

## تحلیل عددی توزیع فشار و جابجایی در کارگاه استخراج جبهه کار بلند شیبدار زغال سنگ

سید احمد ابوالقاسمی فر<sup>۱\*</sup>، محمد عطایی<sup>۲</sup>، سید رحمان ترابی<sup>۳</sup>، مجید نیکخواه<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری معدن-استخراج، دانشگاه صنعتی شاهرود، Saaf1347@Gmail.com

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، Ataei@Shahroodut.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، Torabi@Shahroodut.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، M.Nikkhah@Shahroodut.ac.ir

(دریافت ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۷، پذیرش ۳۰ خرداد ۱۳۹۷)

### چکیده

توزیع تنش‌ها و روش‌های تخمین فاصله تعادلی تنش برجا در منطقه تخریب کارگاه استخراج همواره یکی از مباحث چالش برانگیز به لحاظ غیرقابل دسترس بودن این منطقه بوده است. در هنگام استخراج پهنه‌های زغالی به روش جبهه کار بلند، طبقات روباره با شدت متفاوت از سقف بلافصل به سمت سطح زمین تحت تاثیر قرار می‌گیرند. بسته به ویژگی‌های سنگ، ضخامت منطقه تخریب و نوع و ماهیت طبقات، سقف بلافصل در پشت جبهه کار تا فاصله‌ای دچار فرو ریزش می‌شود. تلاش‌های گسترده‌ای برای توجیه وضعیت تنش‌ها و جابه‌جایی منطقه تخریب و منطقه شکست در لایه‌های افقی زغالسنگ صورت گرفته اما تا کنون تحقیقات بسیار اندکی راجع به لایه‌های شیب دار گزارش شده است. در پژوهش حاضر به تخمین بازتوزیع تنش‌ها و فاصله بازگشت تنش برجا، جابه‌جایی‌ها و شکل سقف بلافصل در فضای تخریب پهنه جبهه کار بلند شیب دار با شیب حدوداً ۴۳ درجه به روش تفاضل محدود پرداخته شده و نتایج با نوشتار تحقیقاتی موجود مقایسه شده است. بطور کلی الگوی بازتوزیع تنش‌ها و جابجایی‌ها با کارهای تحقیقاتی موجود مطابقت دارد. فاصله تعادلی تنش برجا ۱۹۸ متر از مدل عددی حاصل شد که مطابقت نزدیکی با نوشتار تحقیقاتی موجود را نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی سیستم نگهداری از معیار جابجایی بحرانی و کرنش برشی ساکورایی برای فضاهای زیرزمینی در ناحیه کارگاه و تونل‌های پیشروی استفاده شد و نگهداری بخش پایینی کارگاه و تونل ترابری حائز اهمیت تشخیص داده شد.

### کلمات کلیدی:

جبهه کار بلند، مدل عددی، لایه شیب دار، توزیع تنش، زون تخریب، کرنش بحرانی

## ۱- مقدمه

استخراج از لایه‌های زغالسنگ با شیب متوسط و تند و بررسی - های امکان سنجی جبهه کارهای مایل بواسطه کاهش منابع زغالسنگ ضرورت دارد. گسیختگی در لایه‌های زغال با شیب تند در مقایسه با لایه‌های شیب ملایم بدلیل پیچیدگی شرایط و عدم مطالعات تئوریک کافی در ابهام است. تا به امروز تلاش‌هایی برای درک جامع از وضعیت تنش و تغییرشکل کارگاه جبهه کار بلند صورت گرفته است. رفتارنگاری برجای تنش و جابجایی در فضای تخریب و سقف بلافصل بواسطه عدم دسترسی همواره مشکل بوده است. لذا نوشتار محققین در گذشته فرض‌هایی را مطرح کرده است که بیشتر بر مبنای روش غیرمستقیم مدل سازی و یا تحلیلی استوار بوده و اندازه گیری میدانی به ندرت انجام شده است. توزیع تنش‌ها در ناحیه تخریب و فاصله تعادلی تنش برجا در کارگاه افقی به تفصیل توسط یاووز (Yavuz, 2004) بررسی شده است. یاووز رابطه تنش- کرنش سنگ‌های تخریبی را با پارامترهای موثر آن یعنی عمق کارگاه، ضخامت لایه، فاکتور تورم و مقاومت سنگ مطالعه و براساس بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی قبلی روابطی را در این زمینه ارائه نمود و سپس با ارائه یک مدل عددی مورد اعتبارسنجی قرار داد. وانگ و همکاران (Wang et al, 2017) با مرور کارهای تحقیقاتی قبلی، مدلی تحلیلی براساس مشخصه‌های تنش-کرنش سنگ تخریبی برای فاصله تثبیت تنش برجا و به فرم لگاریتمی ارائه نمودند که با مدل آزمایشگاهی آنها مورد تایید قرار گرفت. دانگ فنگ و همکاران (Dongfeng et al., 2017) رفتار طبقات در معدنکاری جبهه کار بلند تخریب طبقات فوقانی در یک لایه زغالی شیب دار و ضخامت بالا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تغییرات فشار طبقات در راستای امتدادی چندان قابل توجه نیست در حالی که از پایین به بالا در راستای شیبی فشار نگهداری ثبت شده روند افزایشی دارد. رضایی (Rezaei, 2018) مدل تحلیلی بلند مدت را برای تحلیل پایداری زون تنش زدایی در بالای پهنه استخراج شده جبهه کار بلند ارائه و براساس نتایج آنالیز

حساسیت، تاثیرگذارترین پارامترها را شناسایی کرد. یوها و شوکان (Yuehua and Shouqan, 2014) با استفاده از مدل عددی وضعیت تنش‌ها و جابجایی را اطراف کارگاه جبهه کار بلند شیب دار بررسی کردند. آنان دریافتند که رفتار حرکتی سقف کارگاه شیب دار با انواع افقی آن کاملاً متفاوت است و فشار نگهداری در پایین کارگاه ممکن است سبب تخریب جدی و جدایش سقف بلافصل شود. تنش قائم در توده سنگ در دیواره‌های تونل‌ها متمرکز بوده در حالی که نواحی کاهش یافته تنش واضحی در پیرامون آن رویت شده است. با پیشروی جبهه کار، بیشترین تنش‌های افقی و قائم در اطراف تونل باربری بوده که به ترتیب افزایش حدوداً ۶ و ۹ درصدی را نشان داده است. همچنین نتایج بیانگر افزایش ۵ MPa تنش قائم از بالا به پایین کارگاه استخراج است. بای و الزورث (Bai and Elsworth, 1990) روابط تجربی را به هدف تعیین وسعت زون تخریب و شکسته در شرایط معدنکاری شیب دار پیشنهاد نمودند. زنیو و همکاران (Zhenyu et al, 2016) تحقیقاتی را بر روی ارتفاع زون تخریب و شکست با ترکیبی از روش عددی تفاضل محدود و فرمول‌های تجربی ارائه کردند. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2017) راهروها بعد از پیشروی در شرایط مختلف سقف را بررسی کردند. مرور نوشتار موجود نشان می‌دهد که کارهای تحقیقاتی اندکی پیرامون کارگاه جبهه کار بلند شیب دار منتشر شده است. با استفاده از تحلیل‌های تئوری و بهره گیری از تجربیات میدانی در مطالعه حاضر به شبیه سازی عددی فرآیند معدنکاری در جبهه کار بلند شیب دار K12 البرز شرقی اقدام شده است. مطالعه حاضر، تنش‌ها و فرآیند تغییرشکل طبقات سقف را تحلیل و به بررسی نواحی بحرانی می‌پردازد.

## ۲- شرایط زمین شناسی

دنباله سلسله جبال البرز در منطقه شاهرود- دامغان سازند شمشک با گسترش حدود ۴۰ Km با تناوبی از لایه‌های ذغالی- ماسه سنگ - سیلت استون و شیل می‌باشد. این ناحیه مربوطه به دوران دوم از دوره‌های تریاس بالایی تا ژوراسیک میانی است. ضخامت لایه‌های این ناحیه بین ۱۵۰-۱۵ سانتی متر و

اندازه، دانه بندی و نظم هندسی خرده سنگ‌ها کاهش می‌یابد. (Kenny, 1969) سنگ‌های سخت تر و قوی تر به دلیل تشکیل خرده سنگ‌های بزرگتر منتج به فاکتور تورم کمتری می‌شود. تراکم اولیه مواد حجیم در مرحله بارگذاری اولیه بیشتر خواهد بود. افزایش بارسبب تراکم بیشتر و در نتیجه مواد سخت تر و مدول الاستیک آنها افزایش می‌یابد. سالامون (Salamon, 1990) با ارائه معادلات تراکم در فشار بی نهایت و در نظر گرفتن مشخصه‌های سنگ‌های تخریبی معادله زیر را برای توصیف رفتار تنش- کرنش منطقه تخریب ارائه داد:

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon/\varepsilon_m} \quad (1)$$

که در آن  $\sigma$  و  $\varepsilon$  بترتیب تنش اعمالی بر روی مواد و کرنش متناظر تحت تنش اعمالی و  $\varepsilon_m$  و  $E_0$  بیشینه کرنش احتمالی سنگ‌های تخریبی و مدول تانژانت اولیه هستند.

تعیین دو پارامتر  $\varepsilon_m$  و  $E_0$  در توصیف منحنی کامل تنش-کرنش برای سنگ‌های تخریبی خاص سایت ضروریست.  $\varepsilon_m$  صرفاً به فاکتور تورم اولیه  $b$  بستگی داشته و از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\varepsilon_m = \frac{b-1}{b} \quad (2)$$

مدول تانژانت اولیه  $E_0$  قویاً به فاکتور تورم و مقاومت خرده سنگ‌ها بستگی دارد. تعیین مقدار برجای این پارامتر برای مقاومت‌ها و فاکتور تورم‌های مختلف مشکل بوده اما این مقدار از تست فشاری مدل آزمایشگاهی سنگ‌های تخریبی قابل تخمین است. با استفاده از منحنی‌های تنش-کرنش برای انواع مختلف سنگ بدست آمده توسط پاپاس و مارک (Pappas and Mark, 1993) در مطالعه حاضر استفاده شده است. در نتیجه تحلیل برازش سه بعدی، بهترین منحنی برازش شده بر داده‌ها را می‌توان بصورت معادله زیر ارائه کرد:

$$E_0 = \frac{10.39 \sigma_c^{1.042}}{b^{7.7}} \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $b$  فاکتور تورم سنگ‌های تخریبی،  $\sigma_c$  مقاومت فشاری خرده سنگ هاست. بر طبق این معادله افزایش مقاومت

شیب لایه‌ها از شرق به غرب از ۲۵-۶۰ درجه متغیر است. گسترده ترین لایه‌های ذغالی این منطقه، لایه‌های k19, k23 و p10 است و لایه p10 حدود ۵۰ درصد ذخایر این منطقه را در بر می‌گیرد. بخش مورد نظر در مطالعه حاضر در عمق تقریبی ۴۱۰ تا ۴۸۰ متر در حد فاصل افق‌های ۲۱۷۵ و ۲۲۴۰ واقع است. جبهه کار K12 به عرض ۹۶ متر، ضخامت متوسط لایه زغال در حدود ۰/۸۶ متر و زاویه شیب ۴۳ درجه می‌باشد که در رده لایه‌هایی با شیب متوسط قرار می‌گیرد. لایه بندی در همین راستا بوده و درزه تاثیرگذاری مشاهده نمی‌شود. به لحاظ شیب تند لایه ها، عملیات معدنکاری به روش جبهه کار بلند غیرمکانیزه انجام می‌شود. طبقات کمر بالا و پایین متشکل از ماسه سنگ با کیفیت نسبتاً متوسط و کمی عدسی‌های پراکنده زغال است. بین لایه K12 تا لایه قابل استخراج بعدی یعنی K19 تعداد ۷ لایه زغال با ضخامت از ۱۴ تا ۳۵ سانتیمتر قرار دارد. لایه دارای ساختمان پیچیده و چند شعبه‌ای و در بعضی از نقاط چهار شعبه‌ای بوده که جنس لایه‌های مجزا کننده زغال بیشتر از آرژیلیت و آرژیلیت زغالی تشکیل شده است که ضخامتی تا ۳۹ سانتیمتر را دارا هستند. قسمت شرقی منطقه دارای زغال قابل استخراج بوده و لایه دارای ضخامت کمتری است (گزارش اکتشافات البرز شرقی، ۱۳۴۸).

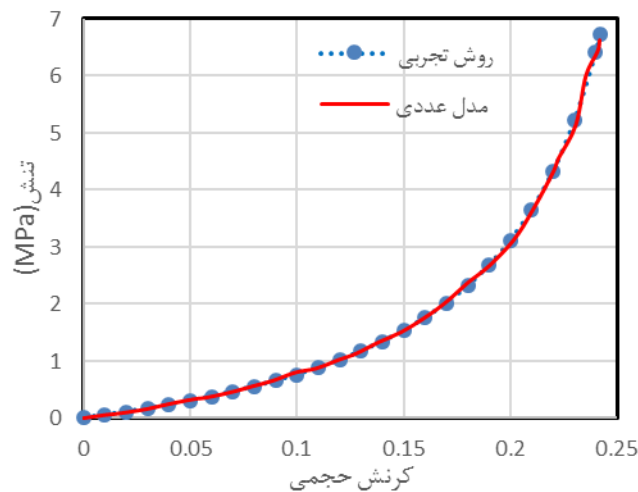
### ۳- رفتار تنش-کرنش ناحیه تخریب

در روش معدنکاری جبهه کار بلند به طبقات پشت جبهه کار استخراج و به طبقات فوقانی اجازه فروریزش داده می‌شود. با پیشروی کافی جبهه کار در فاصله‌ای بسته به شرایط زمین شناسی دچار فروریزش کامل می‌شود. نواحی آشفته در بالای یک پهنه حفر شده در واکنش به معدنکاری جبهه کار بلند به سه منطقه تخریب، شکسته و تغییرشکل پیوسته بترتیب صعودی از خط سقف تقسیم می‌شود. فاکتور تورم مواد ریزشی، ارتفاع منطقه تخریب را تعیین می‌کند. هنگامی که مواد تخریب تحت تنش قرار می‌گیرد دو پارامتر اصلی فاکتور تورم اولیه و مقاومت خرده‌های سنگ، فرآیند تراکم را کنترل می‌کند. گزارش‌های منتشر شده نشان می‌دهد که فاکتور تورم با افزایش

#### ۴-مدل عددی

در مطالعه حاضر تحلیل توزیع تنش‌ها پیرامون لایه زغالی شیب دار و بررسی رفتار آن ایجاب می‌نماید که از شبیه سازی عددی سه بعدی استفاده شود. در همین زمینه نرم افزار تفاضل محدود FLAC3D در نوشتار متعددی از جمله کار تحقیقاتی یوهوا و شوکان (Yuehua and Shoquan, 2014) استفاده شده است. در این نرم افزار امکان اعمال ۱۱ نوع مدل ساختاری مواد را فراهم می‌نماید. این نرم افزار حرفه‌ای امکان شبیه سازی غیرخطی جابجایی طبقات سقف کارگاه در شرایط لیتولوژی متفاوت در طی و بعد از عملیات استخراج را امکان پذیر می‌سازد. مطابق شکل ۲ ابعاد مدل  $88 \times 107$  متر بوده و در جهت طولی ۲۵۰ متر گسترش دارد.

تکه‌های سنگی و یا کاهش فاکتور تورم به افزایش قابل توجه مدول تانژانتی مواد تخریبی منجر می‌شود. پارامترهای ناحیه تخریب مورد استفاده در مطالعه حاضر در جدول ۱ برگرفته از مدل عددی یاووز (Yavuz, 2004) می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌شود پارامترهای مقاومتی بسیار ضعیف همراه با مدول حجمی بالا از مشخصه‌های اصلی این ناحیه است. پارامترهای mul و cptable به ترتیب ضریب خط باربرداری و رابطه فشار- کرنش حجمی (شکل ۱) است. روش دیگر مدل سازی منطقه تخریب اینست که با افزایش کرنش، مدول حجمی منطقه تخریب هم سو با افزایش فاصله جبهه کار از مواد تخریب شده افزایش می‌یابد. این روش را روش بروزسانی مدول حجمی می‌نامند. در این روش حداکثر همگرایی منطقه تخریب برابر با نصف ارتفاع لایه استخراجی است (Salamon, 1990).



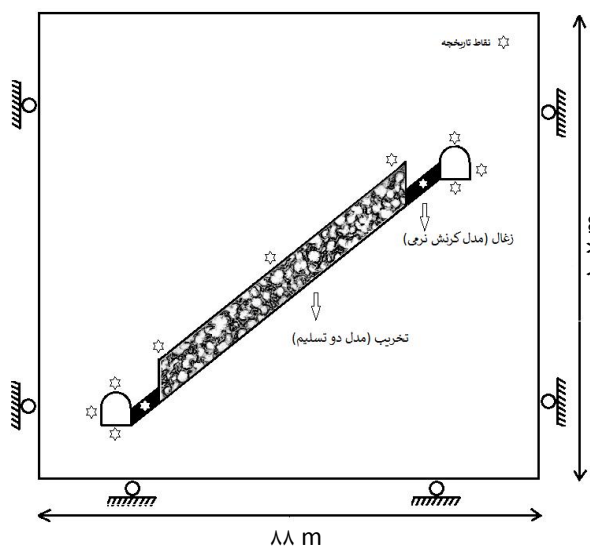
شکل ۱- نتایج آزمون مقاومت فشاری در نرم افزار FLAC3D بر روی سنگ‌های منطقه تخریب و مقایسه با نتایج متناظر از فرمول تجربی

جدول ۱- پارامترهای مقاومتی ناحیه تخریب

cptable	mul	مدول بالک (GPa)	مدول برشی (GPa)	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )
شکل ۱	۱۰	۱۳/۸۸۸	۰/۱۵	۱۷۰۰
	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	مقاومت کششی (MPa)	مدل
	۰/۰۰۱	۵	۰/۰	Doubleyield

تنش‌های برجا به مدل تخصیص داده شد و فشار روباره بصورت توزیع شده در سطح اعمال شد. پیش از حفاری، شرایط تعادل

شرایط مرز ثابت در طرفین و کف مدل اعمال شد و نیز فاصله‌های جانبی به لحاظ شعاع تاثیر تونل‌ها رعایت شده است.



شکل ۲ نمای مدل عددی مورد استفاده در مطالعه حاضر

به مقادیر حال از تست سه محوره یک تحلیل برآزش خطی صورت گرفته و مقادیر مجهول حاصل می‌شوند. معیار شکست هوک- براون یک فرمولاسیون تجربی برای تخمین رابطه مقاومت محصور کننده یک توده سنگ است. شکل غیرخطی، آن را از معیار شکست خطی موهر-کلمب متمایز می‌سازد. این معیار در اصل براساس تجربیات شکست شکننده در سنگ سخت پدید آمده و با پذیرش این مطلب که شکست توده سنگ با درزه داری کنترل شده اما هیچ جهت شکست ترجیحی ندارد توسعه داده شد (Hoek and Brown, 1980) یعنی توده سنگ بعنوان یک محیط پیوسته معادل، عکس العمل نشان می‌دهد. نشان داده شده است که این معیار برای انواع مختلف سنگ تحت گستره زیادی از تنش محصور کننده کاربرد دارد (Eberhardt, 2012). با وجود سازگاری اغلب توده سنگ‌ها با معیار هوک-براون، محاسبات طراحی ژئوتکنیکی معمولاً براساس معیار تئوری موهر-کلمب انجام می‌شود چرا که پارامترهای آن ساده تر و معنی فیزیکی چسبندگی و اصطکاک قابل درک تر است. نتایج ۸ مقدار آزمون سه محوره در شکل ۳ نشان داده شده است. مقادیر ضریب همبستگی بدست آمده از برآزش داده‌ها سازگاری بیشتر رفتار توده سنگ در مطالعه حاضر با معیار هوک-براون را نشان می‌دهد. در مطالعه حاضر به سبب فشار مضاعفی که در حین

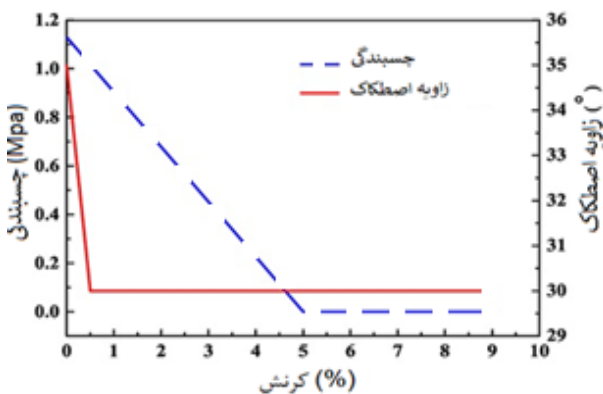
در مدل بررسی و از صحت آنها اطمینان حاصل شد. بمنظور شبیه سازی شرایط واقعی فرآیند استخراج از مدل‌های کرنش نرمی و دو تسلیم بترتیب برای لایه زغالی و فضای تخریب استفاده شده است. به جهت مقایسه از مدل‌های الاستیک، موهرکلمب و هوک براون برای توده سنگ استفاده شده است. فرآیند پیشروی برطبق شرایط جبهه کار بلند K12 و بصورت مرحله‌ای با گام‌های حفاری یک متر مدل شد سپس سیستم نگهداری چوبی و قاب فلزی در کارگاه و تونل‌ها نصب شد. فاصله پیشروی ایمن کارگاه براساس آنچه که به لحاظ تجربه در کارگاه K12 متداول است ۶ متر و مدل تخریب بعد از این فاصله تا ارتفاع سقف بلافاصل اعمال شد. پارامترهای مقاومتی توده سنگ کمربالا و پایین مشابه بوده و در جدول ۲ آورده شده است. نمودار شکل ۱ نتایج تست مقاومت فشاری انجام شده در مدل FLAC بر روی یک بلوک سنگی با مشخصات سنگ فضای تخریب (جدول ۱) است که با فرمول تجربی (۱) مطابقت کامل دارد.

برای اندازه گیری خواص مقاومتی توده سنگ انجام تست‌های مکانیک سنگ ضرورت دارد. پایداری تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی پروژه‌های معدنی از جنبه‌های بسیاری حائز اهمیت است. برای برآورد پارامترهای معیارهای شکست معمول، آزمون مقاومت فشاری سه محوره، به روش پیشنهادی هوک-براون انجام می‌شود.

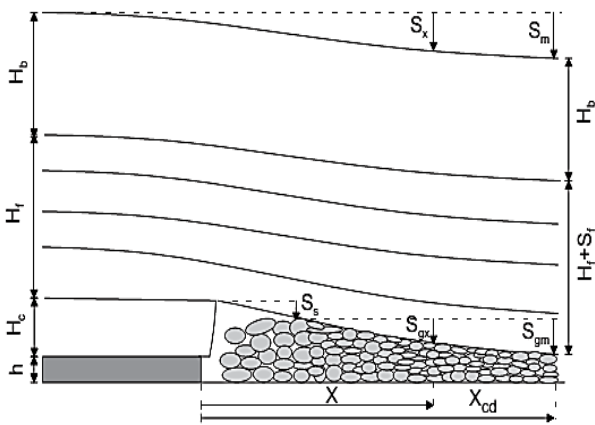
جدول ۲- پارامترهای مکانیکی توده سنگ و زغالسنگ

زغالسنگ	ماسه سنگ	
۱۶۰۰	۲۶۷۰	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )
۱/۱	۵/۲۵	مدول بالک (GPa)
۰/۷	۲/۷	مدول برشی (GPa)
-	۴۸/۶	مقاومت تک محوره (MPa)
-	۶/۹	مدول یانگ (GPa)
۳۵	۳۲/۶	زاویه اصطکاک (°)
۱/۱۳	۱/۳	چسبندگی (MPa)
۰/۰۱	۰/۱۸	مقاومت کششی (MPa)

آمده است. سیستم نگهداری در کارگاه جبهه کار بلند متشکل از ستون، لارده و جرزبندی و در تونل‌ها از قاب فلزی به عرض ۳ متر و شعاع قوس ۱/۵ متر استفاده شده است. مشخصات فنی در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۴- تغییرات چسبندگی و اصطکاک با کرنش پلاستیک اعمال شده در مطالعه حاضر (Zhao et al, 2014)

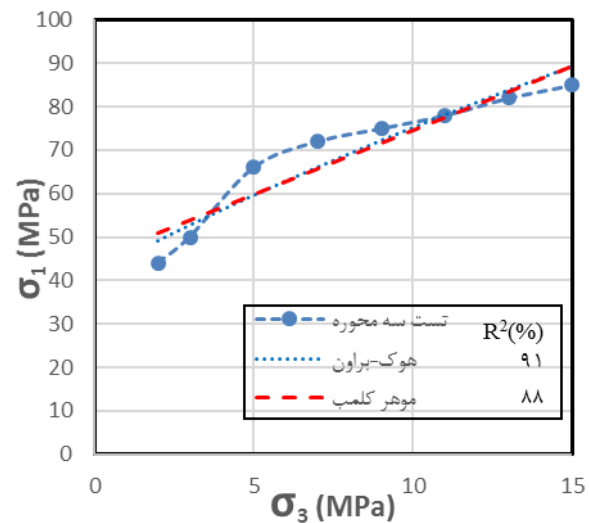


شکل ۵- تغییر شکل زمین در حین پیشروی کارگاه استخراج (Yavuz, 2004)

جدول ۳- مشخصات سیستم نگهداری تونل‌ها و کارگاه مورد استفاده در این مطالعه

سیستم نگهداری	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون	سطح مقطع (cm <sup>2</sup> )	ممان اینرسی E-7 (m <sup>4</sup> )	ممان قطبی E-7 (m <sup>4</sup> ) × 10 <sup>-7</sup>	وزن (Kg/m)
قاب فلزی V25	۲۰۰	۰/۲۵	۳۱/۷۹	۴۰/۱	۸۰/۲	۲۴/۹۵
جرز و ستون چوبی	۰/۰۲	۰/۲۹	۵۷۲	۲۶۰۸	۵۲۱۷	-

پیشروی بر روی پایه‌های زغالی دو طرف کارگاه اعمال میشود مدل کرنش نرمی به منظور مدل سازی لایه زغالی در نظر گرفته شد. این نوع مدل، رفتار بعد از شکست احتمالی را به گونه واقعی تری ارائه می‌نماید.



شکل ۳- نتایج تست سه محوره بر روی ماسه سنگ کمر بالای لایه زغالی K12

در این مدل، چسبندگی، اصطکاک، اتساع و مقاومت کششی با شروع تسلیم پلاستیک و طبق یک تابع خطی تکه‌ای تعریف شده توسط کاربر همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده می‌تواند تغییر کند. برای مواد شکننده مانند زغال، مقاومت و مکانیسم شکست وابسته به نرخ کرنش بوده و افزایش این پارامتر مقاومت را افزایش می‌دهد. اندیس مقاومت زغال نرخ کرنش-تابع (n) یک پارامتر دینامیک در نرخ کرنش‌های  $10^{-1}$  تا  $10^{-3}$  S<sup>-1</sup> می‌باشد. پارامترهای مکانیکی مورد استفاده در شبیه سازی در جدول ۲

## ۵- تحلیل فاصله تعادلی فشار برجا

برخی محققین ماهیت گسترش سطحی جابجایی زمین برای پهنه‌های زغالی در طی فرآیند تخریبی جبهه کار بلند پرداخته اند. همانگونه که از شکل ۵ استنباط می‌شود این تغییرشکل‌های منتج به نشست در سطح زمین را می‌توان به در سه گروه جا داد: ۱- تغییرشکل مواد تخریبی ۲- شکم دادن یا عبارت دیگر خمش طبقات پایین ترین طبقات تخریب نشده و ۳- گسترش قائم زون شکسته... تغییرشکل مواد تخریبی در فاصله فشار روباره بصورت

$$S_{gm} = S_m + S_f + S_s \quad (4)$$

می‌باشد که  $S_{gm}$  تغییرشکل مواد تخریبی در فاصله فشار روباره  $S_m$  نشست سطحی در فاصله  $X_{cd}$ ،  $S_f$  گسترش قائم ناحیه شکسته و  $S_s$  خمش پایین ترین طبقه تخریب نشده است. نشست در فاصله فشار روباره پس از بررسی‌های تحلیلی بصورت زیر حاصل شده است (Yavuz, 2004):

$$S_m = \frac{\gamma H b^{7.7} (hb - 0.05 h^{1.2})}{10.39 \sigma_c^{1.042} (b - 1) + \gamma H b^{7.7}} - \frac{0.4 h}{c_2 + c_4} + 0.05 h^{1.2} \quad (5)$$

$$X_{cd} = 0.2 H^{0.9} 6^{S_m/h} \quad (6)$$

در معادلات فوق  $S_m$  نشست نهایی،  $X_{cd}$  فاصله تعادلی تنش برجا،  $h$  ضخامت لایه،  $H$  عمق لایه (شکل ۵)،  $b$  فاکتور تورم،  $c_3$  و  $c_4$  پارامترهای ثابت می‌باشند که از جداول مربوطه تعیین می‌شوند. در صورتی که لایه استخراجی ضخیم نباشد و سنگ‌های تشکیل دهنده سقف اصلی ضعیف باشند می‌توان از گسترش قائم طبقات در ناحیه شکسته و خمش لایه‌ها چشم پوشی کرد. در این مورد نشست سطحی تنها با خواص سنگ تخریبی کنترل می‌شود. معادله دوم از تحلیل بهترین برآزش سه بعدی نمودارهای بدست آمده از لایه‌هایی با ضخامت و فاکتور تورم متنوع بدست آمده است (Yavuz, 2004). بایستی توجه داشت که فاصله فشار روباره با عمق کارگاه و یا فاکتور تورم روند قوی مستقیم دارد. همچنین فاصله فشار روباره قویا

به ضخامت لایه بستگی داشته و با افزایش آن افزایش می‌یابد. با جایگذاری مقادیر جدول ۴ در روابط فوق فاصله فشار برجا ۲۰۰ متر حاصل می‌شود که با نتایج مدل عددی در حدود یک سوم پایینی کارگاه جبهه کار بلند مطابقت دارد (شکل ۱۴)

جدول ۴- مقایسه مسافت پیشروی کارگاه استخراج برای دستیابی به تنش برجا در دو روش

h (m)	H (m)	b	C3	C4	Xcd (m)	
۰/۸۶	۴۵۰	۱/۴۲	۳/۱	۵	۲۰۰	روش تجربی یاووز
۰/۸۶	۴۵۰	۱/۴۲	-	-	۱۹۸	مدل عددی

## ۶- تحلیل جابجایی تونل‌ها و کارگاه

با حفر کارگاه و تونل‌ها مقادیر جابجایی در پشت جبهه کار دچار تغییراتی شده که در نهایت با طی مسافتی از جبهه کار بتدریج متعادل می‌شوند. بمنظور مقایسه میزان جابجایی سقف اصلی کارگاه در بالای سقف بلافصل مشابه آنچه که در مدل یاووز (Yavuz, 2004) بکار رفته است از سه مدل کمک گرفته شده است. در مدل‌های موهرکلمب-دوتسلیم و هوک براون-دوتسلیم از مدل دو تسلیم برای فضای تخریب استفاده شده است. در مدل سالامون از روش بروز رسانی مدول حجمی سالامون (Salamon, 1990) مطابق با افزایش کرنش سقف استفاده شده است. مطابق جدول ۵ نتایج معیار سالامون و هوک-براون به یکدیگر نزدیکتر است گرچه هر سه مقدار، تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند. دلیل این امر ممکن است به همبستگی بیشتر رفتار توده سنگ با معیار هوک-براون مرتبط باشد.

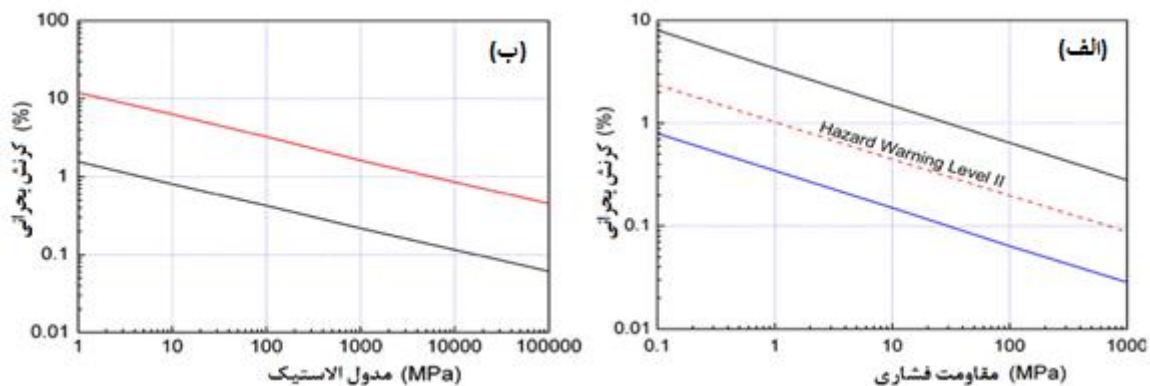
جدول ۵- بیشینه جابجایی نهایی قائم سقف اصلی کارگاه استخراج در سه مدل مختلف

معیار	موهرکلمب/ دوتسلیم	هوک براون/ دوتسلیم	سالامون
بیشینه جابجایی سقف (سانتیمتر)	۴۵	۴۰	۳۹

براساس مفهوم کرنش بحرانی، مقدار مناسبی را می‌توان بعنوان حدآستانه درصد کرنش اختصاص داد. ساکورایی

آمده از حدود بالا و پایین در شکل ۶ و سطح هشدار ۲ را نشان می‌دهد. سطوح هشدار خطر برای ارزیابی کرنش بحرانی و UCS در نمونه‌های آزمایشگاهی و سپس از طریق رفتارنگاری برجای جابجایی تایید شده است.

(Sakurai, 1997) رابطه‌ای بین کرنش بحرانی با مدول یانگ و مقاومت تک محوره UCS ارائه و شکل ۶ را بعنوان محدوده‌های مجاز در این روابط پیشنهاد نمود. ساکورایی نشان داد که نتایج کرنش بحرانی برای توده سنگ برجا نیز در این محدوده خطوط قرار می‌گیرد. جدول ۶ گستره مقادیر کرنش بحرانی بدست



شکل ۶- الف) رابطه کرنش بحرانی و مقاومت فشاری ساکورایی، ب) رابطه کرنش بحرانی و مدول الاستیک ساکورایی برای تونل‌ها (Sakurai, 1997)

جدول ۶- کرنش و کرنش برشی مجاز بر طبق معیار ساکورایی

کرنش برشی بحرانی $\gamma_e (\times 10^{-3})$	کرنش بحرانی $\epsilon_e$			مقدار مجاز
	شکل ۶ ب	شکل ۶ الف	سطح هشدار ۲	
$(1 + \nu) \epsilon_e$	۰/۱۵-۱	۰/۱۷-۱/۵	۰/۷	
۸/۹۶				

را نشان می‌دهد. بیشینه مقادیر جابجایی نهایی در حدود ۱۷/۴ سانتیمتر بوده و در موقعیت مرکز متمایل به نیمه بالایی جبهه کار قرار دارد. که با نتایج مدل یوهوا (Yuehua and Shouquan, 2014) و مشاهدات میدانی کارگاه K12 مطابقت دارد. بالا آمدگی در کف کارگاه چندان قابل توجه نیست و مقادیر عمده آن تقریباً در مرکز کارگاه متمرکز است (شکل ۱۱). مقایسه مقادیر جابجایی کارگاه با مقادیر مجاز معیار ساکورایی نشان می‌دهد که همگرایی کارگاه کمی بیش از حد مجاز است اما در هر صورت مقادیر کرنش برشی از محدوده مجاز تجاوز نمی‌کند (شکل ۱۰).

#### ۷- تحلیل تنش‌ها در کارگاه و تونل‌ها

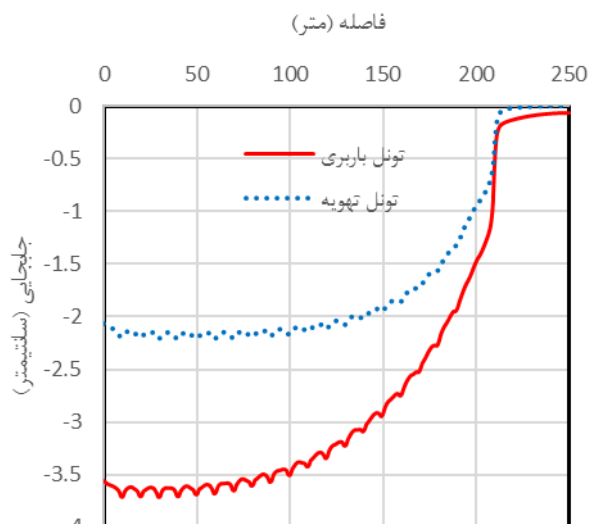
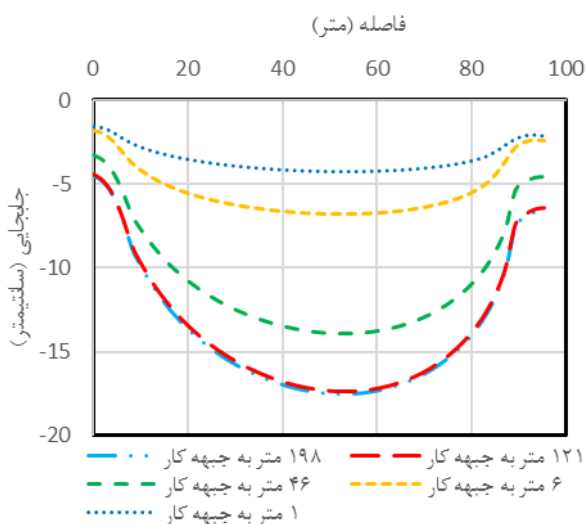
با حفر جبهه کار زغالی تنش‌های اولیه در سنگ‌های اطراف

سطح هشدار خطر ۲ با خط مرکز کرنش بحرانی در مقابل زون محدود کننده UCS مطابقت داشته و معرف تغییر وضعیت تونل به آستانه ناپایداری است. شکل ۷ تغییرات همگرایی قائم تونل‌ها در امتداد طولی را نشان می‌دهد. مطابق انتظار مقادیر جابجایی در تونل ترابری کمی بیشتر است همچنین مقادیر جابجایی در تونل تهویه سریعتر به وضعیت تعادل رسیده است. همینطور مقادیر بالازدگی در هر دو تونل قابل توجه است. مقایسه این مقادیر با مقادیر مجاز مطابق جدول ۷ نشان می‌دهد که جابجایی‌ها در تونل باربری از حد مجاز بیشتر است. لیکن مطابق شکل ۸ مقادیر کرنش برشی در هر دو تونل در محدوده مجاز قرار دارد. شکل ۹ تغییرات جابجایی حقیقی در امتداد پروفیل عرضی در فواصل مختلف از جبهه کار پیشروی



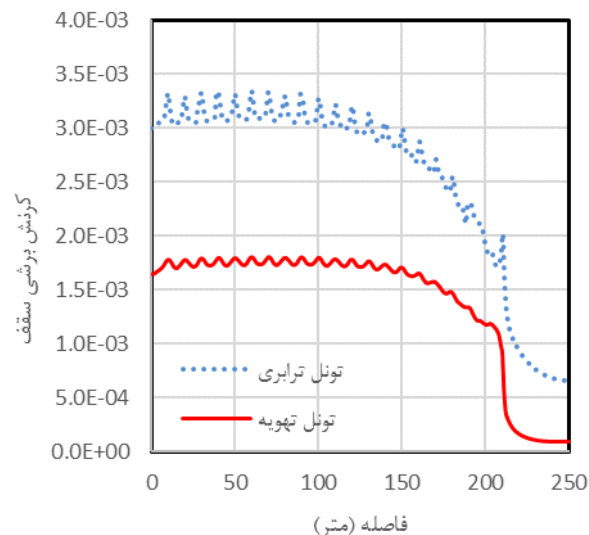
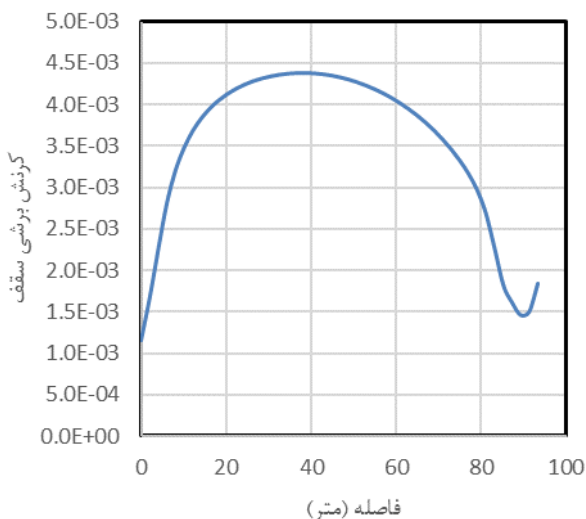
بازتوزیع می‌شوند. فضای آزاد کارگاه موجب آزادسازی تنش‌ها در این ناحیه و انتقال آن به پایه‌ها و تونل‌های طرفین می‌شود.

شکل ۸- کرنش برشی نهایی تاج تونل‌ها بعد از ۲۱۰ متر پیشروی



شکل ۹- تغییرات جابجایی حقیقی سقف کارگاه در امتداد عرضی (کارگاه و تونل‌ها بترتیب در موقعیت ۱۹۸ و ۲۱۰ متری)

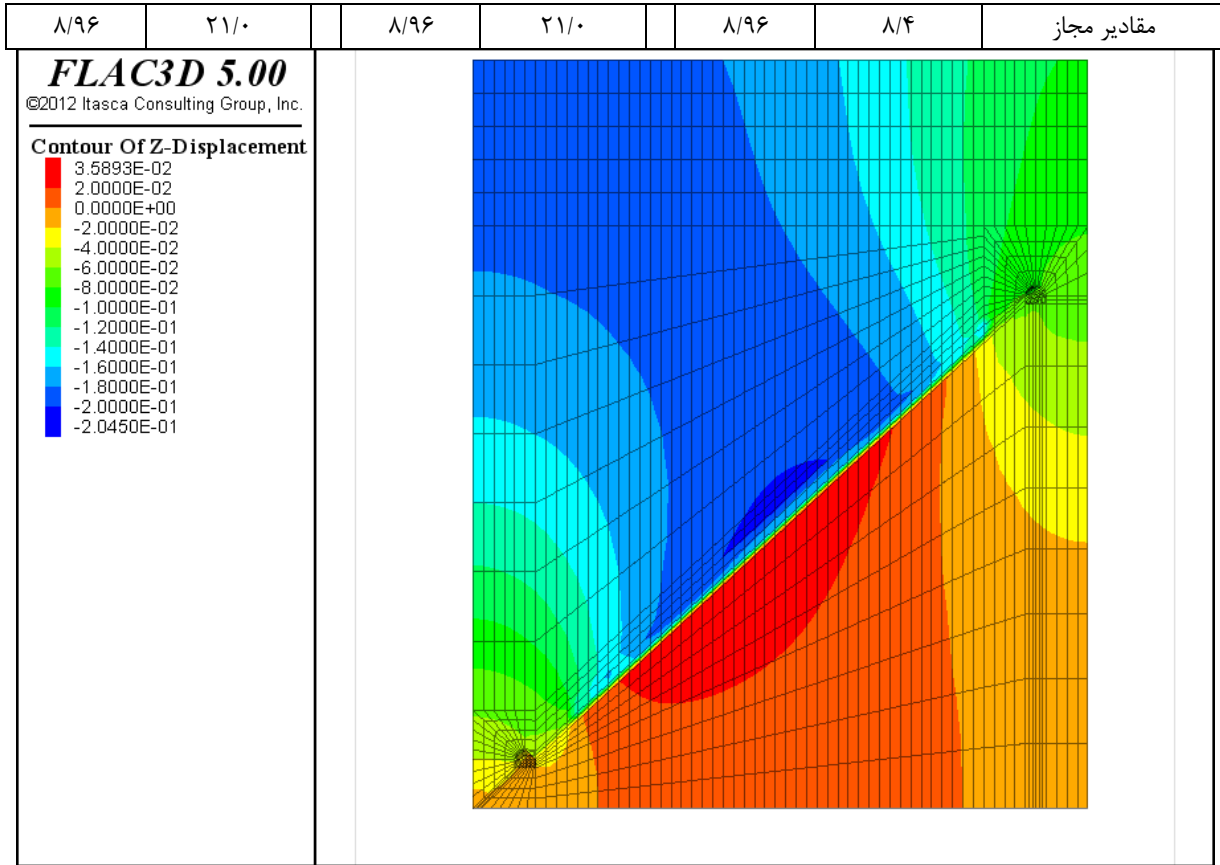
شکل ۷- همگرایی قائم نهایی تونل‌ها بعد از ۲۱۰ متر پیشروی



شکل ۱۰- تغییرات کرنش برشی سقف کارگاه استخراج در راستای عرضی (پیشروی کارگاه ۱۹۸ متر)

جدول ۷- مقادیر همگرایی و کرنش برشی بحرانی تونل‌ها و کارگاه استخراج

تونل تهویه		تونل ترابری		کارگاه		
کرنش برشی	همگرایی (mm)	کرنش برشی	همگرایی (mm)	کرنش برشی	همگرایی (mm)	
۱/۸	۲۰/۳	۳/۲	۳۵/۱	۴/۴	۱۰/۴	قاب V25 و ستون چوبی



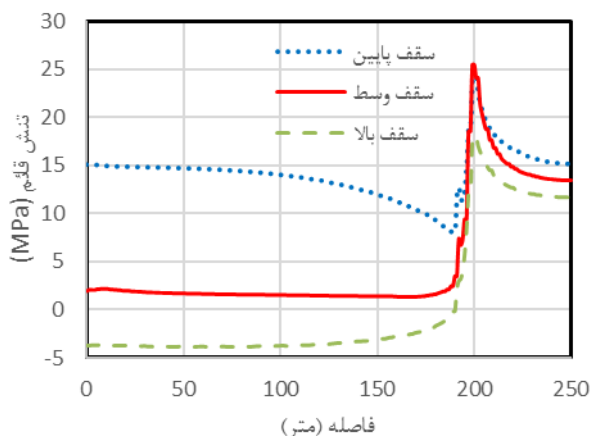
شکل ۱۱- جابجایی قائم نهایی در مدل (کارگاه و تونل‌ها بترتیب در موقعیت ۱۹۸ و ۲۱۰ متری)

م تفاوت است. در ابتدای فرآیند پیشروی، خرده سنگ‌ها در ناحیه تخریب تمایل به سرازیر شدن به سمت پایین و تجمع در این ناحیه دارند پر شدن این ناحیه با سرعت انجام شده و لذا بازایی تنش‌ها با مشکلی مواجه نیست. به منظور مقایسه نتایج حاصله مدل ساخته شده در این مطالعه مدلی با شرایط مشابه با آنچه که یاووز (Yavuz, 2004) پیشنهاد نموده است در نظر گرفته شد و مدل دوتسلیم برای فضای تخریب در اینجا بکار رفته است. مسافت پیشروی برای بازایی تنش برجا مطابق جدول ۴ نتایج کار عددی را تایید می‌نماید اما در نواحی بالاتر به دلایل ذکر شده اخیر بازایی تنش‌ها ممکن است که با تاخیر انجام شود. تغییرات تنش در مدل هوک-براون (شکل ۱۵) کمی بیشتر است و هر سه بخش سقف در پشت جبهه کار روند افزایشی در پیش گرفته اند. طول مدل در این حالت برای

مطابق شکل ۱۲ تنش قائم در محل جبهه کار این تونل با یک خیز و افت ناگهانی مواجه شده و بتدریج به تنش اولیه متمایل می‌شود. در نهایت هر دو تونل تهویه و باربری افزایش تنش حدوداً ۴۰ درصدی را تجربه می‌کنند. این افزایش در دیواره تونل‌ها بمراتب بیشتر است (شکل ۱۳). نتایج در مطابقت کامل با یافته‌های مدل عددی مشابه یوها و شوکان (Yuehua and Shouquan, 2014) است. توجه شود که تثبیت تنش‌ها در تونل تهویه به سبب عمق کمتر آن نیاز به مسافت پیشروی زیادی ندارد.

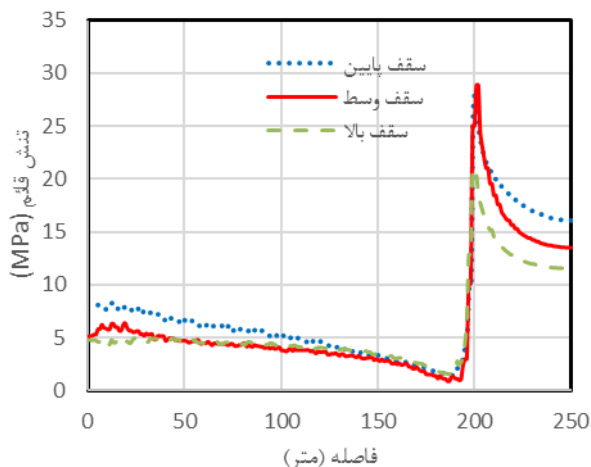
مطابق شکل ۱۴ توزیع تنش‌ها در راستای طول کارگاه مطابق انتظار یک خیز و افت ناگهانی در محدوده جبهه کار پیشروی را نشان می‌دهد که تا ۶۶٪ افزایش موقتی تنش را در این محدوده در پی دارد. لیکن روند عرضی بازتوزیع تنش‌ها در کارگاه استخراج شیب دار با روندهای متداول در کارگاه افقی

شکل ۱۳- تغییرات تنش‌های قائم در دیواره تونل‌ها (کارگاه و تونل‌ها بترتیب در موقعیت ۱۹۸ و ۲۱۰ متری)

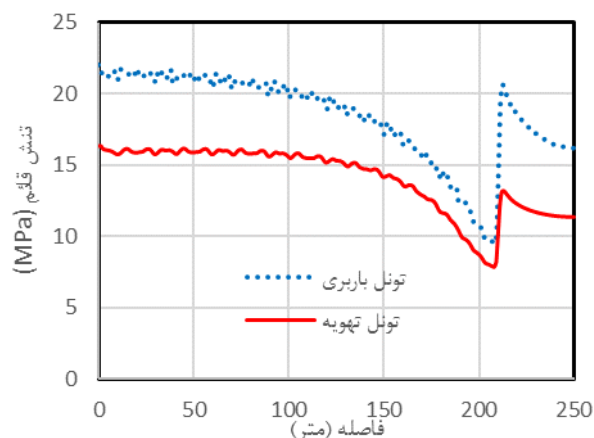


شکل ۱۴- تنش‌های قائم در بالا، مرکز و پایین کارگاه استخراج (کارگاه و تونل‌ها بترتیب در موقعیت ۱۹۸ و ۲۱۰ متری)

دو طرف این مقطع، تنش بر روی پایه‌ها را نشان می‌دهد که افزایش چشمگیری یافته است در مقابل از شدت تنش‌ها بر روی کارگاه کاسته شده است. تنش‌ها از بالا به سمت پایین کارگاه روند افزایشی دارند که با مدل یوهوا (Yueuha and Shoquan, 2014) کاملا مطابقت دارد. وضعیت تنش‌های افقی همانند تنش‌های قائم از بالا به پایین کارگاه روند افزایشی دارند (شکل ۱۹) لیکن در اینجا نمودارها حاکی از ۲ برابری شدت تنش‌های افقی در پایین کارگاه است که رقم قابل توجهی است.

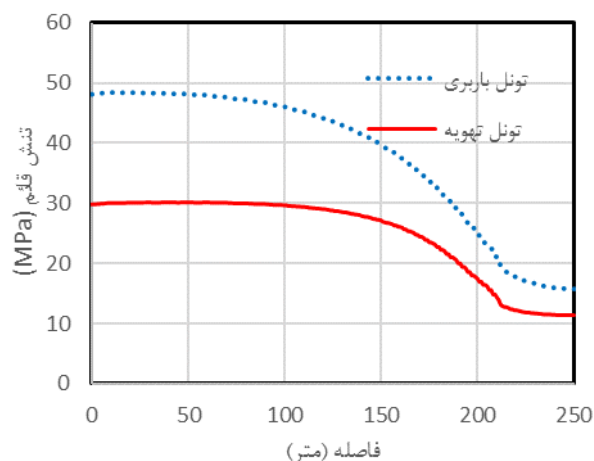


بازیابی تنش کافی نیست و بنظر می‌رسد در مسافت تقریبی ۳۵۰ متر دست کم بخش پایینی کارگاه به تعادل برسد.



شکل ۱۲- تغییرات تنش‌های قائم در تاج تونل‌ها (کارگاه و تونل‌ها بترتیب در موقعیت ۱۹۸ و ۲۱۰ متری)

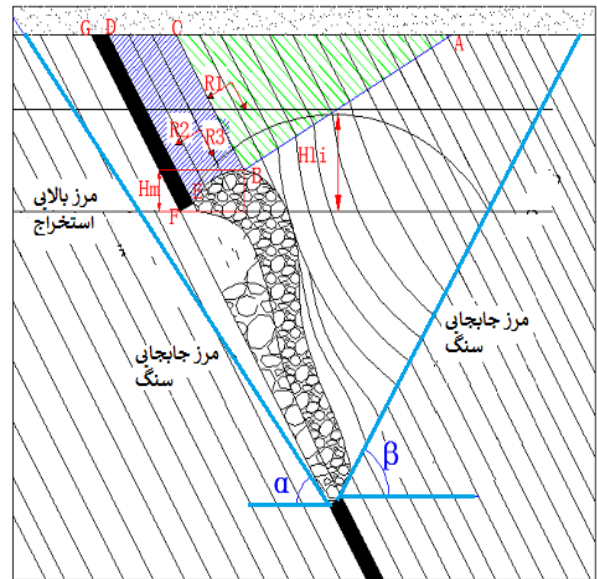
توزیع تنش‌های قائم در سقف جبهه کار بلند در پژوهش حاضر (شکل ۱۷) از الگوی مشابه الگوی تحلیلی ژو و همکاران (Xu et al., 2014) (شکل ۱۶) پیروی می‌کند که در آن حداکثر فشار سقف در پایین کارگاه متمرکز شده در حالی که بخش بالایی کارگاه تنش‌های بسیار محدود و حتی مثبت (رو به بالایی) را تجربه می‌کند. لغزش خرده سنگ‌های ناحیه تخریب در اثر نیروی ثقلی به بخش پایینی کارگاه علت این موضوع است. شکل ۱۸ تغییرات تنش قائم در مقطع عرضی کارگاه استخراج را نشان می‌دهد.



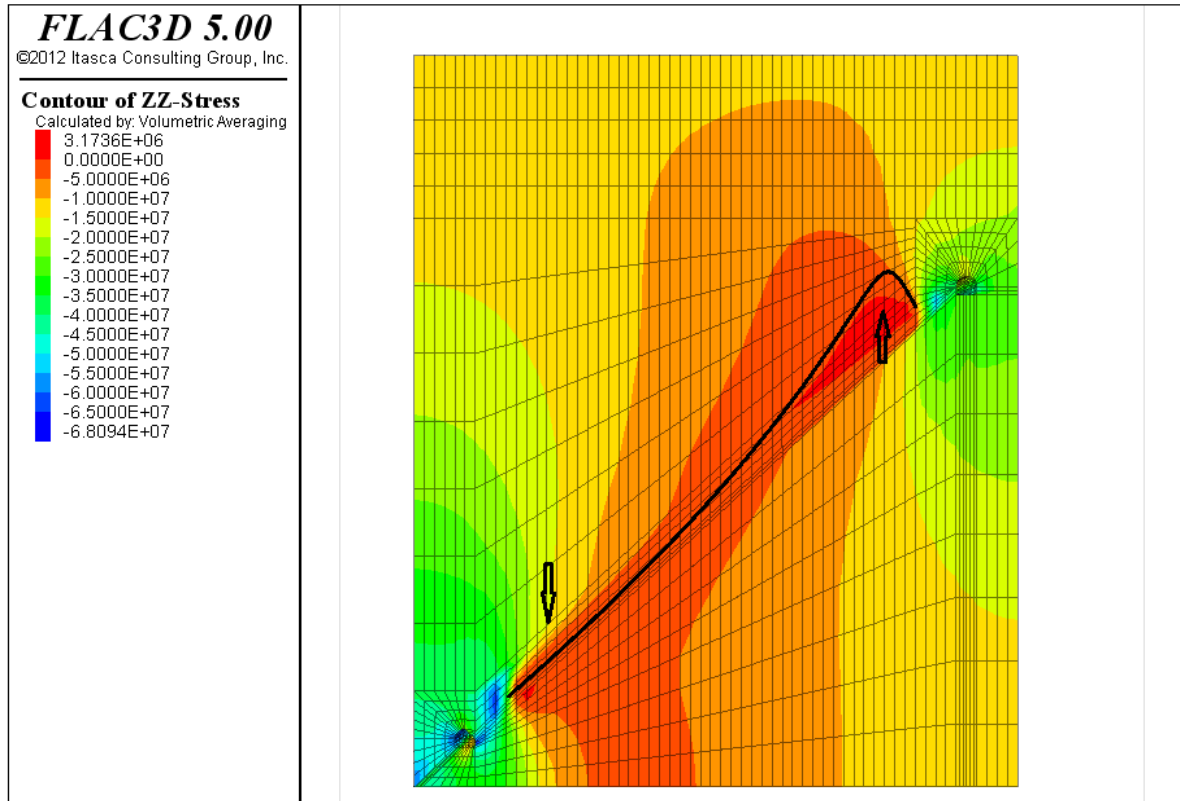
تنش در پایه‌های زغالی بالا و پایین کارگاه (شکل ۲۰) بترتیب از مقادیر برجای ۱۲ و ۱۵ مگاپاسکال در نهایت به ۴۳ و ۵۱ مگاپاسکال رسیده اند. قایل ذکر است که در عمل به لحاظ فشار بیشتر بر روی پایه پایینی عرض آن کمی بیشتر از پایه بالایی در نظر گرفته می‌شود. حفر دویل‌ها در هر ۱۰ متر از طول کارگاه باعث وضعیت نوسانی در نمودار شده است در این موقعیت‌ها تنش قائم کمی افت دارد.

شکل ۲۱ وضعیت بلوکی پلاستیک در مدل هوک-براون را نشان می‌دهد. مطابق شکل شکست در سقف بالایی کارگاه عمدتاً تاثیر توامان کشش و برش در طی پیشروی را نشان می‌دهد در حالی که در بخش پایینی کارگاه، گسیختگی‌ها ناشی از برش محض است که پایه پایینی و همینطور دیواره تونل باربری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این نتایج با یافته‌های یوهوا (Yuehua and Shoquan, 2014) مطابقت کامل دارد.

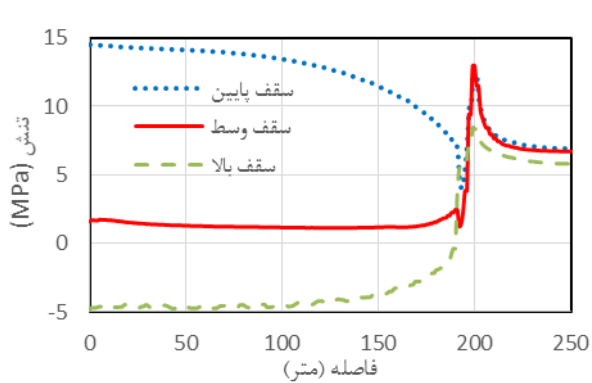
شکل ۱۵- تنش‌های قائم در بالا، مرکز و پایین کارگاه استخراج-مدل هوک-براون (کارگاه و تونل‌ها بترتیب در موقعیت ۱۹۸ و ۲۱۰ متری)



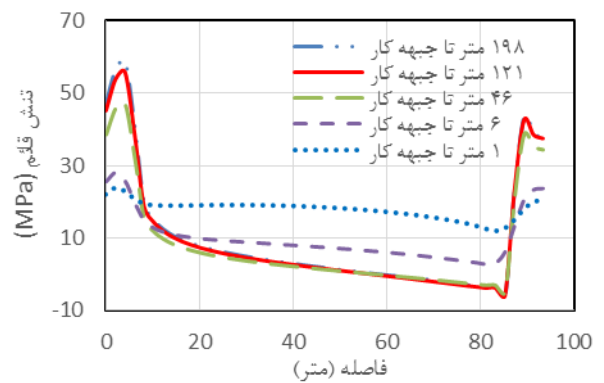
شکل ۱۶- تحلیل تنش‌ها در کارگاه جبهه کار بلند شیب دار (Xu et al., 2014)



شکل ۱۷- تنش‌های قائم نهایی در مدل (کارگاه و تونل‌ها بترتیب در موقعیت ۱۹۸ و ۲۱۰ متری)

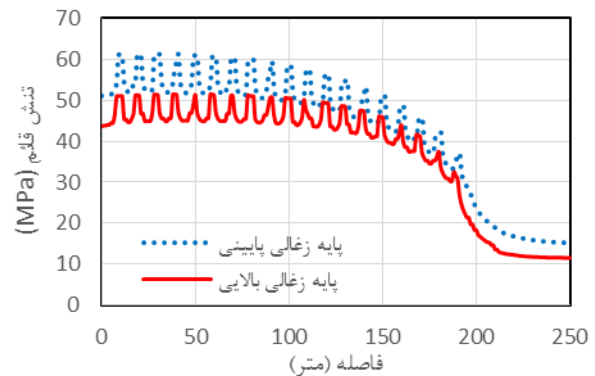


شکل ۱۹- تنش‌های افقی در بالا، مرکز و پایین کارگاه استخراج بعد از ۱۹۸ متر پیشروی (کارگاه و تونل‌ها بترتیب در موقعیت ۱۹۸ و ۲۱۰ متری)



شکل ۱۸- تغییرات تنش قائم در راستای عرض پهنه جبهه کار بلند در فواصل مختلف از جبهه کار (کارگاه و تونل‌ها بترتیب در موقعیت ۱۹۸ و ۲۱۰ متری)

فضای خالی در انتهای پایین باید پر شود. بلوک‌های سنگ تخریبی در جبهه کار در امتداد سطح لایه بندی به سمت پایین جابجا می‌شوند. بنابراین فضای خالی بزرگی در انتهای بالایی جبهه کار شکل گرفته که باطله سقف می‌تواند به آن وارد شود. حداکثر تنش‌های قائم در بخش پایینی جبهه کار متمرکز است. این در نهایت به ساختاری منجر می‌شود که در بخش بالا سست و آزاد و در نیمه پایین سخت و فشرده است. جابجایی‌ها در بخش میانی کارگاه و تونل ترابری به ترتیب ۱۰/۴ و ۳۵/۱ میلیمتر بوده که از حد مجاز ساکورایی بیشتر است لیکن کرنش برشی از محدوده مجاز تجاوز نمی‌نماید. جابجایی و تنش‌های قائم رفته رفته با پیشروی جبهه کار به وضعیت برجا برمی‌گردند اما تنش‌های افقی روند افزایشی را در محدوده پایینی جبهه کار نشان می‌دهند. همچنین پایه‌های کناری بالایی و پایینی افزایش تنش قائم بیش از ۳ برابری را متحمل می‌شوند. وضعیت بلوکی مدل حاکی از شکست توامان کششی و برشی در سقف بالایی کارگاه در طی پیشروی و برش محض در سقف پایینی، پایه پایینی و دیواره تونل باربری است. فرمول تجربی یاووز مسافت پیشروی بازیابی تنش برجا را با توجه به پارامترهای این مطالعه ۲۰۰ متر پیش بینی می‌نماید که در مقایسه با فاصله تعادلی حاصله از مدل عددی در بخش پایینی جبهه کار یعنی ۱۹۸ متر مطابقت خوبی دارد. بطور کلی وضعیت تنش‌ها در نیمه پایینی جبهه کار و نیز تونل ترابری لزوم توجه بیشتر به این نواحی را ایجاب می‌نماید. موفقیت کار در این شرایط عمدتاً به نگهداری و تثبیت مناسب تونل ترابری در پشت جبهه کار بستگی دارد.

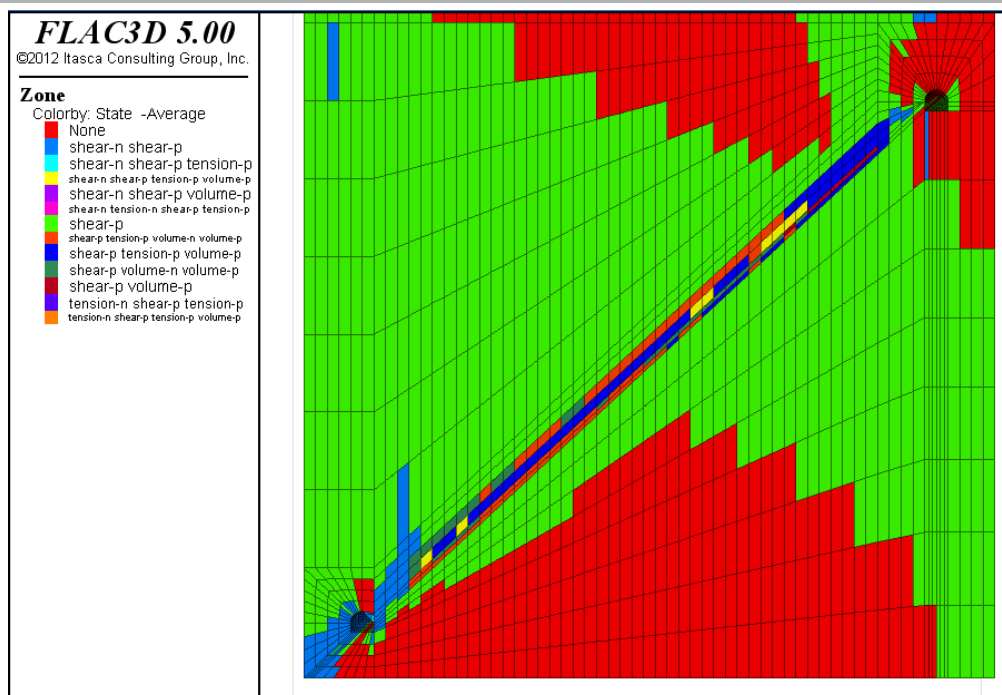


شکل ۲۰- تنش‌های قائم در پایه‌های زغال بالا و پایین (کارگاه و تونل‌ها بترتیب در موقعیت ۱۹۸ و ۲۱۰ متر)

مدل یوهوآ شکست برشی و کششی را بترتیب برای سقف بلافاصله و سقف اصلی تونل باربری پیش بینی می‌نماید لذا از آنجا که در این پژوهش سقف اصلی جداگانه‌ای تعریف نشده است شکست در نواحی بالای کارگاه و تونل باربری از نوع برشی در طی پیشروی است.

#### ۸- بحث و نتایج

تنش‌ها و جابجایی‌ها سنگ‌های اطراف سقف کارگاه جبهه کار بلند شیب دار در طی عملیات حفاری تحلیل و بررسی موارد مانند توزیع فشار و جابجایی در تونل‌ها، کارگاه و پایه‌ها با مقادیر مجاز مقایسه گردید. بطور کلی با حفر کارگاه استخراج از میزان فشار بر سقف آن کاسته شده و سبب فشار مضاعف بر پایه‌ها و تونل‌های طرفین می‌گردد که این فشار در پایه و تونل پایینی بوضوح بیشتر است. ساختار و رفتار حرکتی سقف در جبهه کار بلند شیب دار با انواع افقی آن کاملاً متفاوت است. در طی فرآیند پیشروی جبهه کار بلند شیب دار در ابتدا



شکل ۲۱- وضعیت بلوکی در مدل هوک-براون

#### ۷- منابع

- [6] Kenny P. The caving of the waste on longwall faces. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 1969;6:541-55.
- [7] Pappas DM, Mark C. (1993), Behaviour of simulated longwall gob material. Report of Investigations, US Department of the Interior. Bureau of Mines, RI-9458, p. 39
- [8] Rezaei, M., (2018), Long-term stability analysis of goaf area in longwall mining using minimum potential energy theory, *Journal of Mining & Environment*, Vol.9, No.1, 2018, 169-182.
- [9] Salamon MDG. Mechanism of caving in longwall mining. *Rock Mechanics Contributions and Challenges: Proceedings of the 31st US Symposium*, Golden, 1990. p. 161-8.
- [10] 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
- [1] گزارش پایانی اکتشافات شرکت البرز شرقی، (۱۳۴۸)، دفتر مرکزی معدن طزره (مجموعه تونل مادر)
- [2] Bai, M., Elsworth D., (1990), Some aspects of mining under aquifers in China, *Mining science and Technology*, (10), p81-91
- [3] Dongfeng, Y., Zhua L., Wendong C., Zhendong F., Dongfang W., Yuanhao Z., (2017), Monitoring strata behavior due to multi-slicing top coal caving longwall mining in steeply dipping extra thick coal seam, *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 27, Issue 1, January 2017, Pages 179-184
- [4] Eberhardt, E., (2012), "The hoek-Brown failure criterion", *Rock Mech and Rock Eng*, 45:981-988..
- [5] Hoek E., Brown E.T. (1980), "Underground Excavations in Rock", London, Instu Min. Metall. p.527

- [11] Wang, W., Jiang T., Wang Z., Ren, M., (2017), A analytical model for cover stress re-establishment in the goaf after longwall caving mining, J. S. Afr. Inst.Min.Metall. vol.117 n.7 Johannesburg Jul . 2017
- [12] Xu, B., Yin S., Zhang X., Wu J., (2014), Research on the Stability of Waterproof Coal Pillar in Steep Seam under Aquifers, An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges - Sui, Sun & Wang (eds), China University of Mining and Technology Press, Xuzhou, ISBN 978-7-5646-2437-8, p248-251.
- [13] Yuehua D., Shouquan W., (2014), Feasibility analysis of gob-side entry retaining on a working face in a steep coal seam, International Journal of Mining Science and Technology, 24 (2014) 499–503.
- [14] Yavuz, H (2004), An estimation method for cover pressure re-establishment distance and pressure distribution in the goaf of longwall coal mines, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41 (2004) 193–205
- [15] Zhang Z., Shimada H., Sasaoka T., Hamanak A., (2017), Stability Control of Retained Goaf-Side Gateroad under Different Roof Conditions in Deep Underground Y Type Longwall Mining, Sustainability 2017 (9), 1671, p1-19.
- [16] Zhao, Y., Liu s., Zhao G., Elsworth D., Jiang Y., (2014), Failure mechanisms in coal: Dependence on strain rate and microstructure, Journal of Geophysical research, Volume 119, Issue 9, Pages 6924–6935