

مقاله پژوهشی

## شبیه‌سازی عددی تاثیر پارامترهای اساسی بر توزیع تنش‌های القایی طی فرآیند تخریب اول در استخراج جبهه کار طولانی

سجاد محمدی<sup>۱</sup>، محمد عطایی<sup>۲\*</sup>، رضا خالوکاکایی<sup>۳</sup>، علی میرزا قربانعلی<sup>۴</sup>

۱. دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود، sadjadmohammadi@shahroodut.ac.ir  
۲. استاد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ataei@shahroodut.ac.ir  
۳. استاد، دانشگاه صنعتی شاهرود، r\_kakie@shahroodut.ac.ir  
۴. استادیار، University of Southern Queensland، ali.mirzaghorbanali@usq.edu.au

(دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱)

### چکیده

فرآیند تخریب در روش استخراج جبهه کار طولانی به طور مستقیم بر پایداری و پیوستگی عملیات استخراج تاثیر می‌گذارد. از این رو پیش‌بینی رفتار تخریبی سقف از دو دیدگاه گام‌های تخریب و مقدار تنش‌های القایی ایجاد شده در طی آن مساله‌ای ضروری در طراحی پروژه‌های استخراج جبهه کار طولانی است. در این راستا فرآیند تخریب اول که در آن گام تخریب و تنش‌های القایی بیش از تخریب دوره‌ای است، اهمیت ویژه‌ای دارد. بر این اساس در این مقاله به بررسی تنش‌های القایی ناشی از فرآیند تخریب اول از طریق شبیه‌سازی عددی گسسته پرداخته شده است. برای این منظور تاثیر تغییرات ۵ پارامتر مقاومت کلی سقف بلاواسطه به صورت تابعی از مقاومت فشاری تک محوری لایه‌ها و ضخامت آن‌ها، ارتفاع سقف بلاواسطه، فاصله لایه‌بندی در سقف بلاواسطه، عمق معدنکاری و نسبت تنش‌های برجا بر روی بیشینه تنش‌های القایی قائم و افقی جلو و پشت جبهه کار با استفاده از نرم‌افزار UDEC مجموعاً برای ۶۲ مدل تحلیل شده است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که به جز برای نسبت تنش‌های برجا، روند تغییرات فشارهای پایه‌ای قائم و افقی جلویی و عقبی نسبت به تغییرات پارامترها یکسان است. همچنین رابطه تمام پارامترها با تنش‌های پایه‌ای به جز ارتفاع سقف بلاواسطه به صورت مستقیم است.

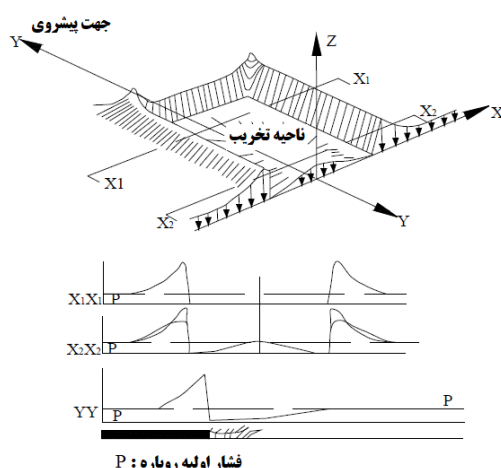
### کلمات کلیدی

استخراج جبهه کار طولانی، تخریب اول، تنش‌های القایی، شبیه‌سازی عددی گسسته، نرم‌افزار UDEC.

\* نویسنده مسئول مکاتبات.

## ۱- مقدمه

مختلفی برای محاسبه مقدار فشارهای پایه‌ای و همچنین محل مقدار بیشینه آن‌ها نسبت به جبهه کار ارایه شده است [۱۱-۲].



شکل ۱- توزیع تنش‌های القایی ناشی از استخراج پهنه [۱].

علاوه بر توسعه روش‌های تجربی و تحلیلی، پیش‌بینی مقدار این فشارها و نقش پارامترهای مختلف بر روی آن‌ها از طریق شبیه‌سازی عددی مطالعه شده است. در این راستا تاثیر پارامترهای مختلف بر روی اندازه گام تخریب و فشار وارد بر سیستم نگهداری و همچنین تاثیر عمق بر فشار پایه‌ای جلویی با استفاده از روش عددی تفاضل محدود در نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  بررسی شده است [۱۲]. یک روش بدون مش‌بندی گسسته به نام Smoothed Particle Hydrodynamic برای بررسی روند تخریب در یک معدن فرضی استخراج جبهه‌کار طولانی و شبیه‌سازی تنش‌های القایی در طی آن به کار رفته است [۱۳]. توزیع تنش‌های القایی در یک معدن زغال‌سنگ در نروژ با روش‌های پیوسته و گسسته در نرم‌افزارهای  $FLAC^{3D}$  و UDEC مطالعه شده است [۱۴]. رابطه بین توزیع فشار پایه‌ای و بعد فراکتال شبکه شکستگی‌ها در اثر تخریب تدریجی در استخراج جبهه‌کار طولانی با استفاده از روش عددی المان مجزا در نرم‌افزار UDEC مطالعه شده است [۱۵]. تغییرات تنش‌های القایی ناشی از استخراج جبهه‌کار طولانی تا زمان تخریب اول با استفاده از یک روش ابداعی برای تبدیل بلوک‌های بکر به بلوک‌های مثلثی مجزا در نرم‌افزار UDEC شبیه‌سازی شده است [۱۶]. تاثیر پایه حایل عقبی بر روی توزیع تنش‌های القایی و محل بیشینه آن‌ها حول جبهه‌کار با استفاده از شبیه‌سازی عددی پیوسته با نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  انجام شده است [۱۷]. تطابق نتایج تحلیلی در مورد توزیع تنش‌های القایی، بیشینه مقدار و محل آن نسبت به جبهه‌کار با نتایج مدل‌سازی عددی تفاضل محدود در نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸]. تاثیر وجود لایه‌های سخت و ضخیم

فرآیند تخریب لایه‌های سقف در منطقه تخریب مهم‌ترین مرحله استخراج جبهه‌کار طولانی محسوب می‌شود. این فرآیند دینامیکی پیچیده از زمان معرفی روش جبهه‌کار طولانی، هسته مرکزی مسایل و چالش‌های متعددی بوده است. دلیل اهمیت این مرحله را در تاثیر آن بر کل عملیات می‌توان جستجو کرد به نحوی که عملیات تخریب مناسب، ضامن موفقیت این روش است. اولین دلیل اهمیت این مرحله در نقش آن برای ایجاد محیطی ایمن از طریق کاهش تنش روی تجهیزات نگهداری و پایه‌ها است. بنابراین از این نظر تخریب در ایمنی محیط استخراجی موثر است. از سوی دیگر عدم تخریب به موقع سقف و هر یک از اثرات آن می‌تواند باعث آسیب به تجهیزات و مسدود شدن فضای کارگاه شود که راه‌اندازی مجدد کارگاه تخریب شده با اتلاف زیاد زغال و صرف زمان همراه خواهد بود. این موضوع باعث کاهش ضریب بهره‌وری استخراج می‌شود. بنابراین پس از برآورده کردن الزامات ایمنی، تخریب به موقع و مناسب کارگاه باعث تداوم عملیات می‌شود و به طور مستقیم بر روی تولید و بازده کلی عملیات موثر است. از طرفی چگونگی و کیفیت این عملیات تعریف‌کننده فاصله اولین ریزش و ریزش دوره‌ای و نیز باز توزیع تنش‌ها طی این مراحل است.

رویداد تخریب اول شامل فرآیندهای خمش، جدایش، ایجاد شکستگی و در نهایت ریزش تیرهای سنگی است. طی این مرحله حداکثر فشار به جبهه‌کار و وسایل نگهداری وارد می‌شود. از این‌رو مطالعه تنش‌های القایی ناشی از آن از لحاظ فشارهای پایه‌ای اهمیت زیادی دارد. مطالعه باز توزیع تنش‌های القایی طی این فرآیند دارای اهمیت زیادی در مطالعه مکانیزم تخریب، ارزیابی پایداری فضاها، کنترول سقف، انتخاب ظرفیت تجهیزات نگهداری و همچنین بررسی پدیده‌هایی مانند انفجار سنگ است. باز توزیع تنش‌های القایی را می‌توان از دو نظر روند تغییرات و بیشینه مقدار مورد بررسی قرار داد. در این راستا بیشینه تنش‌های القایی ایجاد شده را فشارهای پایه‌ای (تکیه‌گاهی) می‌نامند که به صورت فشار پایه‌ای جلویی، عقبی و جانبی در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۱).

به دلیل عدم دسترسی به ناحیه تخریب و همچنین وجود پتانسیل خطر در این ناحیه روش‌های مستقیم اندازه‌گیری تنش و تغییر شکل ناشی از استخراج و تخریب بسیار مشکل است. از این رو تاکنون روش‌های غیرمستقیم شامل مدل‌سازی فیزیکی، تحلیلی، تجربی و عددی برای مطالعه تنش‌های القایی در فرآیند تخریب اول مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این راستا روابط

تدریجی لایه‌ها در اثر استخراج جبهه‌کار طولانی مناسب‌ترند. یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی گسسته نرم‌افزار UDEC بر اساس روش عددی المان مجزا است. با این وجود این روش‌ها نیز دارای یک محدودیت عمده‌اند. در این روش‌ها شکستگی‌ها فقط می‌توانند در طول ناپیوستگی‌های از قبل موجود در مدل توسعه پیدا کنند. البته این مشکل در نرم‌افزار UDEC از طریق ابزار Voronoi Tesselation که سقف را به مجموعه‌ای از بلوک‌های به هم متصل تقسیم می‌کند برطرف شده است. با این وجود مشکل موجود در این حالت نیاز به واسنجی مدل برای تعیین خواص میان این بلوک‌ها است؛ بنابراین کاربرد این ابزارها برای مدل‌های کلی با محدودیت روبرو است و برای اهدافی مناسب‌اند که مدل‌سازی به صورت ویژه برای یک مطالعه موردی انجام می‌گیرد.

در این مقاله از نرم‌افزار UDEC برای شبیه‌سازی فرآیند تخریب در استخراج جبهه‌کار طولانی استفاده شده است. هدف مقاله ساخت مدل‌های مفهومی کلی و مدل‌سازی برای یک معدن مشخص، انجام نگرفته است. در ادامه اطلاعات مربوط به فرآیند شبیه‌سازی ارائه شده است.

## ۲-۱- هندسه و شرایط مرزی

همه مدل‌های ساخته شده دارای پنج قسمت کف، لایه زغال‌سنگ، سقف بلاواسطه، سقف اصلی اول و سقف اصلی دوم بوده‌اند. برای تمام مدل‌ها ضخامت کف برابر با ۵۰ متر و ضخامت سقف اصلی برابر با ۵۰ متر در نظر گرفته شده است. برای افزایش سرعت شبیه‌سازی، سقف اصلی به دو قسمت ۲۵ متری با عنوان سقف اصلی ۱ و ۲ تقسیم شده است که تفاوت آن‌ها در فاصله درزه‌داری و لایه‌بندی است به طوری که فاصله لایه‌بندی در سقف اصلی اول و دوم به ترتیب ۱ و ۲ متر و فاصله‌داری درزه‌های متقاطع به ترتیب برابر با ۲ و ۴ متر منظور شده است. این مقادیر برای تمامی مدل‌ها یکسان بوده است. مقدار ارتفاع سقف بلاواسطه نیز بر اساس استدلال مرجع [۱۴] برای تمام مدل‌ها ۲/۵ برابر ضخامت لایه استخراجی در نظر گرفته شده است. در مدل‌ها ارتفاع کارگاه دقیقاً برابر با ضخامت لایه زغال‌سنگ فرض شده است. درزه‌داری و لایه‌بندی سقف‌های اصلی در تمام مدل‌ها برابر بوده به طوری که فاصله لایه‌بندی در سقف اصلی اول و دوم به ترتیب ۱ و ۲ متر و فاصله‌داری درزه‌های متقاطع به ترتیب برابر با ۲ و ۴ متر منظور شده است.

ابعاد افقی مدل‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که تنش‌های مرزی مدل در اثر استخراج پهنه بدون تغییر باقی بمانند؛ بنابراین بر اساس پیشنهاد مرجع [۲۰] برای طول

سنگ‌های آذرین در ساختارهای زغال‌سنگی بر روی توزیع تنش و انرژی با نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> مطالعه شده است [۱۹].

با وجود این مطالعات، بررسی جامعی برای مطالعه رابطه پارامترهای اساسی با مقدار فشارهای پایه‌ای با توجه به ساختارهای مختلف سقف بلاواسطه انجام نگرفته است. علاوه بر این غالب مطالعات عددی انجام گرفته با استفاده از شبیه‌سازی پیوسته انجام شده‌اند. این در حالی است که روش‌های پیوسته عددی در شبیه‌سازی محیط‌های ناپیوسته، به هنگام تعریف ناپیوستگی‌ها و رفتار معرف سنگ درزه‌دار محدودیت‌هایی شامل تعداد درزه‌ها، گستره و وسعت درزه‌های متقاطع، مقدار جابه‌جایی و عدم کارایی محاسباتی ناشی از رفتار پیوسته دارند [۱۵]. این محدودیت‌ها در شبیه‌سازی فرآیند تخریب به صورت عدم توانایی در مدل کردن انواع ناپیوستگی‌های از قبل موجود در ساختارها مانند لایه‌بندی و درزه‌ها در سنگ، فرآیند شکستگی و گسترش آن، خردایش، تغییر شکل‌های بزرگ مواد و همچنین جریان مواد در طی فرآیند تخریب بروز پیدا می‌کنند [۱۳ و ۱۶]. از همین رو روش‌های گسسته برای شبیه‌سازی استخراج جبهه‌کار طولانی و فرآیند تخریب مناسب‌ترند.

بر این اساس هدف این مقاله بررسی نقش پارامترهای اساسی بر روی مقدار فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی عمودی و افقی طی فرآیند تخریب اول با توجه به ساختارهای مختلف سقف بلاواسطه با استفاده از شبیه‌سازی عددی گسسته در نرم‌افزار UDEC است.

## ۲-۲- روش شبیه‌سازی استخراج جبهه‌کار طولانی

برای شبیه‌سازی عددی فرآیند تخریب اول در استخراج جبهه‌کار طولانی از دو رویکرد پیوسته یا ناپیوسته می‌توان استفاده کرد. شبیه‌سازی پیوسته برای شبیه‌سازی تخریب در روش جبهه‌کار طولانی با دو محدودیت عمده مواجه است [۱۴]:

- تولید و توسعه شکستگی‌ها به طور واضح قابل تشخیص نیستند و ناحیه تخریب و شکستگی به صورت مستقیم تعیین و شناسایی نمی‌شوند و باید از طریق فرض‌های مبتنی بر جابه‌جایی و کرنش پلاستیک در مورد آن‌ها تصمیم‌گیری کرد.
- در نظر گرفتن مستقیم ناپیوستگی‌های از قبل موجود در مدل شامل صفحات لایه‌بندی و سیستم درزه‌ها با جزئیات مورد نیاز مشکل است.

از این رو روش‌های گسسته برای شبیه‌سازی تخریب

کرنش سخت‌شونده- نرم‌شونده رفتار غیرخطی سخت‌شوندگی یا نرم‌شوندگی مواد را بر اساس تغییر خواص مدل موهر-کلمب (شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع و مقاومت کششی) از حالت بیشینه به شرایط پسماند تعریف می‌کند در حالی که در مدل اصلی موهر-کلمب این مقادیر ثابت‌اند. در این مدل، تغییرات پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و اتساع از حالت بیشینه به پسماند هم در حالت سخت‌شونده و هم نرم‌شونده تابعی از کرنش برشی پلاستیک و برای مقاومت کششی در حالت نرم‌شونده تابعی از کرنش کششی پلاستیک است. این انعطاف‌پذیری باعث کاربرد مدل در شبیه‌سازی شرایط پساخشست (مانند ریزش تدریجی، تسلیم پایه‌ها و تخریب تدریجی) می‌شود. تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که حساسیت نتایج شبیه‌سازی با این مدل نسبت به تغییرات مقادیر بیشینه پارامترها بیش‌تر از حساسیت آن نسبت به تغییرات مقادیر پسماند است. چالش اصلی در کاربرد این مدل تعیین مقدار کرنش پلاستیکی است که در آن مواد به بیشینه خواص مقاومتی خود می‌رسند و پس از آن خواص آن‌ها در حالت پسماند است. از این‌رو تعیین دقیق مقادیر بیشینه و پسماند پارامترهای یاد شده و میزان کرنشی که در آن خواص از حالت بیشینه به حالت پسماند تغییر می‌کنند، مهم‌ترین مساله این روش است [۲۱] و [۱۵]. مدل رفتاری مناسب برای تمام ناپیوستگی‌ها بر اساس مطالعات پیشین مدل مور-کولمب است؛ بنابراین در این مقاله مدل مور-کولمب برای ناپیوستگی‌ها انتخاب شده است.

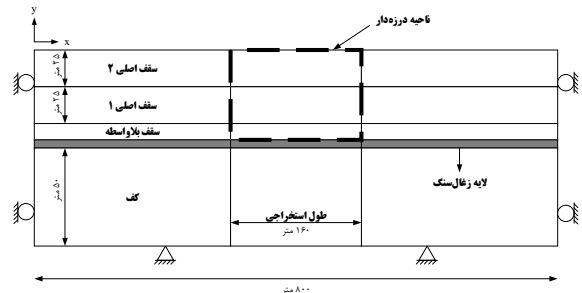
### ۲-۳- خواص مواد

ویژگی‌های ژئومکانیکی بلوک‌های سنگی و درزه‌ها بر اساس مقدار متوسط حاصل از پهنه‌های مختلف و همچنین مقادیر استاندارد و معمول پارامترها در مطالعات قبلی فرض شده است [۱۴ و ۳۱-۲۲]. جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب مقادیر پارامترهای مربوط به بلوک‌های سنگی و ناپیوستگی‌های مورد استفاده در مقاله را نشان می‌دهند.

جدول ۱- مشخصات ژئومکانیکی بلوک‌های سنگی.

نوع سنگ	$\sigma_{ci}$ (MPa)	E (GPa)	P (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	C (MPa)	$\phi$ (°)	$\psi$ (°)	$C_r$ (MPa)	$\phi_r$ (°)	$\psi_r$ (°)
لای سنگ	۱۰	۳/۱۰	۲۶۰۰	۰/۲۵	۲/۲۱	۳۷/۰۷	۵	۰/۲۲	۲۴/۷۱	۳/۳۳
شیل	۳۶	۱۱/۱۶	۲۶۰۰	۰/۲۵	۸/۳۱	۳۸/۹۱	۵	۰/۸۳	۲۵/۹۴	۳/۳۳
ماسه سنگ ۱	۷۵	۲۳/۲۵	۲۶۰۰	۰/۲۵	۱۴/۳۰	۴۵/۷۳	۵	۱/۴۳	۳۰/۵۰	۳/۳۳
ماسه سنگ ۲	۱۵۰	۴۶/۵۰	۲۶۰۰	۰/۲۵	۲۸/۶۱	۴۵/۷۳	۵	۲/۸۶	۳۰/۵۰	۳/۳۳
زغال سنگ	۱۵	۲/۰۰	۱۵۰۰	۰/۴۰	۵/۸۰	۱۵/۲۸	۲	۰/۵۸	۱۰/۲۰	۱/۳۳
کف و سقف اصلی	۱۲۰	۳۷/۲۰	۲۶۰۰	۰/۲۵	۲۴/۲۰	۴۳/۰۰	۵	۲/۴۲	۲۸/۶۷	۳/۳۳

استخراجی  $a$ ، مرزهای راست و چپ مدل به فاصله  $۲/۵$  برابر  $a$  از مرکز ناحیه مورد نظر برای استخراج در نظر گرفته شده‌اند. مرز پایینی مدل (کف مدل) در دو راستای افقی و قائم و مرزهای چپ و راست مدل فقط در راستای افق ثابت شده‌اند تا در این راستاها اجازه جابه‌جایی نداشته باشند. شکل ۲ هندسه کلی مدل را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.



شکل ۲- هندسه و شرایط مرزی مدل‌های ساخته شده.

تنش برجای قائم اعمال شده به مدل ناشی از وزن روباره است (با اعمال وزن مخصوص ۲۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب). از آنجایی که نقش تنش برجا افقی خارج از صفحه در شبیه‌سازی ۲ بعدی قابل شناسایی نیست [۱۶] بنابراین مقدار تنش‌های برجا افقی بیشینه و کمینه برابر با یکدیگر در نظر گرفته شده است. در این حالت تنش‌های برجای افقی با مقدار یکسان و در دو حالت عمود و موازی با جبهه کار بر مدل اعمال شده‌اند. در این شرایط شبیه‌سازی به صورت کرنش صفحه‌ای انجام گرفته است.

### ۲-۲- مدل‌های رفتاری

در شبیه‌سازی گسسته استخراج جبهه کار طولانی و فرآیند تخریب در آن به سه مدل رفتاری مجزا برای بلوک‌های سنگی، مواد خرد شده در ناحیه تخریب و درزه‌ها نیاز است.

مدل رفتاری مناسب برای بلوک‌های سنگی در حالت تخریب تدریجی بر اساس مطالعات گذشته و همچنین پیشنهاد شرکت Itasca مدل کرنش سخت‌شونده- نرم‌شونده است. از این‌رو این مدل برای بلوک‌های سنگی در این مقاله انتخاب شده است. مدل

جدول ۲- مشخصات مکانیکی ناپیوستگی‌ها.

پارامتر	C (Mpa)	$\phi$ (°)	$\sigma_i$ (Mpa)	$K_n$ (GPa/m)	$K_s$ (GPa/m)
مقدار	۰	۳۰	۰	۱۰۰	۱۰

سقف بلاواسطه دارای سنگ‌شناسی و مقاومت‌های مختلف به صورت شکل ۳ مدنظر قرار گرفته است.

جدول ۳- شرایط پایه.

پارامتر	مقدار
ضخامت لایه زغال سنگ	۲ (متر)
ارتفاع سقف بلاواسطه	۵ (متر)
عمیق معدنکاری	۳۰۰ (متر)
نسبت تنش‌های برجا	۱
فاصله‌داری لایه‌بندی	۰/۵ (متر)
تعداد دسته درزه	۱
شیب دسته درزه	۹۰°
جهت‌یافتگی دسته درزه	موازی جبهه کار
فاصله‌داری دسته درزه	۱ (متر)
تداوم دسته درزه	۰/۵ (متر)

### ۳-۱- اثر مقاومت فشاری سقف بلاواسطه بر تنش‌های القایی

مقاومت کلی سقف بلاواسطه حاصل برآیند مقاومت و ضخامت لایه‌های مختلف آن است. از این رو پارامتر مقاومت معادل سقف بلاواسطه به صورت رابطه (۲) تعریف شده است:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \times \sigma_{ci}}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2)$$

که در آن:

$t_i$ : ضخامت لایه نام (متر).

$\sigma_{ci}$ : مقاومت فشاری تک محوری بکر لایه نام در سقف بلاواسطه بر حسب (مگاپاسکال).

$n$ : تعداد لایه‌های سقف بلاواسطه.

با استفاده از رابطه ۱ مقاومت فشاری معادل سقف‌های ۱ تا ۴ در شکل ۳ به ترتیب برابر با ۲۵/۶، ۵۶/۲، ۸۴/۲ و ۱۵۰ مگاپاسکال محاسبه شده است. شکل‌های ۴ و ۵ نمودار تغییرات تنش‌های القایی قائم و افقی در زمان تخریب اول را برای نقاط مختلف ارتفاع سقف بلاواسطه نمایش می‌دهند. پیوست ۱ نحوه بازتوزیع تنش‌های القایی افقی و قائم و جابه‌جایی‌های قائم رخ داده در سقف ۳ از زمان آغاز استخراج تا تخریب اول را نمایش می‌دهد.

با توجه به استفاده از مدل کرنش نرم‌شونده، مقادیر پسماند خواص مقاومتی سنگ‌ها به صورت رابطه ۱ محاسبه شده است: [۲۰ و ۳۲]:

$$C_r = 0.1 C_p, \phi_r = \frac{2}{3} \phi_p, \psi_r = \frac{2}{3} \psi_p, \sigma_{ir} = 0 \quad (1)$$

که در آن:

اندیس  $r$  مقدار پسماند.

اندیس  $P$  مقدار بیشینه.

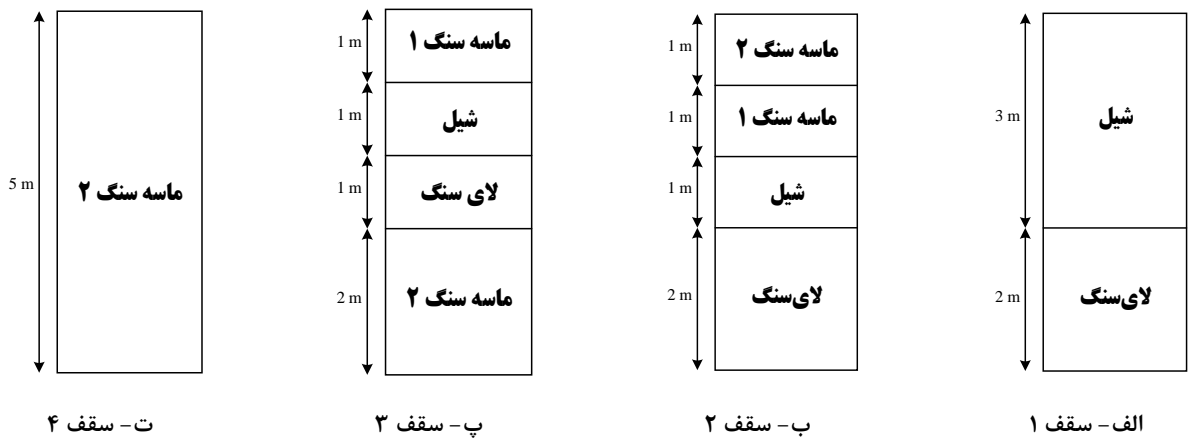
مقدار کرنش برشی پلاستیک بحرانی برای تغییر حالت خواص چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و اتساع مواد از بیشینه به پسماند برابر با ۰/۱ درصد و مقدار کرنش کششی پلاستیک بحرانی برای تغییر حالت مقاومت کششی از حالت بیشینه به پسماند برابر با ۵ درصد در نظر گرفته شده است. [۱۴ و ۳۱-۳۳].

### ۳-۲- شبیه‌سازی استخراج

استخراج هر پهنه به صورت پسررو از سمت چپ مدل و از ابتدای پایه حایل شروع می‌شود. برای استخراج، در ابتدا ۵ متر از لایه زغال به عنوان اتاقک نصب تجهیزات استخراج شده و پس از آن سیستم نگهداری قدرتی در آن نصب می‌شود. پس از این مرحله لایه زغال سنگ با توجه به آهنگ پیشروی ۵ متر در هر مرحله استخراج شده و سیستم نگهداری به محل جدید انتقال یافته است. سیستم نگهداری در نظر گرفته شده در جبهه کار دارای سفتی برابر با ۳۰ (MN/m) با ظرفیت ۷/۵ (MN) بوده است.

### ۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

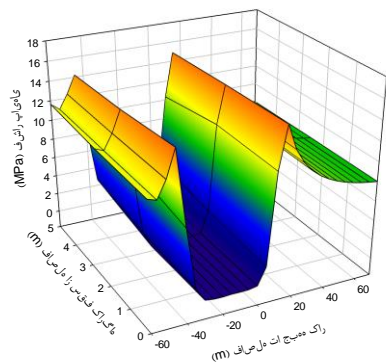
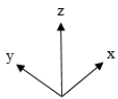
پارامترهای مورد مطالعه در این مقاله شامل مقاومت سقف بلاواسطه، ارتفاع سقف بلاواسطه، فاصله‌داری لایه‌بندی در سقف بلاواسطه، عمق معدنکاری (معادل با تنش برجا عمودی) و نسبت تنش‌های برجا (با هدف مطالعه تنش برجا افقی) است. برای این هدف در ابتدا شرایط پایه (که برای تمام مدل‌ها یکسان است) تعریف شده و سپس در هر مرحله برای بررسی نقش هر پارامتر فقط مقدار آن پارامتر متغیر است و دیگر پارامترها در شرایط پایه ثابت نگه داشته شده‌اند. جدول ۳ اطلاعات شرایط پایه را ارائه می‌دهد. برای مطالعه نقش ترکیب‌های مختلف سقف بلاواسطه در این مقاله چهار نوع



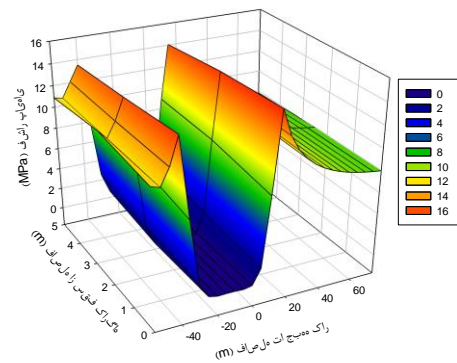
شکل ۳- چهار نوع سقف مورد مطالعه.

بلاواسطه) برای پایش میزان تنش‌ها انتخاب شده است. سپس مقدار تنش در هر یک از این خط برداشت‌ها با فاصله ۵ متر در راستای محور x ثبت شده است. سپس در نمودار SigmaPlot ۷.12 با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایگی مقدار تنش نقاط میان درونیابی شده و نمودارهای سه‌بعدی مربوطه ترسیم شده است.

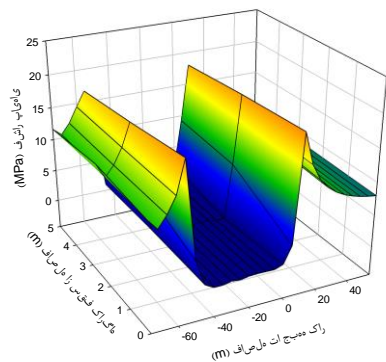
در شکل‌های ۴ و ۵ محور x راستای طول پهنه است که نقطه صفر در آن محل جبهه‌کار را نشان می‌دهد. همچنین محور y راستای سقف است که در حقیقت فاصله از سقف کارگاه را نشان می‌دهد. محور z نیز نشان‌دهنده مقدار تنش‌های القایی است. برای ترسیم این شکل‌ها در ابتدا سه خط برداشت مختلف در امتداد طول کارگاه (محور x) با فواصل صفر، ۲/۵ و ۵ متر از سقف کارگاه (محل جدایش لایه زغال‌سنگ از سقف



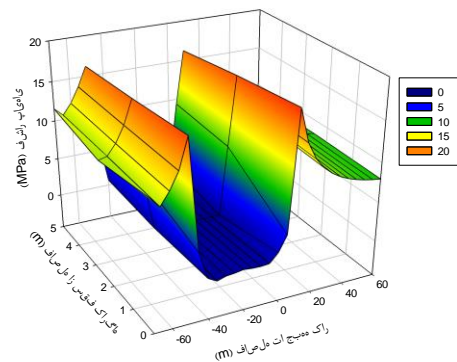
ب- سقف ۲



الف- سقف ۱

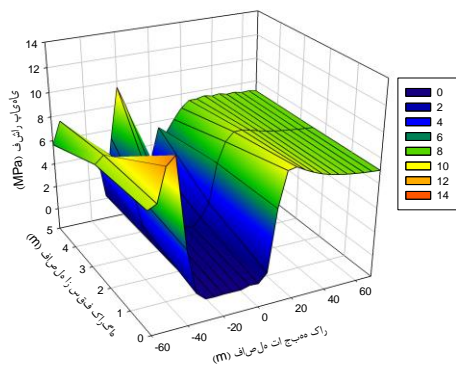
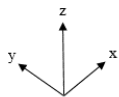


ت- سقف ۴

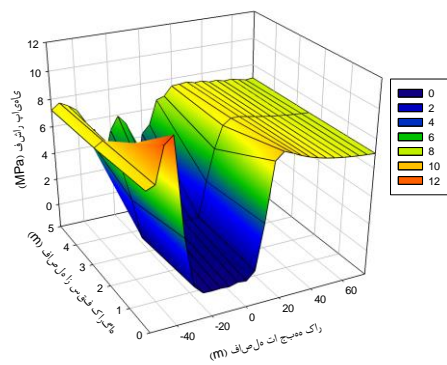


پ- سقف ۳

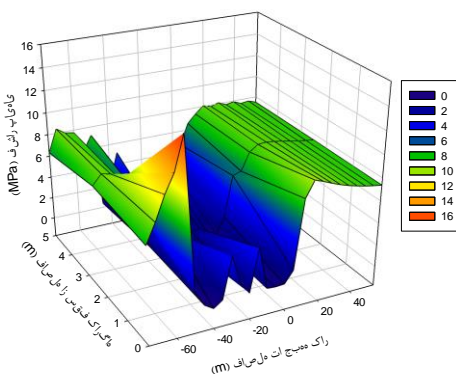
شکل ۴- توزیع تنش پایه‌ای قائم طی فرآیند تخریب اول در طول پهنه و سقف بلاواسطه.



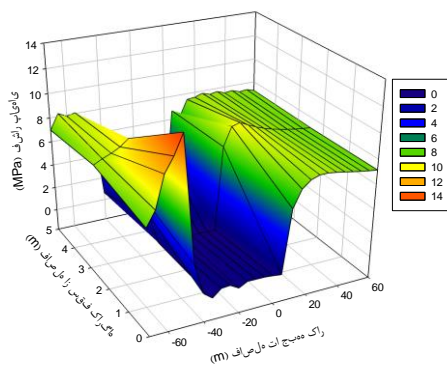
ب- سقف ۲



الف- سقف ۱



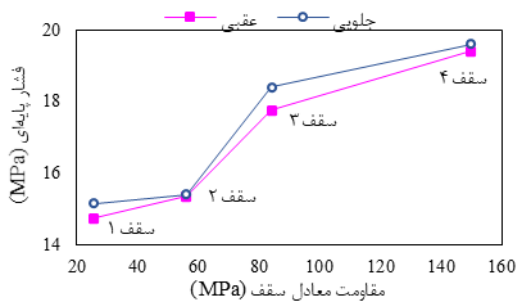
ت- سقف ۴



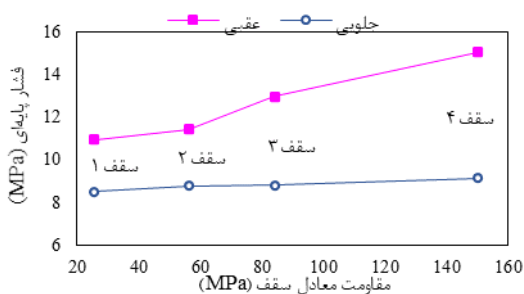
پ- سقف ۳

شکل ۵- توزیع تنش پایه‌ای افقی طی فرآیند تخریب اول در طول پهنه و سقف بلاواسطه.

مشاهده می‌شود که مقدار فشار پایه‌ای جلویی بیش از مقدار عقبی آن است.



الف- فشار پایه‌ای قائم



ب- فشار پایه‌ای افقی

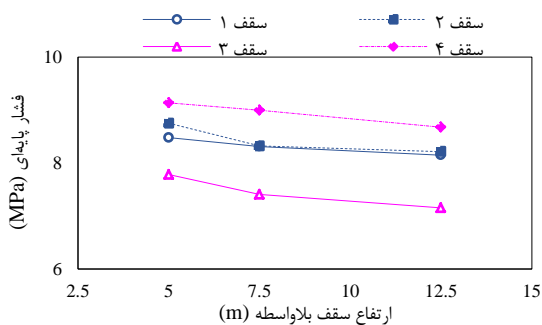
شکل ۶- تغییرات بیشینه فشارهای پایه‌ای نسبت به مقاومت سقف.

در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، بیشینه تنش‌های القایی افقی و قائم در طول سقف بلاواسطه همواره در نزدیکی پایه حایل (نقطه ابتدای استخراج) و در جلوی جبهه‌کار به صورت فشارهای پایه‌ای عقبی و جلویی ایجاد شده است. همچنین در طول دهانه تخریب ناحیه رهاسازی تنشی قابل مشاهده است. از سوی دیگر، شکل‌ها نشان می‌دهند که با افزایش فاصله از خط سقف کارگاه به سمت انتهای سقف بلاواسطه مقدار تنش‌های القایی کاهش می‌یابند؛ بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که بیشینه تنش‌های القایی به صورت فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی و بر روی خط سقف کارگاه رخ می‌دهند. از این رو در بخش‌های بعدی، تغییرات تنش‌های القایی افقی و قائم بررسی شده به صورت بیشینه فشارهای پایه‌ای جلویی و افقی بر روی سقف کارگاه خواهد بود.

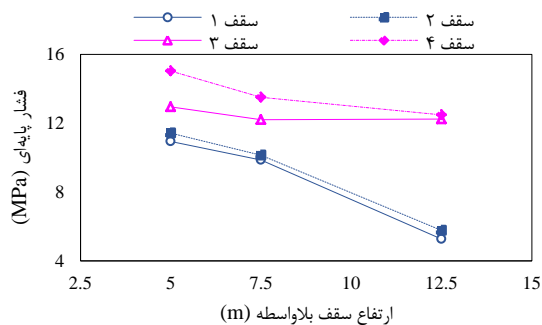
شکل ۶ تغییرات بیشینه فشارهای پایه‌ای افقی و قائم را نسبت به مقاومت معادل سقف نمایش می‌دهد. در شکل ۶-الف ملاحظه می‌شود که مقدار فشار پایه‌ای عقبی و جلویی قائم دارای رابطه مستقیم با مقاومت سقف بلاواسطه است. بر این اساس با افزایش مقاومت سقف بلاواسطه از ۲۵/۶ تا ۱۵۰ مگاپاسکال، مقدار فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی قائم به ترتیب از ۱۵/۱۵ تا ۱۹/۶۰ و از ۱۴/۷۴ تا ۱۹/۴۱ تغییر می‌کند.

بلاواسطه دارای الگوی یکسانی به صورت تابع نمایی کاهش است. این کاهش برای بیشینه فشارهای پایه‌ای جلویی از ۵/۸۷ تا ۲۱/۷۳ درصد و برای بیشینه فشارهای پایه‌ای عقبی از ۹/۱۶ تا ۱۵/۴۳ درصد است. بر این اساس مشخص می‌شود که آهنگ تغییرات فشارهای پایه‌ای برای سقف‌های مستحکم‌تر (سقف‌های ۳ و ۴) بیش از آهنگ تغییرات در سقف‌های ضعیف‌تر (سقف‌های ۱ و ۲) است. همچنین ملاحظه می‌شود که آهنگ تغییرات در سقف‌های ضعیف‌تر در فشارهای پایه‌ای عقبی بیش از تغییرات در فشارهای پایه‌ای جلویی است در حالی که برای سقف‌های مستحکم‌تر برعکس است.

شکل ۸ نتایج مدل‌سازی فشارهای پایه‌ای افقی نسبت به تغییرات ارتفاع سقف بلاواسطه را نشان می‌دهد.



الف- فشار پایه‌ای جلویی



ب- فشار پایه‌ای عقبی

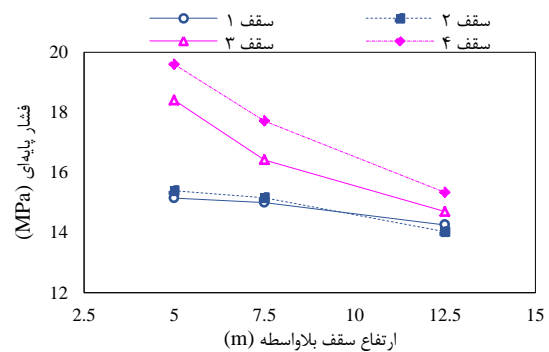
شکل ۸- تغییرات بیشینه فشارهای پایه‌ای افقی نسبت به ارتفاع سقف بلاواسطه.

شکل ۸- الف نشان می‌دهد که فشارهای پایه‌ای جلویی با آهنگ بسیار پایینی (از ۳/۹۱ تا ۸/۰۸ درصد) نسبت به افزایش ارتفاع سقف بلاواسطه کاهش می‌یابند. در شکل ۸- ب مشاهده می‌شود که اگرچه فشارهای پایه‌ای عقبی افقی با ارتفاع سقف بلاواسطه دارای رابطه معکوس‌اند اما الگوی کاهش سقف‌های ضعیف و سقف‌های مستحکم با یکدیگر متفاوت است. بر این اساس سقف‌های ضعیف با ارتفاع سقف بلاواسطه دارای رابطه لگاریتمی کاهش‌یابند و رابطه سقف‌های مستحکم با ارتفاع سقف

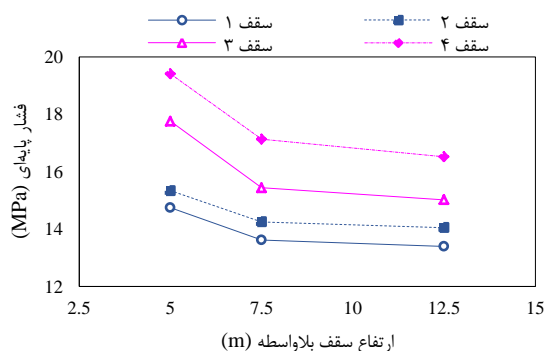
شکل ۶- ب نشان می‌دهد فشارهای پایه‌ای افقی نیز دارای رابطه مستقیم با مقاومت معادل سقف بلاواسطه است. البته آهنگ تغییرات فشار پایه‌ای جلویی نسبت به مقاومت معادل سقف بلاواسطه بسیار کم است به طوری که با تغییر مقاومت سقف بلاواسطه به اندازه ۱۲۴/۴ مگاپاسکال، فشار پایه‌ای جلویی ۰/۶۶ تغییر کرده است؛ اما این مقدار افزایش برای فشار پایه‌ای عقبی برابر با ۴/۱ مگاپاسکال است. در اینجا بر خلاف فشارهای پایه‌ای قائم مشاهده می‌شود که مقدار فشار پایه‌ای عقبی بیش از مقدار جلویی آن است.

۳-۲- اثر ارتفاع سقف بلاواسطه بر تنش‌های قائمی

برای مطالعه تاثیر ارتفاع سقف بلاواسطه بر فشارهای پایه‌ای، سه سقف بلاواسطه ۵، ۷/۵ و ۱۲/۵ متر (معادل با ارتفاع لایه زغال سنگ ۲، ۳ و ۵ متر) مدل‌سازی شده است. شکل ۷ نتایج فشارهای پایه‌ای قائم جلویی و عقبی را نمایش می‌دهد.



الف- فشار پایه‌ای جلویی



ب- فشار پایه‌ای عقبی

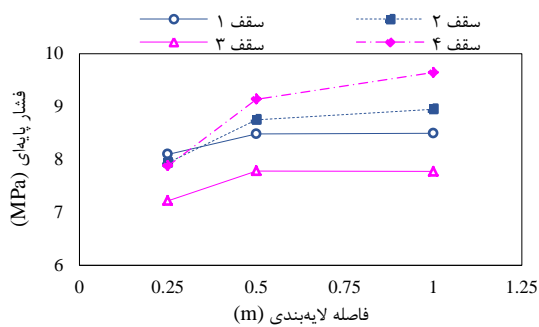
شکل ۷- تغییرات بیشینه فشارهای پایه‌ای قائم نسبت به ارتفاع سقف بلاواسطه.

شکل ۷ نشان می‌دهد که بیشینه فشارهای پایه‌ای قائم جلویی و عقبی دارای رابطه معکوس با ارتفاع سقف بلاواسطه است. بر اساس این شکل می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی نسبت به تغییرات ارتفاع سقف

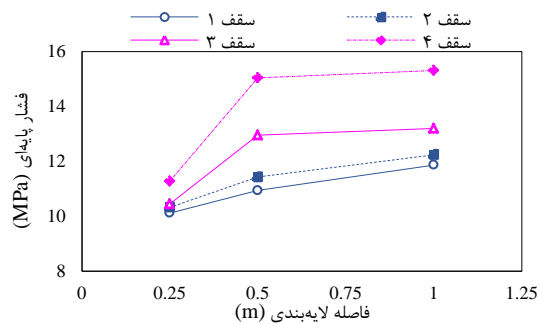


۲۲/۴۷ درصد) است. نتیجه حاصل شده دیگر این است که هم برای فشارهای پایه‌ای جلویی و هم عقبی تغییرات تنشی در سقف‌های ضعیف‌تر کمتر از سقف‌های مستحکم‌تر بوده است. نکته قابل ذکر اینکه بیشترین تغییرات برای هر دو فشار پایه‌ای جلویی و عقبی متعلق به سقف ۳ بوده است.

شکل ۱۰ نتایج حاصل از مدل‌سازی تغییرات فشارهای پایه‌ای افقی نسبت به فاصله لایه‌بندی در سقف بلاواسطه را نمایش می‌دهد.



الف- فشار پایه‌ای جلویی



ب- فشار پایه‌ای عقبی

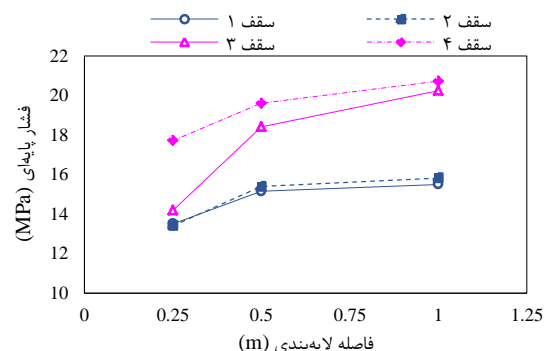
شکل ۱۰- تغییرات بیشینه فشارهای پایه‌ای افقی نسبت به فاصله لایه‌بندی.

در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی افقی دارای ارتباط مستقیم با مقدار فاصله لایه‌بندی در سقف بلاواسطه‌اند. نتایج نمایش داده شده در این شکل مشخص می‌کند که آهنگ تغییرات فشار پایه‌ای عقبی در تمام سقف‌ها (از ۱۴/۷۴ تا ۲۶/۳۹ درصد) نسبت به تغییر ۴ برابری فاصله لایه‌بندی بیش از آهنگ تغییرات فشار پایه‌ای جلویی (از ۴/۹۰ تا ۲۲/۳۹ درصد) است. همچنین مشاهده می‌شود رابطه فشارهای پایه‌ای با فاصله لایه‌بندی برای سقف‌های ضعیف تقریباً به صورت خطی است، در حالی که این رابطه برای سقف‌های مستحکم از تابع لگاریتمی افزایشی پیروی می‌کند. برای فشار پایه‌ای جلویی افزایش فشار پایه‌ای متناسب با مقاومت سقف نبوده است، به طوری که سقف ۳ برای مقادیر

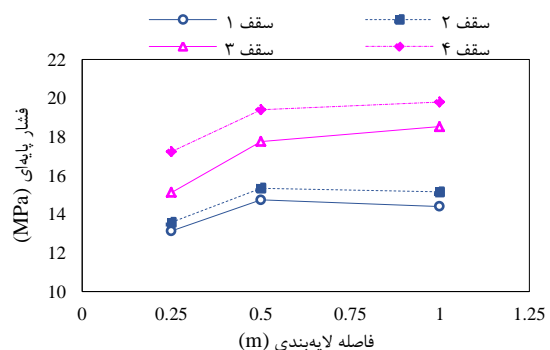
بلاواسطه به صورت رابطه درجه ۲ نزولی است. همچنین مشخص می‌شود که آهنگ تغییرات فشارهای پایه‌ای عقبی (از ۵/۴۸ تا ۵۱/۹۹ درصد) بیش از فشارهای پایه‌ای جلویی است.

### ۳-۳- اثر فاصله لایه‌بندی‌ها در سقف بلاواسطه بر تنش‌های القایی

برای مطالعه نقش فاصله لایه‌بندی‌های موجود در سقف بلاواسطه بر روی فشارهای پایه‌ای، سه مقدار مختلف فاصله لایه‌بندی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ متری در مدل‌سازی تخریب اول بررسی شده است. تغییرات فشارهای پایه‌ای قائم نسبت به فاصله لایه‌بندی در شکل ۹ ارائه شده است.



الف- فشار پایه‌ای جلویی

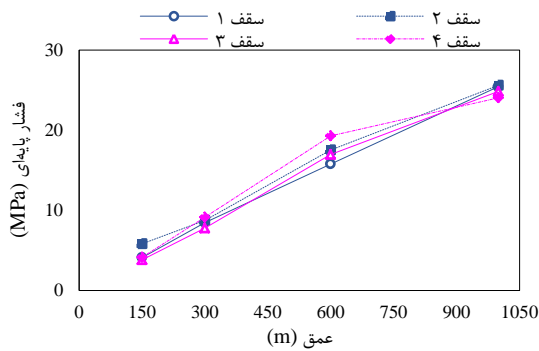


ب- فشار پایه‌ای عقبی

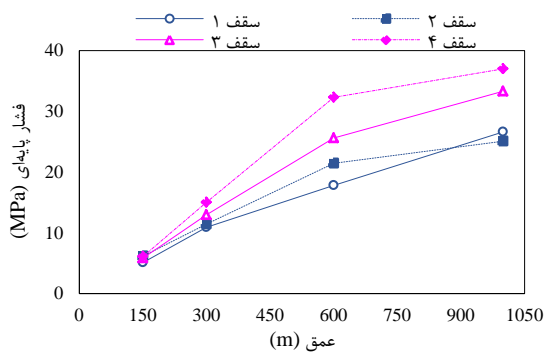
شکل ۹- تغییرات بیشینه فشارهای پایه‌ای قائم نسبت به فاصله لایه‌بندی.

شکل ۹ نشان می‌دهد که فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی قائم با فاصله لایه‌بندی دارای ارتباط مستقیم‌اند. همچنین الگوی افزایشی فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی یکسان و به صورت لگاریتمی افزایشی است. همچنین ملاحظه می‌شود که همواره افزایش مقاومت سقف بلاواسطه برای یک فاصله لایه‌بندی یکسان همراه با افزایش فشار پایه‌ای است. از سوی دیگر آهنگ تغییرات فشار پایه‌ای جلویی (از ۱۴/۷۳ تا ۱۷/۶۴ درصد) بیش از تغییرات فشارهای پایه‌ای عقبی (از ۹/۶۷ تا

تغییرات عمق معدنکاری را نمایش می‌دهد.



#### الف- فشار پایه‌ای جلویی



#### ب- فشار پایه‌ای عقبی

شکل ۱۲- تغییرات بیشینه فشارهای پایه‌ای افقی نسبت به عمق معدنکاری.

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که فشارهای پایه‌ای افقی دارای ارتباط مستقیم با عمق معدنکاری است. در این شکل ملاحظه می‌شود که همانند فشارهای پایه‌ای قائم، تغییرات فشار پایه‌ای جلویی نسبت به تغییرات عمق در تمام سقف‌های مورد مطالعه به جز سقف ۴ بیش از تغییرات فشار پایه‌ای عقبی است. همچنین ملاحظه می‌شود که فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی برای تمام سقف‌ها به صورت خطی با افزایش عمق معدنکاری افزایش پیدا می‌کنند.

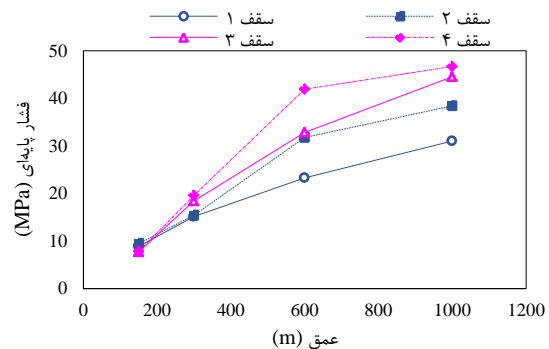
#### ۳-۵- اثر نسبت تنش‌های برجا بر تنش‌های القایی

مطالعه پارامتری تاثیر تنش برجا افقی بر روی بیشینه تنش‌های پایه‌ای از طریق نسبت تنش‌های برجا افقی به قائم (K) انجام گرفته است. برای این منظور با ثابت در نظر گرفتن تنش برجا قائم برای عمق ۳۰۰ متر برابر با ۲/۶ مگاپاسکال، مقدار K از ۰/۵ تا ۳ که متناظر با حدود تغییرات تنش برجا افقی ۳/۲۵ تا ۱۹/۵ مگاپاسکال متغیر بوده است. نتایج حاصل شده از این مطالعه برای فشار پایه‌ای قائم در شکل ۱۳ ارائه شده است.

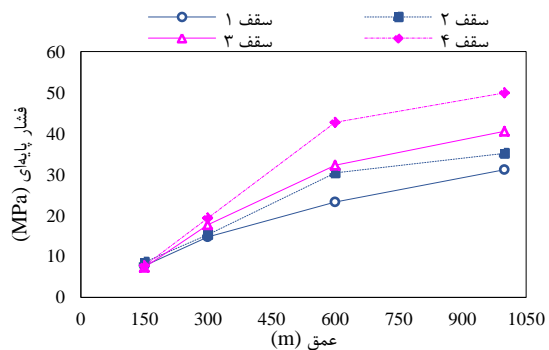
مختلف فاصله لایه‌بندی کمترین مقدار فشار پایه‌ای را داشته است.

#### ۳-۴- اثر عمق معدنکاری بر تنش‌های القایی

ارزیابی تاثیر عمق معدنکاری بر روی بیشینه فشارهای پایه‌ای برای عمق ۴ عمق ۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ متر معادل با تنش برجا قائم ۲/۶، ۶/۵، ۱۴/۳ و ۲۴/۷ مگاپاسکال انجام شده است. شکل ۱۱ تغییرات بیشینه فشارهای پایه‌ای قائم را برای عمق‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.



#### الف- فشار پایه‌ای جلویی

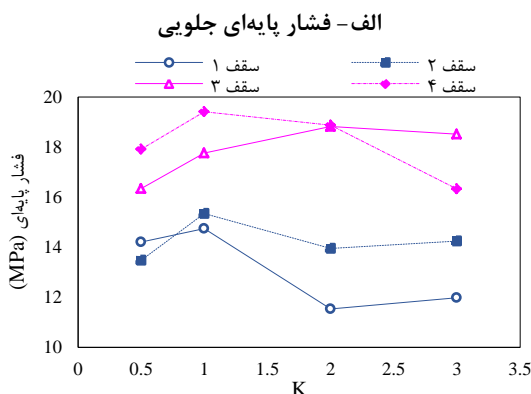
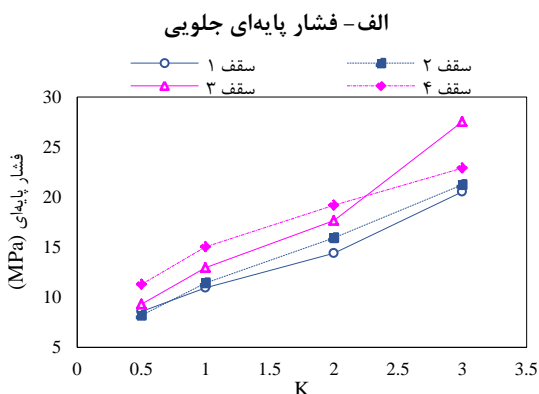
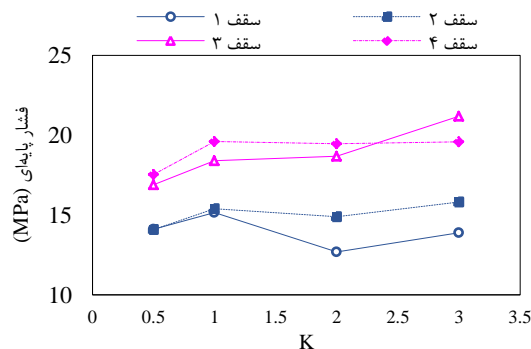
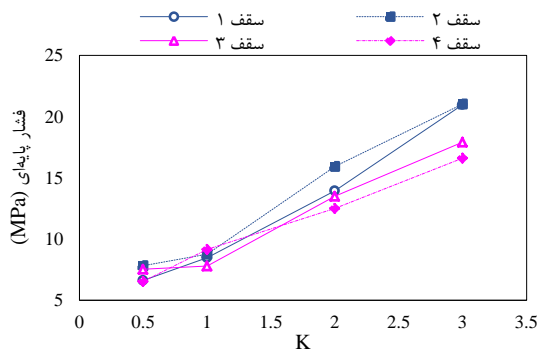


#### ب- فشار پایه‌ای عقبی

شکل ۱۱- تغییرات بیشینه فشارهای پایه‌ای قائم نسبت به عمق معدنکاری.

گراف‌های ارائه شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهند که فشارهای پایه‌ای قائم دارای ارتباط مستقیم با عمق معدنکاری و در نتیجه تنش برجا قائم‌اند. در این شکل مشاهده می‌شود که تغییرات فشار پایه‌ای جلویی نسبت به تغییرات عمق در تمام سقف‌های مورد مطالعه به جز سقف ۴ بیش از تغییرات فشار پایه‌ای عقبی است. الگوی افزایش فشارهای پایه‌ای برای سقف‌های ۱ تا سه نسبت به افزایش عمق معدنکاری تقریباً خطی است، در حالی که این روند صعودی در سقف ۴ به صورت تابع لگاریتمی افزایشی قابل بیان است.

شکل ۱۲ نتایج مدل‌سازی فشارهای پایه‌ای افقی نسبت به



شکل ۱۳- تغییرات بیشینه فشارهای پایه‌ای قائم نسبت به نسبت تنش‌های برج. نسبت به نسبت تنش‌های عقبی.

شکل ۱۴- تغییرات بیشینه فشارهای پایه‌ای قائم نسبت به نسبت تنش‌های برج. نسبت به نسبت تنش‌های عقبی.

#### ۴- بحث

هدف اصلی این مقاله مطالعه تاثیر پارامترهای اساسی بر روی تنش‌های القایی در طی فرآیند تخریب اول از طریق شبیه‌سازی عددی گسسته بوده است. مهم‌ترین ویژگی این مقاله نسبت به مطالعات پیشین علاوه بر استفاده از شبیه‌سازی گسسته برای در نظر گرفتن تاثیر ناپیوستگی‌های از قبل موجود در سقف، بررسی توام فشارهای پایه‌ای عقبی و جلویی در حالت‌های قائم و افقی برای ۴ نوع سقف با مقاومت و ترکیب‌های لایه‌های مختلف است.

باید توجه داشت که اگرچه مقادیر حاصل شده از این شبیه‌سازی نمی‌تواند قابل تعمیم باشد اما نوع ارتباط پارامترها با فشارهای پایه‌ای و همچنین الگوی افزایشی یا کاهش آن‌ها قابل اطمینان و تعمیم است.

شکل ۶ نشان‌دهنده وجود رابطه مستقیم بین فشارهای پایه‌ای با مقاومت کلی سقف بلاواسطه است. شدت این ارتباط برای فشار پایه‌ای قائم بیش از حالت افقی است. این رابطه مستقیم کلی باید با در نظر گرفتن اندازه گام تخریب اول مورد تحلیل قرار گیرد. تاثیر افزایش در مقاومت کلی سقف بلاواسطه

نتایج ارائه شده در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که رابطه مشخصی بین نسبت تنش‌های برج و فشارهای پایه‌ای قائم وجود ندارد و مقدار فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی نسبت به تغییرات K دارای نوسان است. البته نتایج نشان می‌دهند که بازه نوسان مقادیر فشارهای پایه‌ای برای سقف‌های ضعیف چه در حالت فشار جلویی و چه عقبی نزدیک به یکدیگر است. این الگو برای سقف‌های مستحکم نیز قابل مشاهده است.

در شکل ۱۴ نتایج مدل‌سازی فشارهای پایه‌ای افقی برای سقف‌های مورد مطالعه نسبت به تغییرات K ارائه شده است.

از شکل ۱۴ نتیجه گرفته می‌شود که فشارهای پایه جلویی و عقبی افقی با مقدار تنش برج افقی رابطه مستقیم دارند. همچنین ملاحظه می‌شود که روند افزایشی فشارهای پایه‌ای نسبت به افزایش K تقریباً به صورت خطی است. نتایج ارائه شده در این شکل مشخص می‌کنند که برای یک نسبت تنش مشخص همواره افزایش مقاومت سقف مصادف با افزایش فشار پایه‌ای نیست.

این بر خلاف انتظار، همواره سقف‌های مستحکم دارای فشارهای پایه‌ای بیش‌تر نخواهند بود. این نتایج را باید با توجه به عملکرد توام مقاومت کلی سقف و وجود جنس‌های مختلف سنگی در سقف بررسی کرد. همچنین باید توجه داشت که تغییر مکانیزم شکست در سقف می‌تواند باعث ایجاد تغییر در الگوهای یاد شده شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

فرآیند تخریب اول به دلیل تاثیر در پایداری کارگاه و انتخاب ظرفیت سیستم نگهداری دارای اهمیت ویژه‌ای در استخراج جبهه‌کار طولانی است. در این راستا پیش‌بینی دو مولفه مقدار گام تخریب اول و تنش‌های القایی حاصل از آن ضروری است. در این مقاله تاثیر پارامترهای اساسی بر تنش‌های القایی ایجاد شده در فرآیند تخریب اول با استفاده از شبیه‌سازی عددی گسسته مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

- بیشینه تنش‌های القایی طی فرآیند تخریب اول در نزدیکی پایه حایل و پشت جبهه‌کار ایجاد می‌شوند. همچنین با افزایش فاصله از سقف کارگاه به سمت انتهای سقف بلاواسطه، مقدار بیشینه تنش‌های القایی کاهش پیدا می‌کند. از سوی دیگر در طی فرآیند تخریب اول مقدار تنش‌های القایی در دهانه تخریب تقریباً صفر است و یک فضای رهاسازی تنشی به وجود می‌آید.

- ارتباط فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی در حالت قائم و افقی نسبت به پارامترهای مورد بررسی به جز برای تغییرات تنش‌های افقی برجا یکسان است.

- مقدار فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی در حالت قائم و افقی با مقاومت سقف بلاواسطه، فاصله لایه‌بندی در سقف بلاواسطه و عمق معدنکاری به صورت مستقیم و با ارتفاع سقف بلاواسطه به صورت غیرمستقیم است. فشارهای پایه‌ای قائم دارای ارتباط مشخصی با تنش برجا افقی نیست در حالی که حالت افقی این فشارها دارای ارتباط مستقیم با تنش برجا افقی است.

- نتایج حاصل شده موید این نکته است که بیشتر بودن فشارهای پایه‌ای جلویی یا عقبی نسبت به تغییرات هر پارامتر متفاوت است. همچنین برای یک مقدار مشخص از هر یک از پارامترهای مورد بررسی نمی‌توان نتیجه گرفت که سقف‌های مستحکم‌تر همواره دارای مقدار فشار پایه‌ای‌های بیشتری‌اند.

- عملکرد همزمان ترکیبات مختلف لایه‌ای و مقاومت‌های

منجر به افزایش گام تخریب می‌شود. در این حالت به طور کلی افزایش تنش‌های القایی قائم و افقی به وجود می‌آید. شکل‌های ۷ و ۸ نشان‌دهنده رابطه غیرمستقیم ارتفاع سقف بلاواسطه که متناظر با ارتفاع لایه زغال و معمولاً کارگاه استخراج است با تنش‌های القایی قائم و افقی است. این نتایج با نتایج مراجع [۲۴] و [۱۲] دارای تطابق است. شکل‌های ۹ و ۱۰ بیانگر وجود رابطه مستقیم بین بیشینه تنش‌های القایی قائم و افقی با فاصله لایه‌بندی در بسترهای سنگی سقف بلاواسطه است. دلیل این موضوع را باید در افزایش مقاومت کلی توده سنگ سقف با افزایش فاصله لایه‌بندی که به عنوان یک نوع ناپیوستگی رفتار می‌کنند، جستجو کرد. نتایج این بخش نتایج مطالعات مرجع [۱۶] را تایید می‌کند. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهند بیشینه تنش‌های القایی قائم و افقی با عمق معدنکاری که به طور مستقیم متناظر با تنش‌های برجا قائم است دارای ارتباط مستقیم‌اند. نتیجه حایز اهمیت در اینجا این است که ارتباط بین بیشینه تنش‌های القایی و گام تخریب اول که قبلاً به آن اشاره شد (تحلیل شکل ۶) باید با در نظر گرفتن عمق معدنکاری تحلیل شود و در حقیقت یک رابطه سه متغیره است. بر این اساس برای یک عمق ثابت افزایش مقاومت سقف همراه با افزایش دهانه تخریب و فشارهای پایه‌ای است. با این حال، افزایش عمق معدنکاری اگرچه همراه با کاهش گام تخریب است [۱۲]، اما همراه با افزایش فشارهای پایه‌ای است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که تنش‌های برجا افقی دارای ارتباط مشخصی با تنش‌های القایی قائم نیست. این نتیجه مخالف با نتایج مرجع [۱۲] است. در این رابطه مرجع [۱۶] بحث می‌کند که تاثیر اصلی تنش‌های برجا افقی بر روی مکانیزم شکست در سقف بلاواسطه است که منجر به تغییر گام تخریب می‌شود. این موضوع می‌تواند یکی از دلایل نوسان مقدار تنش القایی قائم نسبت به تغییرات تنش برجا افقی در فرآیند تخریب اول باشد. البته نتایج این قسمت نشان داده است که مقدار تنش پایه‌ای‌هایی افقی دارای رابطه مستقیم با مقدار تنش برجا افقی‌اند.

علاوه بر نتایج بالا که برای نوع رابطه بین پارامترها و تنش‌های القایی قائم و افقی است باید به رابطه بین فشارهای پایه‌ای جلویی و عقبی نسبت به یکدیگر و همچنین تاثیر مقاومت کلی سقف در هریک از شرایط پرداخت. این مطالعه نشان می‌دهد که اگرچه روند صعودی یا نزولی فشارهای عقبی و جلویی برای تمام پارامترها یکسان است اما قانون کلی در ارتباط با اینکه در هر وضعیت کدام فشار پایه‌ای جلویی یا عقبی در حالت قائم یا افقی بیشتر است وجود ندارد و علاوه بر

7. Heasley, K. A., 1998. "Numerical modeling of coal mines with a laminated displacement-discontinuity code". PhD thesis, Colorado School of Mines.
8. 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 and Mining Sciences*, 41(2), pp. 193-205.
9. Gil, H., ed., 2013. *The theory of strata mechanics*, Elsevier.
10. Zhu, S., Feng, Y., and Jiang, F., 2016. "Determination of abutment pressure in coal mines with extremely thick alluvium stratum: a typical kind of rockburst mines in China". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(5), pp. 1943-1952.
11. Wang, W., Jiang, T., Wang, Z., and Ren, M., 2017. "A analytical model for cover stress reestablishment in the goaf after longwall caving mining". *The journal of the Southern African Institute of mining and Metallurgy*, 117, pp. 671-683.
12. Singh, G. S. P., and Singh, U. K., 2010. "Numerical modeling study of the effect of some critical parameters on caving behavior of strata and support performance in a longwall working". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(4), pp. 475-489.
13. Karekal, S., Das, R., Mosse, L., and Cleary, P.W., 2011. "Application of a mesh-free continuum method for simulation of rock caving processes". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(5), pp. 703-711.
14. Shabanimashcool M., 2012. "Numerical modelling of the longwall mining and the stress state in Svea Nord Coal Mine". PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
15. Gao, M., Jin, W., Dai, Z. and Xie, J., 2013. "Relevance between abutment pressure and fractal dimension of crack network induced by mining". *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(6), pp.925-930.
16. Gao, F., Stead, D., and Coggan, J., 2014. "Evaluation of coal longwall caving characteristics using an innovative UDEC Trigon approach". *Computers and Geotechnics*, 55, pp. 448-60.
17. Ju, M. H., Li, X. H., Yao, Q. L., Li, D. W.,

مختلف آن‌ها موجب بروز پیچیدگی در پیش‌بینی رفتار فشارهای پایه‌ای نسبت به تغییرات تک‌تک پارامترها می‌شود.

اگرچه در این مقاله سعی شده است تا نقاط ضعف مطالعات پیشین پوشش داده شود و علاوه بر آن با بررسی سقف‌های مختلف با ترکیب‌های سنگی و مقاومت‌های مختلف جامعیت مطالعه افزایش پیدا کند، اما این مطالعه می‌تواند با افزودن بررسی مکانیزم شکست نسبت به تغییر مقادیر پارامترها با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی تکمیل شود.

#### نمادها و علائم به کار رفته در متن

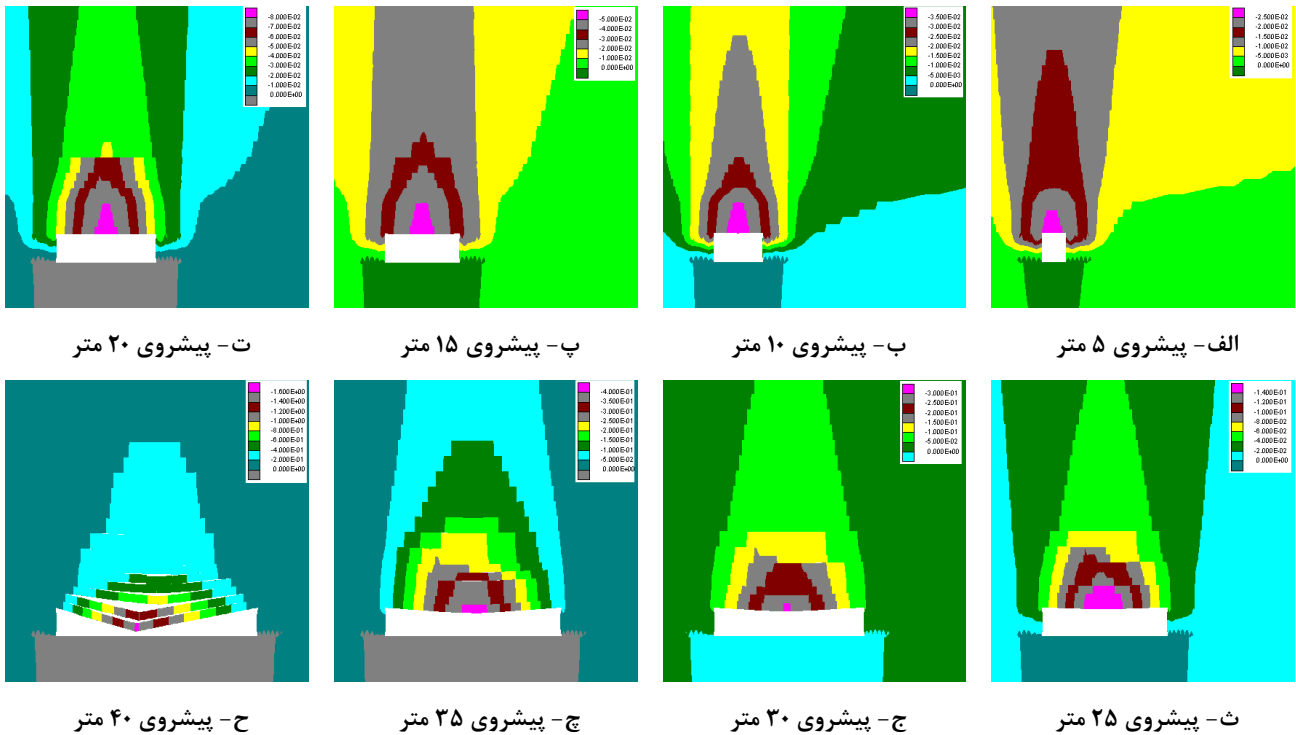
نماد	پارامتر	نماد	پارامتر
$\sigma_{ci}$	مقاومت فشاری تک محوری	$\varphi_r$	زاویه اصطکاک داخلی پسماند
E	مدول الاستیسیته	$\psi_r$	زاویه اتساع پسماند
$\rho$	چگالی	$\sigma_t$	مقاومت کششی
$\nu$	نسبت پواسون	$K_n$	سختی نرمال
C	چسبندگی	$K_s$	سختی برشی
$\varphi$	زاویه اصطکاک داخلی	$t_i$	ضخامت لایه نام
$\psi$	زاویه اتساع	n	تعداد لایه‌های سقف بلاواسطه
$C_r$	چسبندگی پسماند		

#### منابع

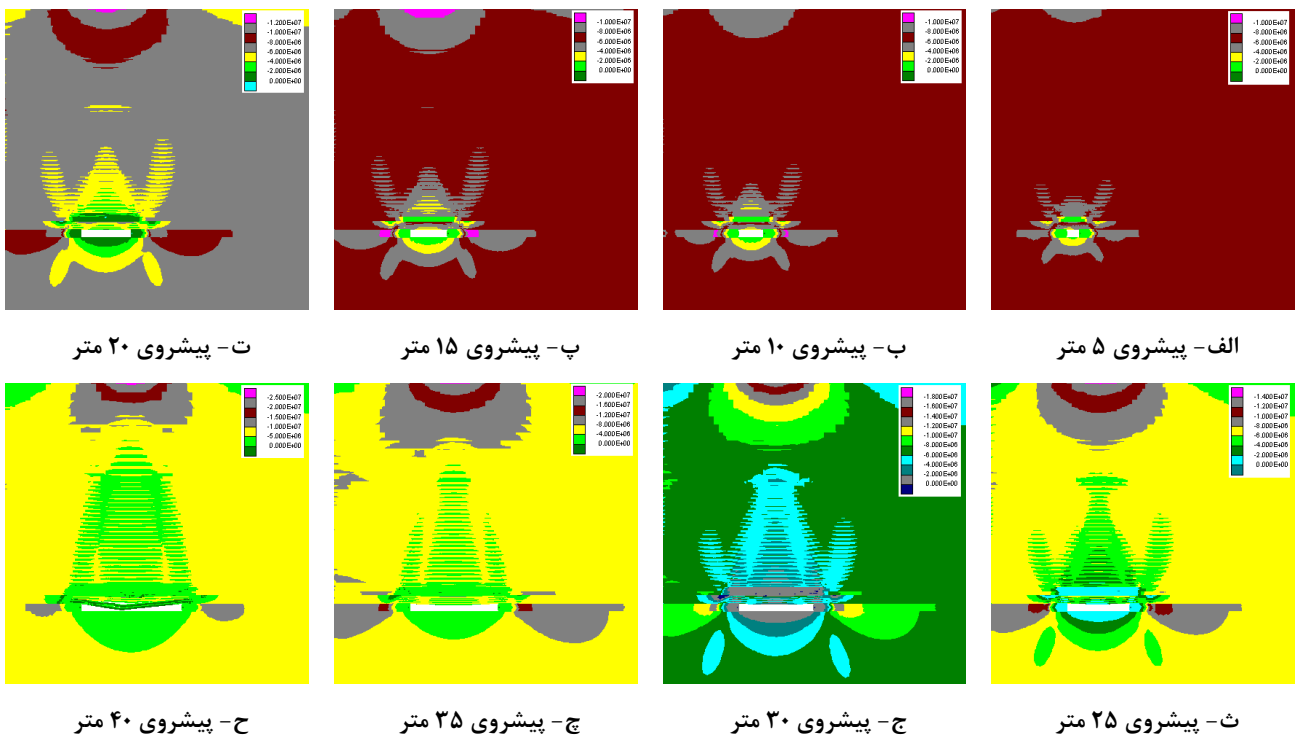
1. Whittaker, B.N., 1974. "An appraisal of strata control practice". *Mining Engineering*, 134, pp. 9-24.
2. Salamon, M. G. D., 1963. "Elastic analysis of displacements and stresses induced by the mining of seam or reef deposits". *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 64(4), pp. 128-149.
3. Peng, S. S., and Chiang, H. S., 1984. *Longwall mining*. Wiley, New York.
4. Jeremic, M., 1985. *Strata mechanics in coal mining*, CRC Press.
5. Wilson, A. H., 1986. The problems of strong roof beds and water bearing strata in the control of longwall faces. *In Proceedings of symposium on ground movement and control related to coal mining*, organized by the Australian Institute of Mining and Metallurgy, Illawara Branch, University of Wollongong, pp. 1-8.
6. Mark, C., 1990. Pillar design methods for longwall mining. US Department of the Interior, Bureau of Mines.

- Norway.
27. Medhurst, T. P., and Brown, E. T., 1998. "A study of the mechanical behaviour of coal for pillar design". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35, pp. 1087-1105.
  28. Hoek, E., 2007. "Practical rock engineering". Online. ed. Rocscience.
  29. Zhu, T. Y., 2012. "Some useful numbers on the engineering properties of materials (geologic and otherwise)". GEOL 615, Department of Geophysics.
  30. Gao, F., 2013. "Simulation of failure mechanisms around underground coal mine openings using discrete element modelling". Dissertation, Simon Fraser University, British Columbia, Canada.
  31. Le, T. D., 2018. "Longwall top coal caving mechanism and cavability assessment". Dissertation, The University of New South Wales (UNSW), Sydney, Australia.
  32. Kwasniewski, M., 2008. "Numerical analysis of strata behavior in the vicinity of a longwall panel in a coal seam mined with roof caving". *Continuum and Distinct Element Numerical Modelling in Geo-Engineering*, 07-8.
  33. Shabanimashcool, M., 2012. "Numerical modelling of the longwall mining and the stress state in Svea Nord Coal Mine". Dissertation, Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
  34. عطایی، محمد؛ ۱۳۹۰؛ معدنکاری زیرزمینی: روش‌های با نگهداری، روش‌های تخریبی، جلد دوم، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
  35. Majumder, S., and Chakrabarty, S., 1991. "The vertical stress distribution in a coal side of a roadway—an elastic foundation approach". *Mining Science and Technology*, 12(3), pp. 233-240.
  - Chong, Z. H., and Zhou, J., 2015. "Numerical investigation into effect of rear barrier pillar on stress distribution around a longwall face". *Journal of Central South University*, 22(11), pp. 4372-4384.
  18. Ji, Y., Wang, X., Zhou, Y. and Zhang, X., 2016. Study on the Distribution Law of Front Abutment Pressure of Long Fully-Mechanized Working Face in Deep Mine. In *Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety*, pp 159-162.
  19. Jiang, J. Q., Wu, Q. S., Wu, Q. L., Wang, P., Zhang, C., and Gong, B., 2018. Study on Distribution Characteristics of Mining Stress and Elastic Energy Under Hard and Thick Igneous Rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(6), pp. 3451-3466.
  20. Singh, G. S. P., and Singh, U. K., 2009. "A numerical modeling approach for assessment of progressive caving of strata and performance of hydraulic powered support in longwall workings". *Computers and Geotechnics*, 36(7), pp. 1142-1156.
  21. Itasca Consulting Group, Inc., 2016. "(UDEC) Universal Distinct Element Code (Version 6.0) User's Guide", Minneapolis, Minnesota.
  22. Barton, N. R., 1974. "A review of the shear strength of filled discontinuities in rock". Norwegian Geotech. Inst. Publ. No. 105. Oslo: Norwegian Geotech. Inst.
  23. Goodman, R. E., 1980. "Introduction to Rock Mechanics". John Wiley & Sons, New York.
  24. Johnston, I. W., 1985. "The Strength of Intact Geomechanical Materials". *J. Geotech. Eng. Div.*, 6(730), pp. 730-749.
  25. Johnson, R. B., and DeGraff, J. V., 1988. "Principles of Engineering Geology". John Wiley & Sons, New York.
  26. Palmstrom, A., 1995. "RMi-a rock mass characterization system for rock engineering purposes". Dissertation, Oslo University,

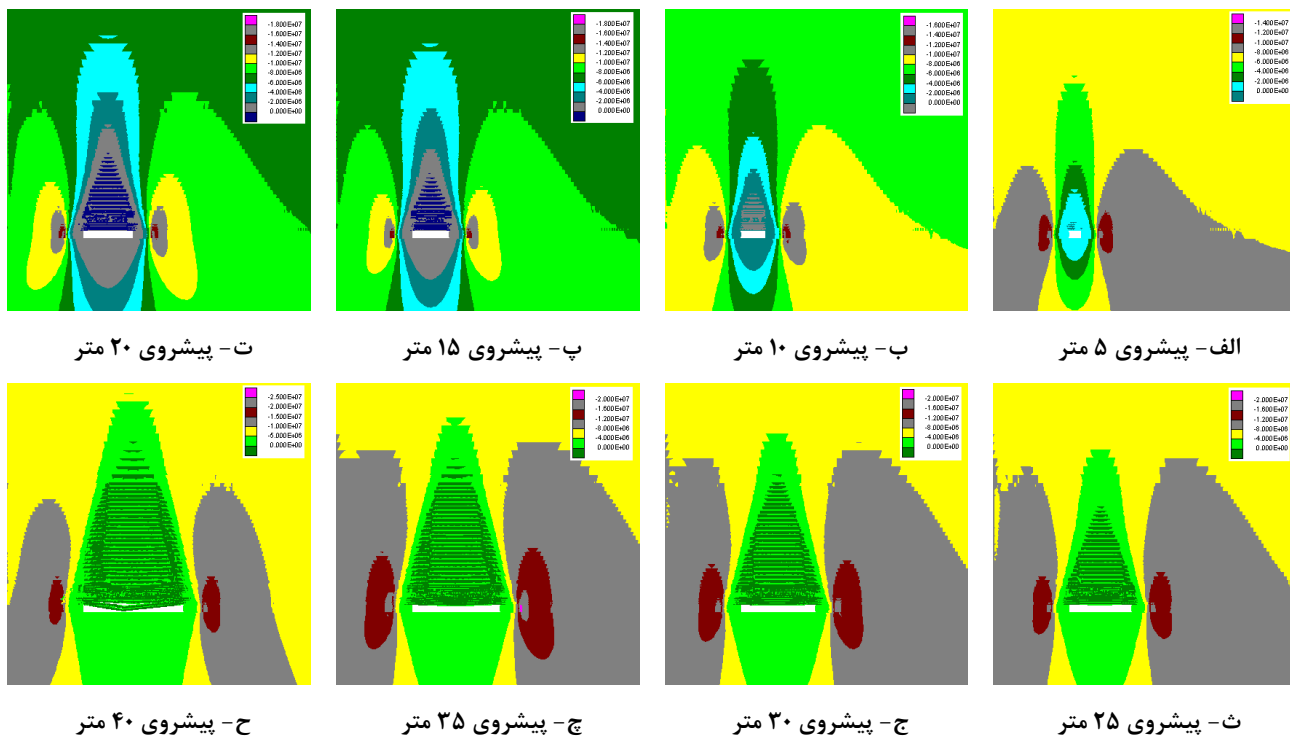
پیوست ۱



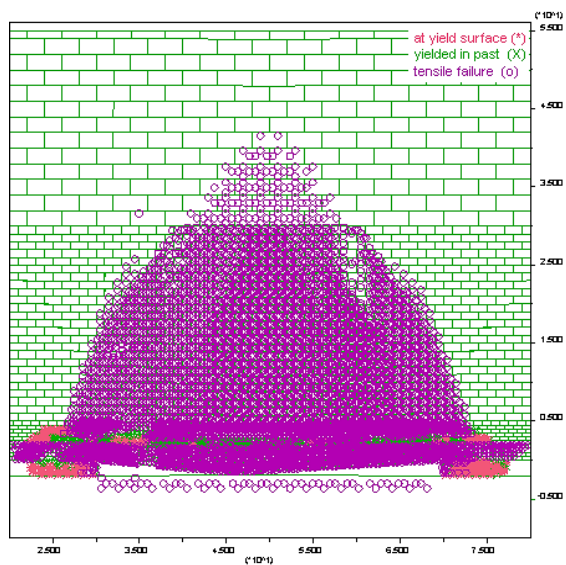
شکل پ ۱- جابه‌جایی عمودی در سقف از زمان استخراج تا تخریب اول در پیشروی ۴۰ متر.



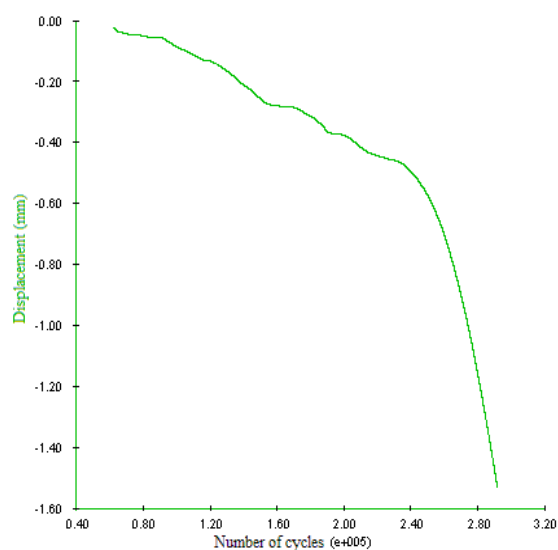
شکل پ ۲- تنش‌های افقی ایجاد شده در مدل از زمان استخراج تا تخریب اول در پیشروی ۴۰ متر.



شکل پ ۳- تنش‌های قائم ایجاد شده در مدل از زمان استخراج تا تخریب اول در پیشروی ۴۰ متر.



ب - گسترش ناحیه شکست در لحظه تخریب



الف - جابه‌جایی سقف در لحظه تخریب اول

شکل پ ۴- جابه‌جایی رخ داده و گسترش ناحیه تخریب.