

## برآورد چگونگی توزیع بار در پایه‌های زنجیری کارگاه‌های استخراج جبهه کار بلند مکانیزه در معدن زغالسنگ طبس با استفاده از روش عددی

مهدی نجفی<sup>۱</sup>، سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۲\*</sup>، فرهنگ سرشکی<sup>۳</sup>، علیرضا یاراحمدی بافقی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

Email: mehdinajafi\_1362@yahoo.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، Email: jalalisme@shahroodut.ac.ir

۳- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، Email: farhang@shahroodut.ac.ir

۴- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد، Email: ayarahmadi@yazduni.ac.ir

(دریافت ۱۵ اردیبهشت ۱۳۸۸، پذیرش ۲۹ آذر ۱۳۸۸)

### چکیده

پایه‌های زنجیری در روش جبهه کار بلند مکانیزه بین دو پهنه استخراجی باقی گذارده می‌شوند و شرایط بارگذاری آنها با شرایط بارگذاری پایه‌ها در روش استخراج اتاق و پایه متفاوت است زیرا این پایه‌ها بار حاصل از منطقه تخریب را نیز تحمل می‌نمایند. از این رو برآورد مقدار و چگونگی توزیع بار بر روی آنها دارای اهمیت زیادی است. محدودیت‌های روش‌های سنتی و تجربی در برآورد بار وارد بر این پایه‌ها مطلوبیت‌های زیادی را برای استفاده از روش‌های عددی ایجاد کرده است. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار  $FLAC^{3D}$  و در نظر گرفتن مدل کرنش نرمی موهرکولمب، تاثیر بارهای کناری و جلویی بر روی پایه‌های زنجیری در معدن زغالسنگ طبس با توجه به جانمایی آنها نسبت به جبهه کار، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که حداکثر بار وارد بر پایه‌های زنجیری در فاصله ۴ تا ۵ متری لبه پایه و هنگامی که جبهه کار در حدود ۲۰ متر جلوتر از آن باشد، اعمال می‌شود.

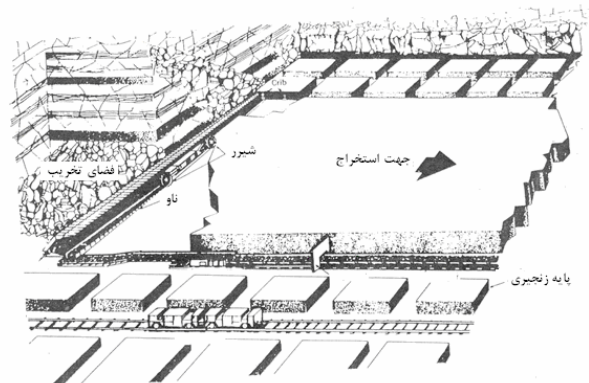
### کلمات کلیدی

پایه‌های زنجیری، مدل‌سازی عددی - توزیع بار - مدل کرنش نرمی

## ۱- مقدمه

به قسمتی از توده سنگ که دست نخورده بوده و بین دو یا چند فضای زیرزمینی مشترک باشد، پایه<sup>۱</sup> گفته می‌شود [۱]. پایه‌ها با اهداف مختلفی چون حفاظت از راهروها، چاه‌ها و فضاهای زیرزمینی بزرگ مقیاس احداث می‌شوند. این پایه‌ها باید دارای پایداری کافی بوده و بتوانند فشار حاصل از وزن روباره را تحمل نمایند [۲]. طراحی پایه‌ها در بهینه‌سازی عملیات معدنکاری بسیار مهم است و برای رسیدن به یک طرح ایمن و اقتصادی باید مقادیر بارهای وارد بر پایه و چگونگی توزیع آنها به همراه رفتار دقیق پایه و محیط در برگیرنده آن مطالعه شود.

پرحجم‌ترین مجموعه پایه‌هایی که در روش استخراج جبهه کار بلند مکانیزه باقی گذارده می‌شود و بر نسبت بازیابی در این روش تاثیر قابل توجهی دارد، پایه‌های زنجیری<sup>۲</sup> هستند. شکل ۱ نمایی از کارگاه استخراج روش جبهه کار بلند و نیز پایه‌های زنجیری را نشان می‌دهد. با بر هم خوردن تعادل تنش در اطراف جبهه کار، تنش‌های کناری و جلویی توزیع می‌شوند. تنشی که در امتداد پیشروی جبهه کار (در امتداد طول پهنه) اندازه‌گیری می‌شود را تنش جلویی و تنشی که در امتداد جبهه کار (در امتداد عرض پهنه) اندازه‌گیری می‌شود را تنش کناری می‌نامند.



شکل ۱: نمایی از کارگاه جبهه کار بلند مکانیزه [۳]

برای برآورد مقادیر و بررسی چگونگی توزیع تنش بر روی پایه‌های زنجیری در روش جبهه کار بلند مکانیزه، روش‌های تحلیلی، تجربی، مشاهده‌ای و عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴]. علیرغم گسترش و تکامل روش‌های تحلیلی، به ویژه روش‌های عددی، عمدتاً از این روش‌ها برای مقایسه نتایج حاصل از سایر روش‌ها با یکدیگر استفاده می‌شود. لذا برای مقاصد عملی، روش‌های دیگر را نیز باید همزمان به کار گرفت. با این وجود، مدل‌های عددی به دلیل قابلیت به تصویر کشیدن

رفتارهای سنگ، مشخص کردن تأثیر پارامترها و بالاخره مقایسه‌ی چند راه حل با یکدیگر، بسیار جالب توجه هستند. امروزه به دلیل محدودیت‌های روش‌های تجربی و تحلیلی، به ویژه عدم توانایی این روش‌ها در بررسی رفتار پایه نسبت به مراحل استخراج، از روش‌های عددی برای بررسی چگونگی توزیع تنش استفاده می‌شود.

طراحی پایه‌های زنجیری در معدن زغالسنگ طبس با استفاده از روش‌های تجربی از عمق ۱۰۰ متر تا ۶۰۰ متر انجام شده و مقادیر تنش بر روی پایه‌ها بدون توجه به چگونگی توزیع تنش و ترتیب مراحل مختلف استخراج پهنه‌ها محاسبه شده است. اما از آنجا که معدن زغالسنگ طبس به دو دلیل منحصر به فرد و با سایر معادن متفاوت است، روش‌های تجربی موجود قابل انطباق با شرایط این معدن نیستند. دلیل نخست آن است که عمق این معدن در مقایسه با سایر معادن زغالسنگ، کمتر است و شرایط بارگذاری آن غالباً در محدوده شرایط بارگذاری فوق بحرانی قرار می‌گیرد در صورتی که در روش‌های تجربی عمدتاً برای برآورد بار بر مبنای شرایط بحرانی و زیر بحرانی ارائه شده‌اند. دومین دلیل آن است که در طراحی پایه این معدن، یک نوع پایه زنجیری بلند که شبیه پایه حایل است در امتداد پهنه‌ها جانمایی شده است. طبیعتاً وجود چنین پایه‌هایی شرایط کاربرد روش‌های تجربی برای برآورد بار وارد پایه‌های زنجیری را با محدودیت قابل توجه روبرو می‌نماید. لذا در این تحقیق با انگیزه رفع محدودیت‌های مذکور و همچنین به منظور بررسی اثر ترتیب مراحل مختلف استخراج پهنه‌ها بر مقدار و چگونگی توزیع تنش وارد بر پایه‌های زنجیری از نرم افزار تفاضل محدود  $FLAC^{3D}$  با کاربرد مدل کرنش نرمی موهركولمب، به بررسی پایه‌های زنجیری با عرض ۲۸ متر که در ۲۰۰ متری سطح زمین قرار دارند، پرداخته شده است.

## ۲- پیشینه مطالعات

روش‌های ارائه شده برای بررسی رفتارهای مقاومتی پایه‌های زنجیری که مشتمل بر محاسبه بار وارد بر پایه نیز می‌باشند، عموماً متناسب با شرایط معادن عمیق آمریکا و آفریقای جنوبی است [۵] و به دلیل تفاوت و پیچیدگی شرایط هندسی و زمین‌شناسی در اروپا و به ویژه مجموعه معادن زغالسنگ طبس تاکنون رابطه خاصی برای پیش بینی شاخص‌های مقاومتی و چگونگی توزیع بار پایه‌های زنجیری در این مناطق ارائه نشده است.

یکی از روش‌های تحلیلی تجربی، روش کار و ویلسون<sup>۳</sup> است که در سال ۱۹۸۲ برای طراحی پایه‌های زنجیری ارائه شده

است که برای زاویه اصطکاک داخلی زغالسنگ مقدار ثابت ۳۷ درجه در نظر گرفته شده است.

با مطالعات انجام شده توسط موسسه USBM<sup>۱۵</sup> بر روی ۲۲ معدن، درستی این رابطه برای کاربرد در معادن مشابه تایید شده است [۵].

### ۳- توصیف منطقه مورد مطالعه

ناحیه‌پرونده با وسعتی در حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان طبس قرار گرفته است. معدن شماره یک طبس در ناحیه پرونده و بر روی لایه C<sub>1</sub> طراحی شده است. ضخامت روباره از ۱۰۰ تا ۶۰۰ متر متغیر است و کانسار مورد نظر با روش جبهه کار بلند مکانیزه استخراج می‌شود. بر اساس طراحی انجام شده، طول کارگاه استخراج در اولین پهنه ۲۰۰ متر و در بقیه پهنه‌ها ۲۲۰ متر است. طول پهنه‌های استخراجی در حدود یک کیلومتر و گاهی بیشتر است که به شیوه پسر<sup>۱۶</sup> استخراج می‌شوند. غیر از پهنه اول که دارای دو تونل فرعی است، بقیه پهنه‌ها دارای سه تونل فرعی هستند که از تونل‌های اصلی منشعب می‌شوند و در بین دو پهنه یک پایه سرتاسری که در این معدن پایه حایل نامیده می‌شود و یک ردیف پایه‌های زنجیری ایجاد شده است [۸]. شکل ۲ نمایی از طرح پهنه‌های معدن زغالسنگ طبس را نشان می‌دهد.

### ۴- مدلسازی عددی

در این تحقیق به منظور بررسی چگونگی توزیع بار بر روی پایه‌های زنجیری در معدن زغالسنگ طبس از روش عددی استفاده شده است. برتری مدلسازی عددی نسبت به روش‌های تجربی و تحلیلی در ترتیب اثر دادن اکثر عوامل موثر بر پایداری و ناپایداری پایه‌ها، باعث شده است که امروزه این روش در اکثر طراحی‌ها مورد استفاده قرار گیرد. به دلیل پیوستگی محیط در معدن زغالسنگ طبس، از نرم افزار تفاضل محدود FLAC<sup>3D</sup> که قادر است رفتار تخریب سقف در روش جبهه کار بلند مکانیزه را نیز شبیه سازی نماید، استفاده شده است [۱۰].

#### ۴-۱- هندسه مدل و مش بندی

همان‌طور که ذکر شد عرض پهنه در معدن شماره یک طبس، ۲۲۰ متر است که در مدلسازی عددی به منظور کاهش ابعاد مدل و در نتیجه کاهش زمان اجرای برنامه و تقارن مدل، عرض هر پهنه ۱۱۰ متر در امتداد محور X در نظر گرفته شده است. پهنای مدل در امتداد محور X علاوه بر نصف عرض دو جبهه کار، شامل ۲۸ متر عرض پایه‌های زنجیری، ۳۱ متر

شده است. از این روش برای طراحی ابعاد پایه‌ها زنجیری در روش جبهه‌کار بلند در منطقه JWR<sup>۴</sup> آمریکا استفاده شده است. در این روش تلاش شده است تا ابعاد پایه‌ها با در نظر گرفتن ملاحظات ایمنی، پارامترهای اقتصادی، تهویه و غیره بهینه شود. از مهمترین معایب این روش می‌توان به زیاد برآورد کردن مقدار بار وارد بر قسمت مرکزی پایه و نیز در نظر نگرفتن فصل مشترک بین پایه و لایه‌های در برگیرنده آن اشاره نمود [۵].

روش چوی و مک‌کین<sup>۵</sup> در سال ۱۹۸۰ برای طراحی پایه‌های زنجیری در روش استخراج جبهه کار بلند در آمریکا ارائه شده است [۶]. این روش مختص تعیین ابعاد پایه‌های زنجیری است که در عمق کمتر از ۳۳۰ متر قرار دارند. در شرایطی از این رابطه می‌توان استفاده کرد که نسبت تنش‌های افقی به تنش قائم در منطقه کم، خصوصیات لایه‌های منطقه مشابه لایه‌های مناطق شرقی آمریکا و نیز سیستم جبهه کار بلند دارای سه راهرو<sup>۶</sup> باشد. در این رابطه بار وارد بر پایه براساس روش دو بعدی بار حاصل از نشست<sup>۷</sup> بر روی پایه و مقاومت پایه بر اساس روش تجربی هولاند و گدی<sup>۸</sup> برآورد شده است. از مهمترین معایب این روش این است که تاثیر ارتفاع معدنکاری بر نحوه توزیع تنش‌های کناری در نظر گرفته نشده است [۵].

یکی دیگر از روش‌های تجربی، روش ALPS<sup>۹</sup> است که در سال ۱۹۸۶ توسط مارک و بیناوسکی برای طراحی پایه‌های زنجیری در روش جبهه کار بلند ارائه شده است [۴]. در این روش برای محاسبه بارهای کناری وارد بر پایه از مدل دو بعدی نشست و برای محاسبه مقاومت پایه از رابطه بیناوسکی استفاده شده است. هدف از ارائه این رابطه تجربی، طراحی پایه‌های زنجیری به نحوی است که در مقابل تنش‌های کناری مقاوم باشند. از معایب این روش می‌توان به در نظر نگرفتن تاثیر تنش‌های افقی بر پایداری راهروها و نیز در نظر نگرفتن تاثیر عرض راهروها بر شرایط کف و سقف نام برد [۵].

روش پنگ و هوسیونگ<sup>۱۰</sup> یک روش تجربی است که بر اساس نتایج تحلیل‌های عددی برای طراحی پایه‌های زنجیری در معادن زغالسنگ آمریکا تدوین شده است. اساس این روش استفاده از روش المان‌های محدود<sup>۱۱</sup> دو بعدی است که منجر به تدوین یک رابطه برای تعیین عرض پایه‌های زنجیری شده است. درستی و دقت این رابطه بستگی به جهت جبهه کار دارد. در این روش بار وارد بر پایه از سه جنبه شبیه سازی و محاسبه می‌شود. این سه جنبه شامل بارهای جلویی<sup>۱۲</sup>، بارهای کناری<sup>۱۳</sup> و بار حاصل از روباره<sup>۱۴</sup> است [۷]. یکی از معایب این رابطه آن

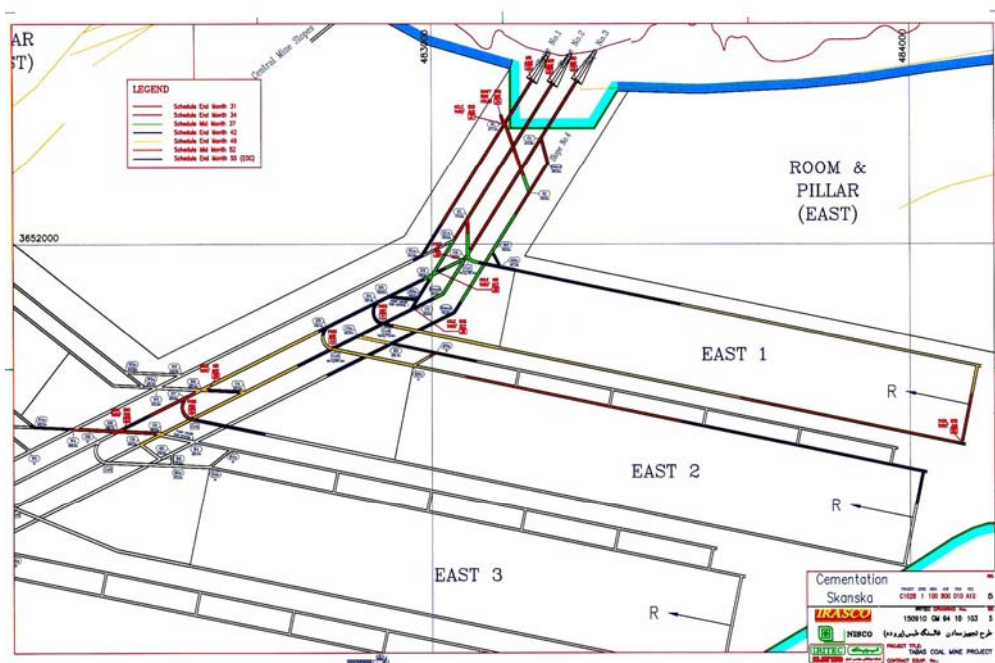
استفاده شده است. ابعاد هر یک از المان‌های در برگیرنده پایه در امتداد X، Y و Z به ترتیب برابر با ۱، ۳ و ۰/۵ متر است. برای ساخت مدل از المان‌های آجری<sup>۱۷</sup> استفاده شده و فرض شده است که شبکه پهنه‌ها و راهروها حالت یکنواخت دارند. این بدین معنی است که صفحات همساز قائم در خط مرکزی هر پهنه نشان دهنده صفحات تقارن است. شرایط مرزی برای تمام صفحات قائم تعریف شده و جابه‌جایی فقط در جهت قائم مجاز است. جابه‌جایی قائم در امتداد قاعده مدل که بر نصف ارتفاع پایه زغالسنگ منطبق است، محدود شده است. در شکل ۳، دو تصویر سه بعدی و دو بعدی از نحوه مدل‌سازی عددی جبهه کار بلند مکانیزه معدن زغالسنگ طبس نشان داده شده است.

عرض پایه حایل و ۱۳/۵ متر عرض راهروها (سه راهرو، عرض هر کدام ۴/۵ متر) است. در مجموع پهنای مدل در امتداد محور X با توجه به عمق قرارگیری پایه‌ها از سطح زمین برابر با ۲۹۲/۵ متر منظور شده است.

طول واقعی هر پهنه در حدود ۱۲۰۰ متر است که در مدل‌سازی به منظور کاهش ابعاد مدل و در نتیجه کاهش زمان اجرای برنامه کامپیوتری برابر با ۱۰۰۰ متر منظور شده است.

عمق قرارگیری مدل از سطح زمین با توجه به مفروضات بیان شده برابر با ۲۰۰ متر در امتداد محور Z و در خلاف جهت مثبت آن در نظر گرفته شده است.

به منظور نشان دادن توزیع بهتر تنش در مدل عددی، در نواحی ایجاد پایه حایل و پایه زنجیری از مش با ابعاد کوچک‌تر



شکل ۲: جانمایی پهنه‌ها، پایه‌ها و راهروهای استخراجی در معدن زغالسنگ طبس [۹]

#### ۲-۴- خصوصیات مواد

در مدل‌سازی عددی مدل جبهه کار بلند از سه گروه مشتمل بر گروه لایه زغالسنگ، گروه سقف و گروه فصل مشترک بین سقف و پایه تشکیل شده است. به منظور دقیق‌تر شدن نتایج، فرض شده است که فصل مشترک بین پایه با سقف از موادی با رفتار موهر کولمب که خصوصیات نزدیک به سقف و پایه داشته باشند با چسبندگی ۰/۵ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی ۲۰ درجه تشکیل شده است. خصوصیات مکانیکی مواد در معدن زغالسنگ طبس در جدول ۱ آمده است.

#### ۳-۴- مدل مورد استفاده در تحلیل

در این تحلیل از مدل کرنش نرمی استفاده شده است. رفتار کرنش نرمی در توده سنگ ناشی از رشد و توسعه ترک‌ها و به هم پیوستگی ریز ترک‌ها و تبدیل آن‌ها به ترک‌های بزرگ است. دلیل استفاده از مدل رفتاری کرنش نرمی برای بررسی رفتار پایه‌ها این است که بتوان سه مرحله رفتار پایه را مدل کرد. مرحله الاستیک که تا مقاومت نهایی ادامه می‌یابد. مرحله کرنش نرمی که از مقاومت نهایی تا مقاومت پسماند ادامه می‌یابد و در طی آن مقاومت پایه به تدریج کاهش می‌یابد. مرحله پلاستیک کامل که در این مرحله مقاومت پایه به

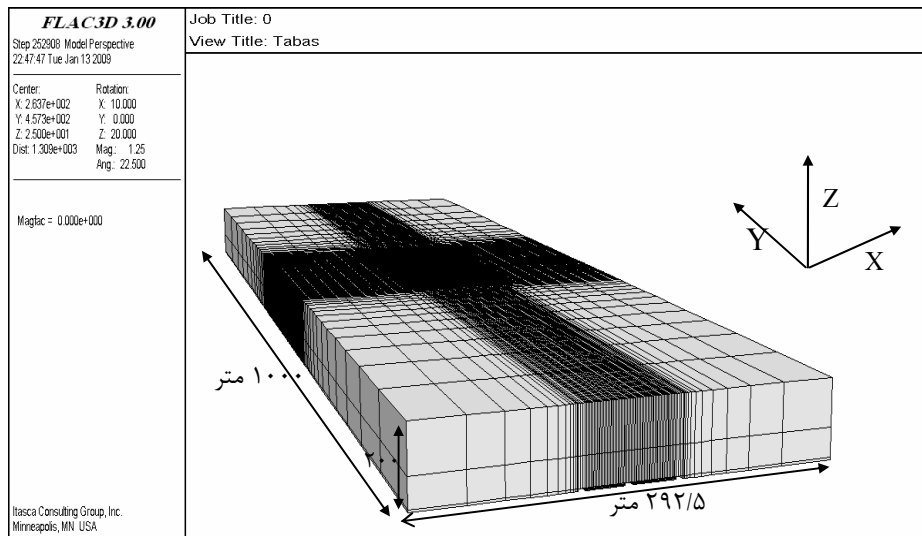
مدل‌های رفتاری دیگر نسبتاً ساده‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر است. با توجه اطلاعات موجود و آنالیز صورت گرفته، پارامترهای کرنش نرمی زغالسنگ برای کرنش پلاستیک ۰/۱ درصد عبارت است از:

$$C_r = 0.09 \text{ MPa}$$

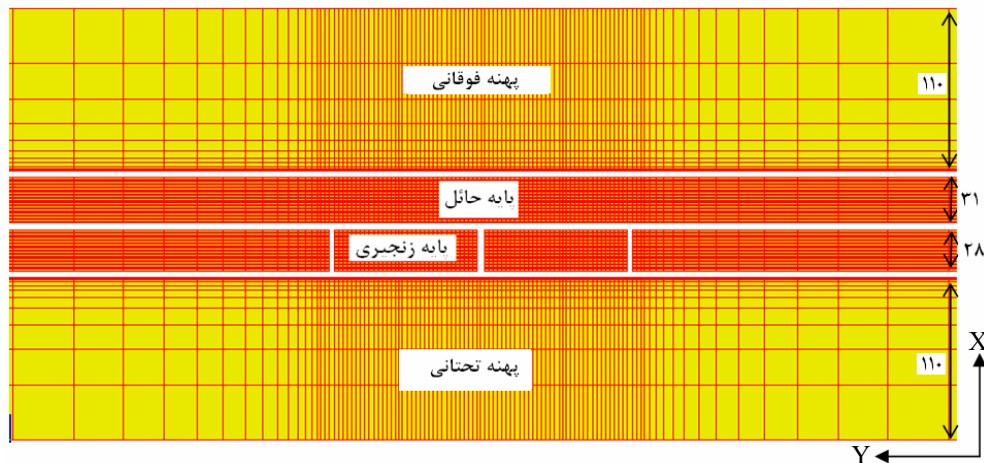
$$\phi_r = 20$$

که در آن  $C_r$  چسبندگی پسماند و  $\phi_r$  زاویه اصطکاک داخلی پسماند زغالسنگ (درجه) است.

مقاومت پسماند می‌رسد. تنها مدل رفتاری که هر سه مرحله این رفتار را می‌تواند به خوبی بیان کند، مدل کرنش نرمی است [۱۱]. به منظور تحلیل تنش در پایه زنجیری، از مدل کرنش نرمی موهر کولمب نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  برای نسبت دادن خصوصیات مواد استفاده شده است. به طور کلی این مدل از یک سری توابع کرنش که منطبق بر خواص مدل موهر کولمب (چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع) است، بهره می‌گیرد [۵]. در این مدل، کاهش مقاومت به ازای افزایش کرنش پلاستیک بیان می‌شود. این مدل رفتاری در مقایسه با



الف: مدل سه بعدی



ب: مدل دو بعدی

شکل ۳: مدل‌سازی عددی پایه‌های زنجیری و حایل در نرم افزار  $FLAC^{3D}$

رشد منطبق با تابع نمایی می‌شود که در این شرایط شیب منحنی تنش کرنش (مدول مماسی) اشاره به افزایش کرنش منطقه تخریب دارد [۵]. تاکنون روش‌های زیادی برای مدل‌سازی تخریب بیان شده است که دو روش سالامون<sup>۱۸</sup> و

#### ۴-۴- نحوه اجرای مدل‌سازی تخریب

بهترین مدل برای مدل‌سازی منطقه تخریب، مدل کرنش سختی است. تحکیم مواد تخریب شده در اثر افزایش کرنش به همراه کاهش حجم فضاهای خالی باعث افزایش تنش با نرخ

$$\sigma_v = \frac{a \times \varepsilon_v}{b - \varepsilon_v} \quad (1)$$

که در آن:  $a$ ، مدول تغییر شکل مواد تخریب شده؛  $\varepsilon_v$ ، کرنش قائم منطقه تخریب؛  $\sigma_v$ ، تنش قائم و  $b$ ، حداکثر کرنش منطقه تخریب و برابر با نصف ضخامت منطقه استخراجی است. بر پایه مطالعات USBM مقدار  $a$  برابر با  $3/5$  مگاپاسکال و مقدار  $b$  برابر با  $0/5$  است [۱۴].

ترزاقی<sup>۱۹</sup> بر پایه مدل رفتاری کرنش سختی تخریب توسعه داده شده است [۱۳، ۱۲]. به علت تاثیر قابل توجه رفتار مواد تخریب شده بر چگونگی توزیع تنش در روش جبهه کار بلند مکانیزه، در موسسه USBM تحقیقات زیادی برای اعتبار سنجی روش ترزاقی و سالامون انجام شده است. نتایج این تحقیقات حاکی از این است که روش سالامون رفتار مواد تخریب شده را با دقت بیشتر از روش ترزاقی برآورد می کند [۵]. بر اساس نظریه سالامون تنش های قائم با افزایش کرنش قائم، افزایش می یابند که ارتباط آنها را می توان به صورت تابع زیر بیان نمود.

جدول ۱: پارامترهای ورودی در مدل سازی عددی [۹]

| ردیف | خصوصیات                   | نماد        | مقادیر  |      |
|------|---------------------------|-------------|---------|------|
|      |                           |             | زغالسنگ | سقف  |
| ۱    | مدول الاستیک              | E           | ۳       | ۳/۵  |
| ۲    | نسبت پواسون               | $\nu$       | ۰/۲۹    | ۰/۳  |
| ۳    | *مقاومت کششی              | $\sigma_t$  | ۰/۶۶    | ۲/۸  |
| ۴    | *چسبندگی                  | C           | ۰/۵     | ۴/۷  |
| ۵    | زاویه اصطکاک داخلی        | $\phi$      | ۲۳      | ۳۲   |
| ۶    | چگالی                     | $\gamma$    | ۱۶۰۰    | ۲۶۰۰ |
| ۷    | مدول حجمی                 | K           | ۲/۳۸    | ۲/۹۱ |
| ۸    | مدول برشی                 | G           | ۱/۱۶    | ۱/۳۴ |
| ۹    | زاویه اتساع <sup>۲۰</sup> | $\bar{\nu}$ | ۱۰      | ۱۵   |
| ۱۰   | *مقاومت فشاری تک محوری    | $\sigma_c$  | ۶/۶۲    | ۲۵/۶ |

\* این مقادیر عموماً از میانگین گیری حسابی بدست آمده اند.

منطقه استخراجی است. بنابراین مدول حجمی هر کدام از المان های منطقه تخریب به صورت زیر محاسبه می شود [۱۵].

$$K = \frac{1.75}{0.5 - \varepsilon_v} \quad (2)$$

که در آن:  $\varepsilon_v$ ، کرنش قائم در هر المان است.

در شکل ۴ دو روش مدلسازی تخریب نشان داده شده است.

در ارزیابی دو روش مدلسازی منطقه تخریب، با استفاده از مدل های عددی نتیجه شده است که روش بروز رسانی مدول حجمی از کارایی بیشتری نسبت به روش نیروهای شبکه ای برخوردار است و زمان محاسبات کامپیوتری آن بسیار کمتر است [۵]. بدین ترتیب در این تحقیق برای مدل سازی رفتار منطقه تخریب با استفاده از مدل سالامون در نرم افزار FLAC<sup>3D</sup> از روش بروز رسانی مدول حجمی استفاده شده است.

با توجه به رابطه سالامون از دو روش در نرم افزار FLAC<sup>3D</sup> به منظور مدلسازی تخریب استفاده می شود. در روش اول، نیروهای فشاری به صورت بردارهایی به سمت بالا بر نقاط شبکه واقع در منطقه تخریب اعمال می شود و بعد از هر مرحله معدن کاری از تقسیم جابه جایی هر کدام از نقاط شبکه در منطقه تخریب بر ارتفاع لایه زغالسنگ استخراجی، کرنش قائم منطقه تخریب محاسبه می شود. این روش را روش نیروهای شبکه ای<sup>۲۱</sup> می نامند. این نیروها با افزایش فاصله جبهه کار از مواد تخریب شده تا جایی افزایش می یابند که همگرایی سقف برابر با نصف ارتفاع منطقه استخراجی شود. در این حالت تنش موجود در منطقه تخریب برابر با تنش روباره است. در روش دوم با افزایش کرنش، مدول حجمی منطقه تخریب هم سو با افزایش فاصله جبهه کار از مواد تخریب شده افزایش می یابد. این روش را روش بروز رسانی مدول حجمی<sup>۲۲</sup> می نامند. در این روش حداکثر همگرایی منطقه تخریب برابر با نصف ارتفاع

بعد از انجام مراحل حفاری راهروها، مدل به تعادل می‌رسد، سپس پهنه فوقانی استخراج می‌شود. مراحل استخراج به گونه‌ای است که در محدوده ۴۰۰ متر ابتدای پهنه، دو قطعه ۲۰۰ متری در نظر گرفته می‌شود و هر ۲۰۰ متر در یک مرحله و با انجام یک برش استخراج می‌شود. سپس به مواد پرکننده فضای استخراجی خواص مواد تخریبی تخصیص می‌یابد و در هر یک از دو مرحله مذکور مدل به تعادل می‌رسد. در منطقه مرکزی پهنه در فواصل ۴۰۰ تا ۶۰۰ متری برش‌های ده متری استخراج می‌شوند و بعد از هر مرحله برش، به منطقه پشت جبهه کار خصوصیات مواد تخریبی تخصیص می‌یابد و سپس مدل به تعادل می‌رسد. پس از استخراج پهنه فوقانی، پهنه تحتانی نیز مشابه پهنه فوقانی استخراج می‌شود.

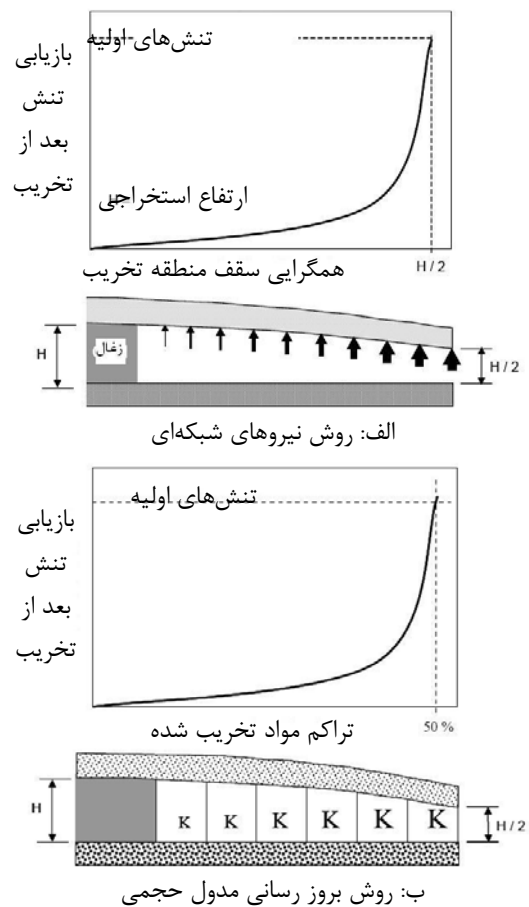
#### ۴-۶- نتایج حاصل از تحلیل عددی

زمانی که راهروهای آماده سازی کارگاه‌ها حفر می‌شوند، شرایط تعادل به هم می‌خورد و برای رسیدن به یک حالت تعادل جدید، توزیع مجدد تنش در اطراف فضاهای حفر شده ایجاد می‌شود. طی این فرایند در بخش‌هایی از محدوده مدل‌سازی شده، تنش قائم از مقدار تنش متوسط ناشی از وزن روباره بیشتر خواهد شد. نواحی که در آن تنش قائم از فشار متوسط وزن روباره بیشتر است در نزدیکی کارگاه‌های استخراج و بر روی پایه‌ها قرار دارند. به‌طور کلی این نواحی که تمرکز تنش در آن‌ها به وقوع می‌پیوندد را پایه و فشارهای بیش از مقدار ثقلی اولیه را فشارهای پایه‌ای<sup>۲۴</sup> گویند [۱۶].

#### ۴-۶-۱- محاسبه مقدار و چگونگی توزیع بارهای جلویی

به منظور ثبت بارهای جلویی بر روی قسمت‌های مختلف پایه‌های زنجیری، نقاطی در امتداد طول و عرض پایه‌های زنجیری مشخص شده و مقادیر تنش زون‌ها به همراه منحنی‌های نشان دهنده چگونگی توزیع آن‌ها ثبت شده است. شکل ۵ چگونگی توزیع تنش جلویی بر روی پایه زنجیری در حالتی که موقعیت سینه کار در فاصله ۴۴۵ متری (از ابتدای پهنه) قرار دارد و پهنه فوقانی به طور کامل استخراج و تخریب شده است را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار تنش جلویی بر روی پایه زنجیری برابر با ۲۲/۵ مگاپاسکال است که در فاصله ۲۰ متری از جبهه کار به حداکثر مقدار خود می‌رسد و به فاصله ۴ تا ۵ متری لبه پایه وارد می‌شود که باعث می‌شود در این محدوده پایه از نظر فیزیکی خرد شود.

به‌طور کلی نحوه تاثیر تنش جلویی بر روی پایه‌های زنجیری به نحوی است که روند افزایش تنش بر روی پایه در قسمت



شکل ۴: روش‌های مدل‌سازی تخریب در نرم افزار FLAC<sup>3D</sup>

#### ۴-۵- تحلیل مدل عددی

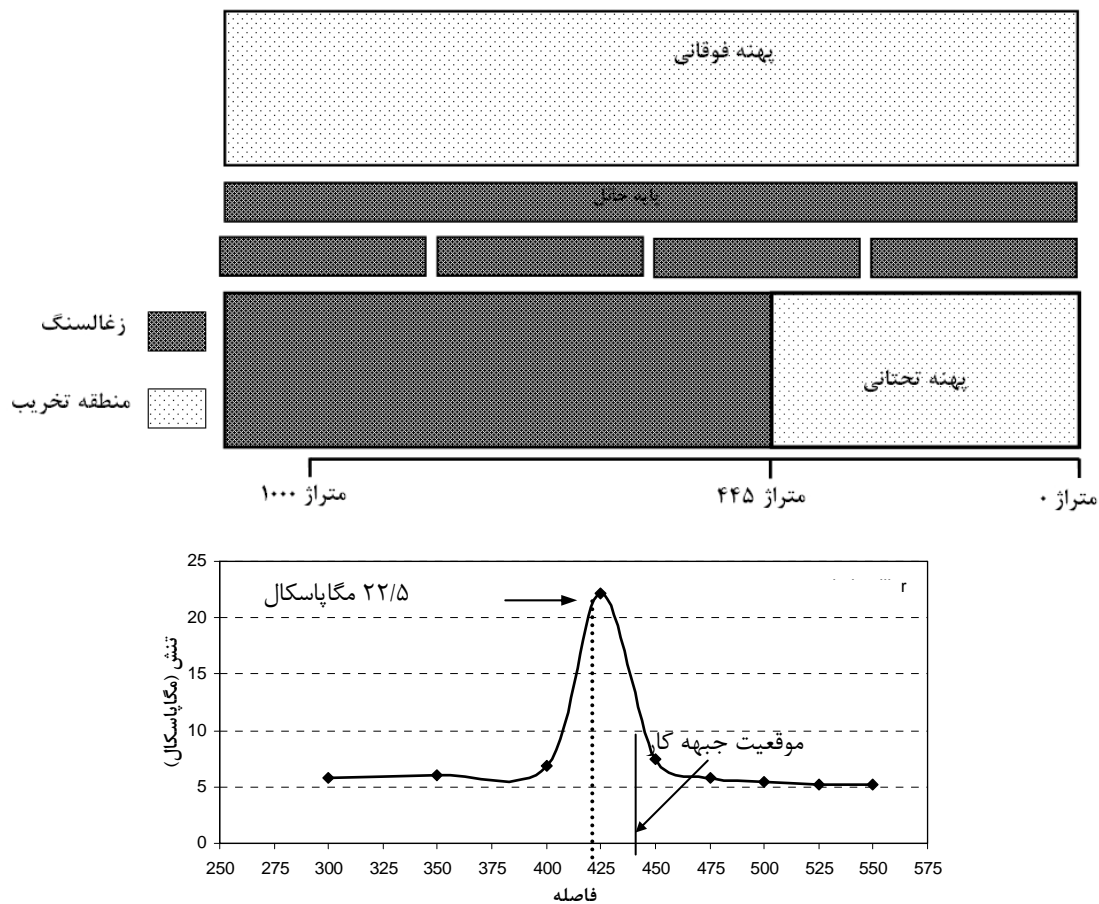
پس از اجرای نرم افزار، با اعمال بار لیتواستاتیک<sup>۲۳</sup> بر مدل، در هر مرحله از عملیات استخراج، مدل به صورت الاستیک به تعادل می‌رسد. همزمان با اعمال بار، خصوصیات لایه زغالسنگ منطبق با رفتار کرنش نرمی تغییر می‌کند و منحنی بار- تغییر شکل به صورت تابعی از کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد. در این شرایط مصالح تشکیل دهنده سقف در کلیه مراحل معدنکاری حالت الاستیک خود را حفظ می‌کنند. بنابراین مدل بلوکی جبهه کار بلند که هیچ گونه عملیات استخراج پهنه و حفر راهروها در داخل آن صورت نگرفته است، در اولین مرحله به تعادل می‌رسد. بعد از این مرحله، مدل تغییر می‌یابد و در آن راهروی اصلی فوقانی، سپس راهروی تحتانی و راهروی وسط هر یک به عرض ۴/۵ متر و ارتفاع ۳/۲ متر حفر می‌شوند. در آخرین مرحله راهروهای ارتباطی بین کارگاه‌های استخراج و راهروهای اصلی جانمایی و حفر می‌شوند. در این مرحله برای کاهش زمان محاسبات و جلوگیری از شلوغ شدن مدل، دو پایه زنجیری هر یک به طول ۱۰۰ متر ایجاد می‌شود.

صورت هیستوگرام ثبت شده و از نتایج حاصل از این هیستوگرام‌ها شکل‌های ۶ تا ۸ ترسیم شده است. شکل ۶ توزیع تنش در حالتی که پهنه فوقانی استخراج شده ولی پهنه تحتانی هنوز استخراج نشده است را نشان می‌دهد. در شکل ۷ نیز توزیع تنش در حالتی که هر دو پهنه استخراج شده اند، ملاحظه می‌شود. برای مقایسه تغییرات بارهای کناری در اثر استخراج پهنه‌ها این دو نمودار در شکل ۸ همراه هم ترسیم شده‌اند.

جلویی جبهه کار ثابت است و فقط تنش‌های ناشی از منطقه تخریب که در پشت جبهه کار توزیع شده است بر روی این نوع پایه‌ها وارد می‌شود.

#### ۴-۶-۲- محاسبه مقدار و چگونگی توزیع بارهای کناری

برای ثبت مقادیر و چگونگی توزیع بارهای کناری در مراحل مختلف استخراج و بررسی میزان تاثیر آن بر روی پایه‌های زنجیری و در نهایت تعیین وضعیت بارهای کناری نسبت به موقعیت سینه‌کار، تنش قائم در زون‌ها در امتداد محور X (یعنی در عرض پهنه‌ها) در موقعیت ۴۴۵ متری محور Y به



شکل ۵: مقدار تنش جلویی در پایه زنجیری

نکته قابل توجه این است که در اثر استخراج پهنه فوقانی مقدار تنش وارد بر پایه زنجیری تنها کمی بیشتر از مقدار تنش معادل با وزن روباره است که این مقدار تنش در اثر حفر راهروهای مجاور آن ایجاد می‌شود اما با استخراج پهنه تحتانی (شکل ۷) مقدار آن به ۱۹ مگاپاسکال در لبه پایه می‌رسد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با استخراج پهنه تحتانی تنش قابل ملاحظه‌ای به پایه‌های حایل وارد نمی‌شود و

با توجه به شکل ۶، چنین استنباط می‌شود که با استخراج پهنه فوقانی بیشترین تنش به ۴ تا ۵ متری لبه پایه حایل وارد می‌شود که مقدار تنش آن به حدود ۵۰ مگاپاسکال می‌رسد هیستوگرام‌های ثبت شده نشان می‌دهد که این قسمت از پایه پس از اعمال این مقدار تنش، قابلیت تحمل تنش نداشته و به مقاومت پسماند ۲/۵ مگاپاسکال رسیده است.



این نوع پایه فقط مقدار تنش ناشی از حفر راهروها و استخراج پهنه فوقانی را تحمل می‌نماید.

برای آگاهی یافتن از وضعیت توزیع بارهای کناری بر روی پایه زنجیری نسبت به موقعیت سینه‌کار، مطابق شکل ۹، تنش کناری روی پایه زنجیری در شرایطی که نقاط هیستوگرام در موقعیت ثابت ۴۴۵ متری محور Y (در امتداد طول پهنه) جانمایی شده است و جبهه کار در سه موقعیت ۴۳۵، ۴۴۵ و ۴۵۵ متری قرار گرفته، ثبت شده است. با توجه به این شکل، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- در شرایطی که امتداد جبهه کار به یک امتداد مفروض بر روی پایه نزدیک می‌شود، به تدریج تنش وارد بر پایه افزایش می‌یابد. توزیع تنش بر روی پایه به گونه‌ای است که بیشترین مقدار افزایش تنش در لبه پایه (در سمت پهنه در حال استخراج) مشاهده می‌شود. در این مورد همانطور که در شکل دیده می‌شود مقدار تنش از ۷ مگاپاسکال به ۱۵ مگاپاسکال افزایش یافته است.

۲- با عبور امتداد جبهه کار از امتداد مفروض بر روی پایه، شرایط توزیع تنش بر روی پایه تغییر می‌یابد و مطابق شکل، مقدار حداکثر تنش که پیش از این در نزدیکی لبه پایه قرار داشت به بخش‌های داخلی‌تر منتقل می‌شود و در فاصله ۶ تا ۷ متری لبه پایه به حداکثر مقدار خود که در این شرایط ۱۴ مگاپاسکال است، می‌رسد.

۳- استخراج کارگاه در پهنه تحتانی، اثر قابل توجهی بر روی توزیع و مقدار تنش در فواصل بیش از ۱۲ متری از لبه پایه ندارد. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود مقدار متوسط تنش وارد بر پایه در محدوده دو- سوم انتهایی عرض آن بدون توجه به موقعیت جبهه کار تحتانی در حدود ۵/۵ مگاپاسکال است.

برای تشریح بهتر موضوع، در شکل ۱۰ تغییرات تنش در بخش‌های مختلف مدلسازی شده در امتداد عرض پایه زنجیری نسبت به مراحل حل مدل عددی به صورت هیستوگرام نشان داده شده است. با توجه به این شکل نکات زیر قابل استنتاج است:

الف- بخش شماره ۱ پایه زنجیری، به دلیل این‌که بیشترین تنش را در لحظه تخریب تحمل می‌کند با آزادسازی تنش<sup>۲۵</sup> همراه است، به طوری که در این حالت تنش به اندازه ۱۶ مگاپاسکال به آن وارد می‌شود و بعد از تخریب و قرار گرفتن مواد تخریب شده در اطراف پایه، به این بخش از پایه تنشی معادل با ۱۱ مگاپاسکال وارد می‌شود.

ب- با استخراج پهنه تحتانی و عبور جبهه کار از محل خط برداشت، به بخش شماره ۲ پایه زنجیری، بیشترین تنش وارد می‌شود ولی این بخش از پایه با آزادسازی تنش همراه نیست و تنشی معادل حداکثر ۱۷ مگاپاسکال به آن وارد می‌شود.

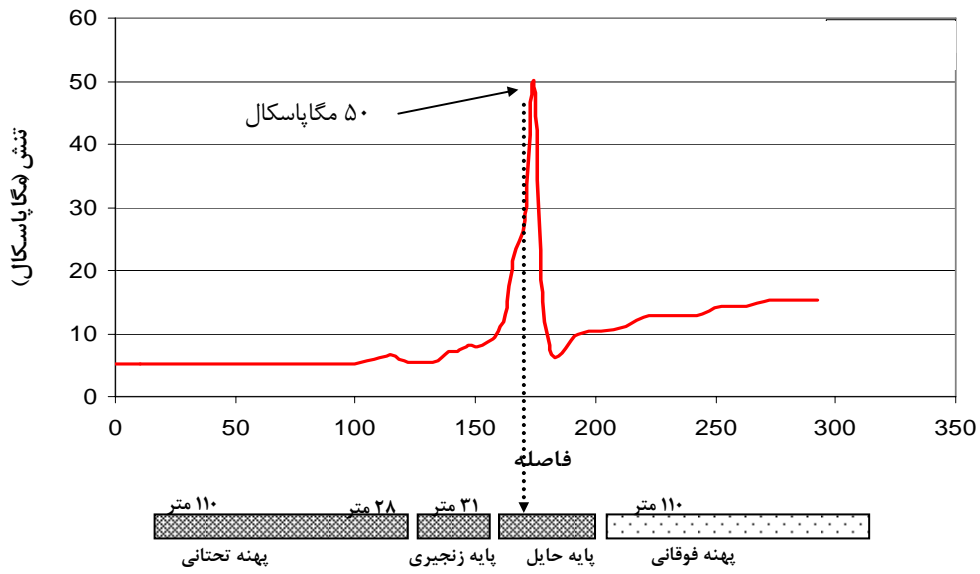
ج- با نزدیک شدن به سمت بخش‌های داخلی پایه (بخش‌های ۳ تا ۷) تنش وارد به هر بخش مذکور کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که به بخش‌هایی از پایه که در مجاورت پهنه تحتانی قرار گرفته‌اند، بیشترین تنش وارد می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

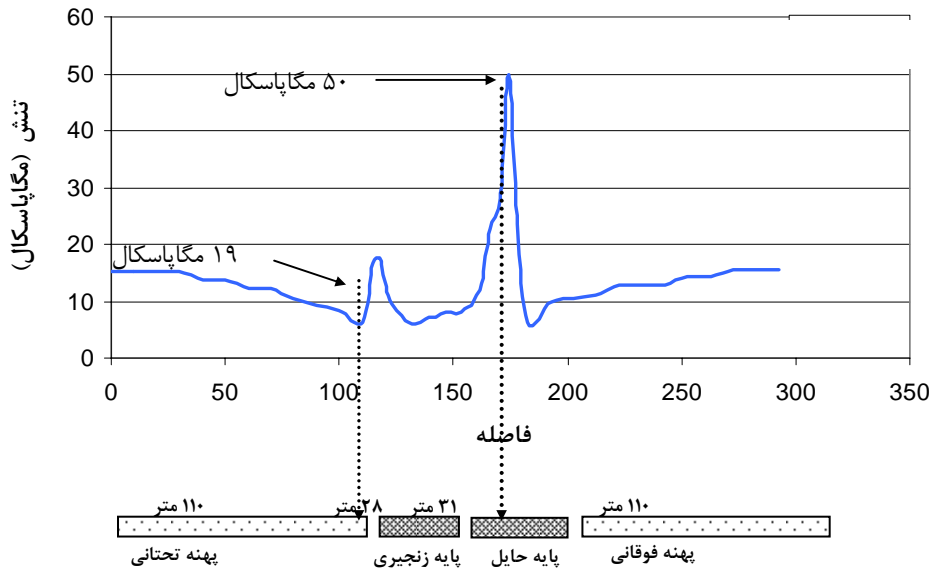
در این تحقیق، بخشی از کارگاه‌های جبهه کار بلند مکانیزه معدن زغالسنگ طبس به منظور بررسی چگونگی توزیع بار بر روی پایه‌های زنجیری به روش عددی مدل‌سازی شده است. مدل رفتاری استفاده شده در مدل‌سازی عددی، مدل کرنش نرمی است که باعث می‌شود رفتار پایه‌ها حالت واقعی‌تر خود را در قالب مدل موهر کولمب نشان دهند و بتوان رفتار پایه بعد از نقطه پیک را با دقت بیشتر بررسی کرد. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل عددی، در هنگام استخراج یک پهنه منفرد، حداکثر تنش حاصل از بارهای کناری و جلویی وارد بر پایه زنجیری به ۲۲/۵ مگاپاسکال (یعنی بیش از ۴ برابر تنش ثقلی) می‌رسد. این مقدار تنش در فاصله ۴ تا ۵ متری لبه پایه وارد می‌شود و باعث قرار گرفتن پایه در شرایط مقاومت پسماند می‌شود.

با استخراج پهنه فوقانی بیشترین تنش به ۴ تا ۵ متری لبه پایه حایل وارد می‌شود و مقدار آن به حدود ۵۰ مگاپاسکال می‌رسد. هیستوگرام‌های ثبت شده نشان می‌دهد که این قسمت از پایه پس از اعمال این مقدار تنش، قابلیت تحمل تنش نداشته و به مقاومت پسماند ۲/۵ مگاپاسکال رسیده است. این در حالی است که با کاربرد روش‌های تجربی و تحلیلی، مقدار تنش متوسط وارد بر پایه در حدود ۱۰ مگاپاسکال برآورد شده است. از طرفی با استفاده از رابطه تجربی سالامون، مقاومت پایه در حدود ۱۷ مگاپاسکال برآورد می‌شود که بر این اساس پایه دارای ضریب اطمینان بیش‌تر از ۱/۶ است و در حالت کلی پایدار به نظر می‌رسد.

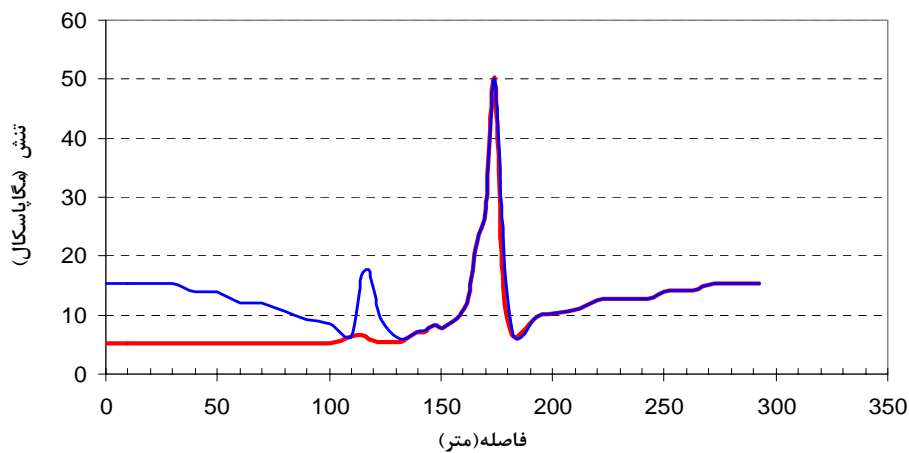
نکته قابل توجه دیگر که در این تحقیق به آن پرداخته شده این است که با عبور امتداد جبهه کار از مجاورت پایه زنجیری مفروض، شرایط توزیع تنش بر روی پایه تغییر می‌یابد و مقدار حداکثر تنش که پیش از این در نزدیکی لبه پایه قرار داشته است به بخش‌های داخلی‌تر منتقل می‌شود.



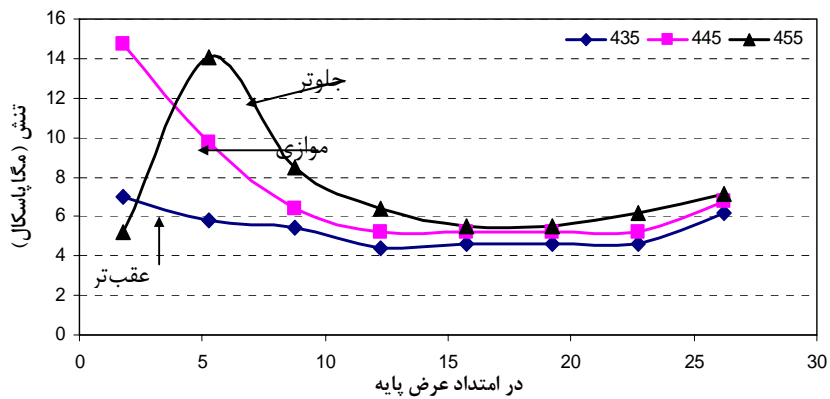
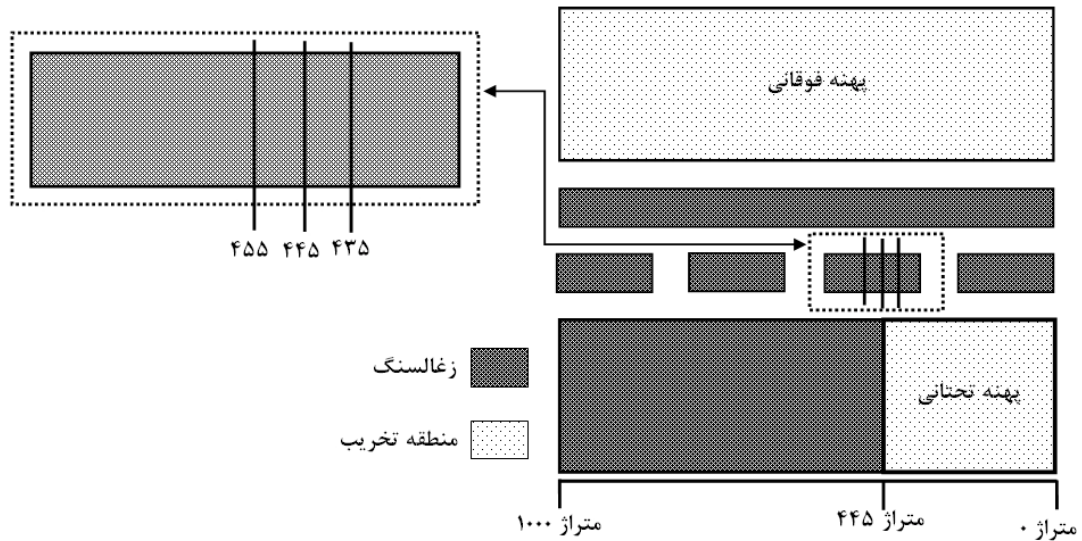
شکل ۶: توزیع تنش کناری تنها با استخراج پهنه فوقانی



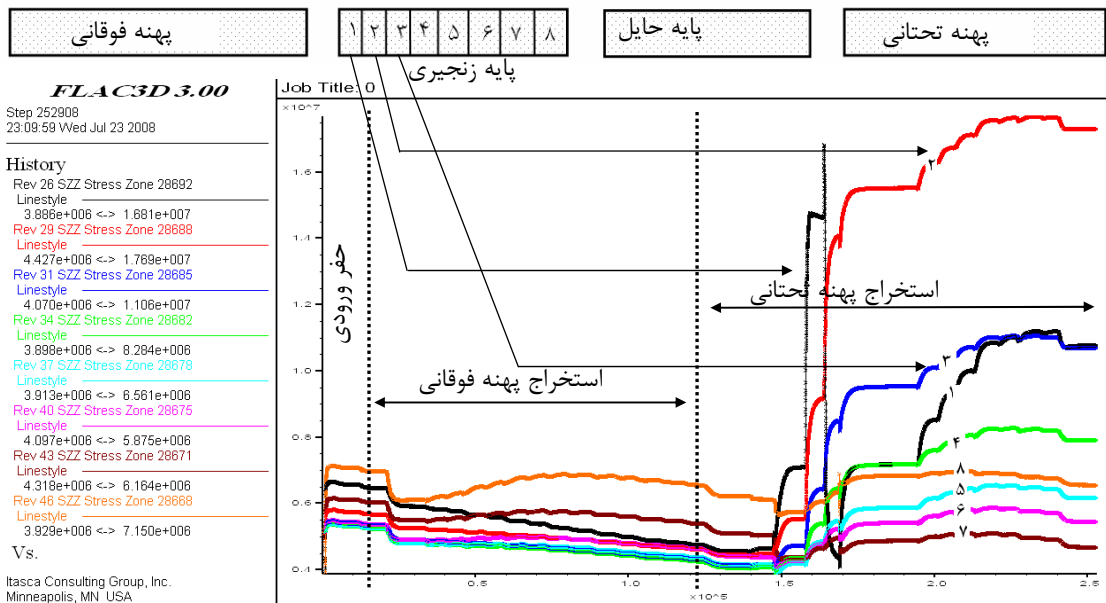
شکل ۷: توزیع تنش کناری با استخراج پهنه‌های فوقانی و تحتانی



شکل ۸: مقایسه مقادیر توزیع تنش کناری



شکل ۹: تغییرات تنش کناری بر روی پایه زنجیری نسبت به موقعیت از جبهه کار



شکل ۱۰: روند مدل شکست المان‌های جانمایی شده در امتداد عرض پایه زنجیری

منابع

- [13] Salamon M. D. G.; 1990; "*Mechanism of caving in longwall mining*", Rock mechanics contributions and challenges: Proceedings of the 31st US Symposium, Golden. pp. 161-168.
- [14] Deno M. Pappas and Christopher M.; 1993; "*Behavior of Simulated Longwall Gob Material*", United States Department of the Interior- Bureau of mines- Report of investigation No. 9458.
- [15] Badr S., Ozbay U., Kieffer S. and Salamon M.; 2004; "*Three-dimensional strain softening modeling of deep longwall coal mine layouts*", Proc. of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto Canada.
- [16] Peng S. S.; 1986; "*Coal Mine Ground Control*", A Wiley-Interscience Publication, Second Edition, pp.237-264.

پی نوشت

- <sup>1</sup> Pillar
- <sup>2</sup> Chain pillars
- <sup>3</sup> Carr and Wilson
- <sup>4</sup> Jim Walter Resource
- <sup>5</sup> Choi and McCain
- <sup>6</sup> Three Entry
- <sup>7</sup> Subsidence
- <sup>8</sup> Holland and Gaddy
- <sup>9</sup> Analysis Long-wall Pillar Stability
- <sup>10</sup> Hsiung and Peng
- <sup>11</sup> Finite Element Method
- <sup>12</sup> Front Abutment
- <sup>13</sup> Side Abutment
- <sup>14</sup> Over Burden
- <sup>15</sup> United State Bureau of Mine
- <sup>16</sup> Retreat
- <sup>17</sup> Brick Elements
- <sup>18</sup> Salamon
- <sup>19</sup> Terzaghi
- <sup>20</sup> Dilation Angle
- <sup>21</sup> Grid Force
- <sup>22</sup> Modulus Updating
- <sup>23</sup> Lithostatic
- <sup>24</sup> Abutment Pressure
- <sup>25</sup> Relaxation

- [1] Martina C. D. and Maybeeb W. G.; 2000; "*The strength of hard-rock pillar's*", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 37, pp. 1239-1246.
- [2] Murali M. G., Sheorey P. R. and Kushwaha A.; 2001; "*Numerical estimation of pillar strength in coal mines*", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 38, pp. 1185-1192.
- [3] Hartman H. L. 2002, "*introductory mining engineering*", Second edition, John Wiley & Sons, Inc., p.570.
- [4] Trent R. H. and Harrison W.; 1982; "*Longwall Mining*", Section 3 in Underground Mining Method Handbook, W.A. Hustrolid, Sco. Mng. Eng.
- [5] Badr S. A., PhD Thesis; 2004; "*Numerical Analysis of coal yield pillars at deep Longwall mines*", Department of Mining Engineering, Colorado School of mine.
- [6] Choi D. S and McCain D. L.; 1980; "*Design of longwall systems*", Trans Soc Min Eng AIME; 258, pp.1761-1764.
- [7] Hsiung S .M. and Peng S. S.; 1984; "*Chain Pillar Design for U. S. Longwall Panels*", Mining Science and Technology, pp. 305- 279.

[۸] مجله نظام مهندسی معدن شماره ۶، تابستان ۱۳۸۷ "معرفی مجتمع معدنی طیس"

- [9] Tabas Coal Mine Project Basic Design Report-Mining; 2005, Vol. 1 of 5.
- [10] Itasca Consulting Group Inc.; 2002; "*FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions)*", Version 3.0. Minneapolis, MN.

[۱۱] شعبانی مشکول م و مرتضوی ع، همتی شعبانی ع؛ ۱۳۸۵ "تحلیل عددی مقاومت پایه‌های سنگی با استفاده از پارامترهای تغییر یافته معیار هوک و براون" نشریه فنی جلد ۴۰، شماره ۱، صفحه ۹۱-۷۹.

- [12] Pappas D. M, Mark C.; 1993; "*Behaviour of simulated longwall gob material*", Report of Investigations, US Department of the Interior. Bureau of Mines, RI-9458. p. 39.