas Coal Mine Project Basic Design Report-Mining*", Vol 1 of 5, 2005.
- [7] Sakurai, S. 1981. "Direct strain evaluation technique in construction of underground openings", In Proc. 22<sup>nd</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics, Cambridge, MA, pp. 278–282.
- [8] Sakurai, S; 1997; "*Lessons Learned from Field Measurements in Tunneling*", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 12, N0. 4, pp. 453-460.
- [9] Jeremic, M. L; 1985; "*Strata Mechanic in Coal Mining*", A.A balkema Publication.

است و به طور کلی برای طول‌های بررسی شده، حداکثر تنش تکیه‌گاهی جلویی بین ۱/۵ تا ۱/۸ برابر تنش اولیه بوده است. همچنین مدل‌سازی‌ها نشان داد که حداکثر تنش تکیه‌گاهی جلویی کارگاه در فاصله ۵ تا ۱۵ متری از سینه کار اتفاق می‌افتد و با افزایش طول کارگاه این فاصله افزایش پیدا می‌کند. بررسی تأثیر طول کارگاه استخراج بر روی تنش تکیه‌گاهی کناری نشان داد که شدت این تنش‌ها با افزایش طول کارگاه، کاهش می‌یابد و به طور کلی برای طول‌های یکسان از کارگاه استخراج، مقدار تنش تکیه‌گاهی جلویی بیشتر از تنش تکیه‌گاهی کناری است. همچنین نتایج نشان داد که حداکثر تنش تکیه‌گاهی کناری برای طول‌های بررسی شده بین ۱/۲ تا ۱/۵ برابر تنش اولیه است.

بایستی توجه داشت که در طراحی کارگاه استخراج جبهه کار طولانی عواملی دیگری غیر از شرایط تنش‌های اطراف کارگاه مثل عوامل زمین‌شناسی ساختمانی، شرایط اقتصادی و مدیریت کارگاه نقش دارد که لازم است در تعیین طول بهینه کارگاه استخراج در نظر گرفته شود.

## مراجع

- [1] Yang, W; Lin, B; 2011; "*Stress evolution with time and space during mining of a coal seam*", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 48, 1145–1152.
- [2] Kelly, M; Luo, X; Craig, S; 2002; "*Integrating tools for longwall geomechanics*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 39, 661–676.
- [3] Shabanimashcool, M; C.Li ,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.
- [4] Suchowska, A.M; Merifield, R.S; Carter, J.P; 2013; "*Vertical stress changes in multi-seam*