

بررسی عوامل موثر بر تخریب پذیری توده سنگ در استخراج به روش تخریب توده‌ای بهنام علی پنهانی^۱، مهدی یاوری شهرضا*^۲، احمد جعفری^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، b.alipenhani@ut.ac.ir

۲- مربی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، myavary@ut.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، ajafari@ut.ac.ir

(دریافت ۲۴ اسفند ۱۳۹۵، پذیرش ۲۱ شهریور ۱۳۹۶)

چکیده

یک عامل بسیار مهم در معادن تخریب بزرگ، تعیین قابلیت تخریب کانسنگ و سنگ فراگیر است که تخریب پذیری آن‌ها شرط اصلی به کارگیری این روش است. تخمین و ارزیابی نامناسب این متغیر می‌تواند منجر به ایجاد مشکلاتی در تولید و فرآوری شود. در این مقاله قابلیت تخریب توده سنگ با استفاده از نرم افزار UDEC (نسخه ۵) بررسی شده است. با توجه به زیاد بودن عوامل موثر بر قابلیت تخریب، ابتدا از طریق مدلسازی دو بعدی در نرم افزار UDEC و بررسی روند تغییرات حداقل دهانه تخریب برحسب هر پارامتر با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها (بررسی تک عاملی)، مهم ترین عوامل شامل عمق، شیب دسته درزه‌ها، تعداد دسته درزه‌ها، زاویه اصطکاک سطح درزه و فاصله‌داری درزه‌ها برای بررسی نهایی انتخاب شدند. در مرحله بعد، تغییرات حداقل دهانه تخریب برای هر پارامتر در دامنه تغییرات تعریف شده مطالعه شد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد که با افزایش عمق و تعداد دسته درزه و کاهش زاویه اصطکاک سطح درزه و فاصله‌داری درزه‌ها، قابلیت تخریب کاهش و حداقل دهانه تخریب افزایش می‌یابد. بیشترین احتمال تخریب در حالت درزه‌داری با شیب ۶۰ درجه نسبت به افق اتفاق می‌افتد. به ازای سایر مقادیر، قابلیت تخریب کاهش و حداقل دهانه تخریب افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

قابلیت تخریب، حداقل دهانه تخریب، تخریب بزرگ، روش عددی، نرم افزار UDEC

۱- مقدمه

استفاده از کد عددی نوشته شده امکان وارد کردن ناپیوستگی‌های بزرگ مقیاس در مدل فراهم شد. همچنین امکان تخلیه مواد تخریب شده وجود داشت تا بتوان رفتار گسترش تخریب را مطالعه کرد. در تحقیق یاد شده درزه‌داری با در نظر گرفتن محیط معادل در مدل وارد می‌شد و امکان بررسی تاثیر خصوصیات درزه به طور مستقیم وجود نداشت. در این تحقیق به بررسی تاثیر خواص درزه بر حداقل دهانه شروع تخریب پرداخته شده است.

از کدهای ناپیوسته مانند UDEC و 3DEC برای ارزیابی قابلیت تخریب به طور محدود استفاده شده است. به عنوان مثال می‌توان به ایجاد معیار قابلیت تخریب در روش جبهه‌کار طولانی توسط وکیلی^۳ [۶] اشاره کرد. پارامترهای بررسی شده در این مطالعه شامل مقاومت، سختی، تنش‌های قبل از معدنکاری، فرکانس درزه‌داری و ضخامت Top coal بود، اما کاربرد آن‌ها بیشتر در مطالعات نشست سطح زمین و پایداری پایه‌ها بوده است. به‌عنوان مثال می‌توان به مطالعه انجام شده توسط لی^۴ و برومر^۵ [۷] در پالابورا^۶ اشاره کرد.

از کارهایی که مستقیماً تاثیر درزه‌داری را بر قابلیت تخریب مورد مطالعه قرار داد می‌توان به مطالعه جبین‌پور [۸ و ۹] در سال ۱۳۹۱ اشاره کرد. جبین‌پور در تحقیق خود به بررسی اثر فاصله‌داری درزه، چسبندگی سطح درزه، زاویه اصطکاک سطح درزه و شیب دسته درزه پرداخت.

در این تحقیق علاوه بر عوامل در نظر گرفته شده توسط جبین‌پور، عمق، تعداد دسته درزه‌ها و نسبت تنش افقی به قائم بررسی شد. همچنین دامنه تغییرات هر عامل بر اساس تحقیقات گذشته و در بازه‌های کوچک‌تر نقشه بررسی شد. معیار شروع تخریب بر اساس نظر سینزبری جابه‌جایی یک متر در سقف زیربرش در نظر گرفته شد [۵]. در مجموع ۴۸۰ حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در هر حالت دهانه تا رسیدن به جابه‌جایی یک متر در سقف تغییر داده شد [۱].

۲- عوامل موثر بر قابلیت تخریب

قابلیت تخریب یک توده سنگ، اندازه‌گیری (اغلب غیرکمی) قابلیت آن در تخریب شدن تحت شرایط خاص

روش استخراج تخریب بزرگ، یکی از معدود روش‌های استخراج زیرزمینی است که با توجه به هزینه‌های عملیاتی پایین و مقیاس استخراج بزرگ، قابلیت رقابت با روش استخراج روباز را دارد. از سایر مزیت‌های این روش سطح ایمنی بالا برای پرسنل و قابلیت استفاده از اتوماسیون است. رو به پایان بودن معادن روباز کنونی و تقاضای روزافزون بشر برای مواد معدنی به ویژه مس و آهن و از طرفی مزیت‌های یاد شده، این روش را در مرکز توجه صنعت معدنکاری قرار داده است [۱].

به طور کلی روش‌های ارزیابی قابلیت تخریب و انتشار تخریب به سه دسته تحلیلی، تجربی و عددی تقسیم می‌شوند. توضیح کامل این روش‌ها به همراه منابع در منبع شماره [۲] آمده است.

از مهم‌ترین روش‌های تجربی می‌توان به نمودار پایداری ماتئوس (۱۹۸۰)، نمودار لابسچر (۱۹۹۰) و نمودار اصلاح شده ماتئوس توسط مادسلی (۲۰۰۲) اشاره کرد [۳]. معمول‌ترین روش در بین روش‌های تجربی روش لابسچر است که بر اساس تلفیق اطلاعات مربوط به معادن تخریبی در آفریقای جنوبی ارایه شده است. در این روش با مشخص بودن امتیاز معدنکاری توده سنگ و شعاع هیدرولیکی کف زیربرش می‌توان وضعیت توده سنگ را از نظر تخریب‌پذیری تعیین کرد.

در تحقیقات عددی پیوسته (مانند لورگ^۱ و همکاران [۴])، مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن محیط پیوسته معادل توده سنگ انجام شده است. در چنین شرایطی بررسی تاثیر خواص درزه در قابلیت تخریب امکان‌پذیر نخواهد بود.

در روش‌های ترکیبی مانند روش FEM/DEM-DFN از توده سنگ مصنوعی استفاده می‌شود. در این روش از ترکیب مدل‌های DFN و شبیه‌سازی‌های FEM/DEM برای استنتاج خواص توده سنگ، استفاده می‌شود. این روش بین سیستم ثبت شده شکستگی‌ها و مقاومت توده سنگ ارتباط برقرار می‌کند. از جمله تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعه سینزبری^۲ [۵] در مورد گسترش تخریب و نشست اشاره کرد. در این تحقیق با

محصورکننده زیاد ممکن است با وجود خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ و ساختارهای مناسب، مانع از شروع و گسترش تخریب شوند. تنش‌های افقی زیاد می‌تواند باعث قفل‌شدگی بلوک‌های سنگی در هم شود و توده سنگ را در مقابل گسترش تخریب در جایی که ناپیوستگی‌های کم شیب در توده سنگ وجود ندارند، پایدار کند [۱۲].

۲-۱-۲- IRMR / MRMR کانسنگ و کمر بالا

امتیاز برجای توده سنگ^۷ کانسنگ و توده سنگ کمر بالا باید در مقاطعی برای پیش‌بینی میزان تخریب ارتفاعی و جانبی ثبت شوند [۱۲]. جزییات محاسبه IRMR و MRMR^۸ در منبع شماره [۱۳] و [۱۴] آمده است. همچنین گستره RMR لابسچر در روش‌های استخراج مختلف و در منبع [۱۵] آمده است. رابطه کلی بین RMR لابسچر و MRMR به صورت رابطه ۱ است [۱۵]:

$$MRMR = 0.9 \times RMR \quad (1)$$

۲-۱-۳- دامنه‌های ساختاری^۹

دامنه‌های ساختاری باید به دقت تعیین شوند زیرا تغییرات در تراکم یا جهت‌یافتگی ساختارها می‌تواند منجر به ایجاد مشکلات تخریب در پیکره کانسنگ‌های کوچک و تنوع قابل توجهی در خردشدگی (در پیکره‌های کانسنگ با گستره زیاد) شود [۱۲].

۲-۱-۴- ساختارهای اصلی^{۱۰}

خصوصیات اصطکاکی یا مقاومت برشی درزه‌ها و ساختارهای بزرگ، نقش بسیار مهمی را در سطح زیربرش لازم برای تخریب که از نمودار شعاع هیدرولیکی لابسچر به دست می‌آید، ایفا می‌کند. این خصوصیات در شرایط درزه در طبقه‌بندی IRMR وارد می‌شود و می‌تواند با زاویه اصطکاک رابطه داشته باشد. ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها نقش مهمی در تعیین مقاومت کلی توده سنگ دارند. ناپیوستگی‌های با مقاومت برشی کم برای تخریب مناسب‌اند چون با کمترین مقاومت در مقابل تنش‌های برشی تمایل خوبی برای گسیختگی دارند. در یک معدن، فاصله‌داری، شرایط درزه و جهت‌یافتگی

است [۱۰] و هر سه مرحله تخریب یعنی شروع، گسترش و تخریب پیوسته را در بر می‌گیرد. شروع تخریب همان گسیختگی اولیه توده سنگ است که به طور مستقیم با قابلیت تخریب توده سنگ ارتباط دارد. به محض این‌که زیربرش آتشیاری و ایجاد شد، ستون کانسنگ، نگهداری زیرین خود را از دست می‌دهد. با وقوع گسیختگی یا ریزش در منطقه زیربرش، تخریب شروع می‌شود. گسترش تخریب، تداوم ریزش منطقه تخریب به سمت بالا در ستون کانسنگ همزمان با تخلیه مواد تخریب شده از طریق دهانه‌های تخلیه است. معمولاً لازم است تا ابعاد زیربرشی را که در آن تخریب شروع می‌شود را گسترش داد تا از قوس پایدار در منطقه تخریب که باعث توقف گسترش تخریب می‌شود، جلوگیری شود. قوس زدگی بزرگترین مانع گسترش تخریب است و باعث ایجاد یک قوس خودنگهدار در منطقه تخریب می‌شود. تخریب پیوسته، حالت گسترش تخریب مداوم است که هدف طراحی در تخریب بزرگ است. با ایجاد یک سطح زیربرش با ابعاد به اندازه کافی بزرگ برای غلبه بر قوس پایدار، تخریب پیوسته هم قابل دستیابی است. زمانی که تخریب پیوسته حاصل شد، آهنگ گسترش تخریب با الگو و سرعت تخلیه مواد شکسته شده، کنترل می‌شود [۳ و ۱۱].

قابلیت تخریب یک کانسار تابعی از عوامل طبیعی مانند خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ و عوامل القایی ناشی از استخراج ماده معدنی است. تنش‌های قبل از معدنکاری و خصوصیات توده سنگ در گروه عوامل طبیعی قرار می‌گیرند، درحالی‌که تنش‌های القایی و تاثیرات مرتبط با استخراج عوامل القایی‌اند که قابلیت تخریب را تحت تاثیر قرار می‌دهند [۳].

۲-۱- عوامل طبیعی

۲-۱-۱- تنش‌های منطقه‌ای

مقدار و جهت تنش‌های منطقه‌ای نقش مهمی در تخریب دارند. زیربری در راستای تنش اصلی باعث بهبود در قابلیت تخریب و خردشدگی می‌شود، اما می‌تواند باعث مچاله شوندگی یا ترک‌یدن سنگ شود. نسبت تنش برجای افقی به قائم بر روی بزرگی تنش‌های القایی ایجاد شده در منطقه تخریب در زمان شروع تخریب اثر گذاشته و با توجه به جهت‌یافتگی درزه، به شدت گسترش تخریب و سرعت آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تنش‌های

پیکره کانسنگ خاص ارتباط ندارند. اگرچه، هندسه زیربرش و روش ایجاد آن می‌تواند طوری طراحی شود تا از ساختارهای ژئوتکنیکی و متغیرهای طبیعی درون توده سنگ به نحوی استفاده شود تا سطح زیربرش مورد نیاز برای تخریب کاهش یابد [۳ و ۱۶].

۲-۲-۱- ارتفاع بلوک

ارتفاع بلوک به هندسه پیکره کانسنگ، خردشدگی کانسنگ و خصوصیات سنگ پوشاننده^{۱۲} بستگی دارد. فاصله عمودی بین طبقات استخراجی قابلیت تخریب توده سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد. خردشدگی ثانویه در اثر حرکت بلوک‌ها در سراسر ستون تخلیه در زمان معدنکاری اتفاق می‌افتد. بنابراین قابلیت تخریب کانسنگ و سنگ پوشاننده و در نتیجه خردشدگی، تعیین ارتفاع بلوک بهینه را در فرآیند طراحی تحت تاثیر قرار می‌دهد [۳ و ۱۶]. داده‌های مربوط به نحوه تغییر ارتفاع بلوک در طول زمان در منبع شماره [۱۵] آمده است.

۲-۲-۲- توالی ایجاد و هندسه زیربرش

شکل و روش زیربری می‌تواند قابلیت تخریب توده سنگ را از طریق مقدار تنش‌های القایی به وجود آمده در منطقه تخریب تحت تاثیر قرار دهد. ایجاد زیربرش به صورت یک‌باره باعث دسترسی به تناژهای تولیدی اولیه زیاد و محدود شدن تخریب دودکشی از طریق کاهش تنش‌های قفل‌کننده افقی وارد بر ساختارهای تقریباً قائم در منطقه تخریب می‌شود. این روش در مواردی که ناپیوستگی‌های کم شیب وجود ندارند یا توزیع ضعیفی در داخل توده سنگ دارند مناسب است، از این‌رو ایجاد دودکش تخریب باعث کاهش تنش‌های برشی وارد بر ساختارهای افقی تا کمتر از مقاومت برشی آن‌ها می‌شود و در نتیجه تخریب متوقف می‌شود [۱۲].

جهت پیشروی زیربرش با توجه به جهت‌های تنش اصلی بر مقدار تنش‌های پایه‌ای^{۱۳} تاثیرگذارند. زیربرش‌ها معمولاً در جهت تنش اصلی حداکثر برای کاهش تنش‌های قفل‌کننده در منطقه تخریب در حین فرآیندهای استخراج ایجاد می‌شوند. پیشروی تخریب در جهت تنش‌های بیش‌تر تخریب را تسهیل می‌کند، اما تنها زمانی پیشنهاد می‌شود که توده‌سنگ نگهداری شده بتواند تنش‌های پایه‌ای زیاد را تحمل کند [۳ و ۱۶].

ساختارهای بزرگ با لحاظ کردن تنش‌های اصلی و بزرگی این تنش‌ها، عوامل بسیار مهمی‌اند که در تعیین شعاع هیدرولیکی برحسب MRMR نقش دارند. تاثیر ساختارهای بزرگ در کانسارهای مقاوم بیشتر از کانسارهای غیرمقاوم است [۱۲].

جهت‌یافتگی دسته درزه‌های اصلی در تعیین قابلیت تخریب مهم‌اند، چون رفتار مرتبط با جابه‌جایی توده سنگ در زمان گسیختگی را تعیین می‌کنند. جهت‌گیری تنش-های اصلی با توجه به جهت‌یافتگی دسته درزه‌های اصلی، عامل مهمی در تعیین اثر قوس زدگی و قفل‌شدگی بلوک-های سنگی است. وجود چندین دسته شکستگی برای تخریب خوب ضروری است. ساختارهای کم شیب منجر به جابه‌جایی قائم مناسب در توده سنگ در طول عملیات استخراج شده و از این‌رو به تخریب کمک می‌کنند [۱۲].

۲-۱-۵- ساختارهای فرعی^{۱۱}

ساختارهای با شیب صفر تا ۴۵ درجه، ساختارهای مهمی برای امکان رخداد گسیختگی برشی و ثقلی‌اند. موقعیت ساختار(ها) باید نسبت به مرزهای زیربرش ثبت شود. توزیع منظم نسبت به تمرکز درزه‌ها یا ساختارها در مرکز سطح زیربرش مرجح است که می‌تواند منجر به ایجاد یک دودکش تخریب و قطعات معلق در امتداد لبه‌ها شود [۱۲].

۲-۱-۶- آب

آب در منطقه‌ای که پتانسیل تخریب دارد، می‌تواند به کاهش اصطکاک بین درزه‌ها کمک کند و یا با اثراتی که با افزایش فشار آب منفذی ایجاد می‌کند، تخریب را تحت تاثیر قرار دهد. منبع آب می‌تواند آب زمین یا آب وارد شده به معدن در طول فصول بارانی باشد. در معدن شابانای، رفتارنگاری بلوک ۶ نشان داد که شدت تخریب پس از باران‌های فصلی افزایش یافته است [۱۲]. تحلیل داده‌های آب‌شناسی در منبع [۱۵] آمده است.

۲-۲- عوامل القایی

قابلیت تخریب یک کانسار تابعی از خصوصیات توده سنگ طبیعی است اما به شدت از عوامل القایی تاثیر می‌پذیرد. این عوامل القایی تابعی از تصمیمات مهندسی درباره چگونگی استخراج پیکره کانسنگ است. عوامل القایی به طور مستقیم با خصوصیات طبیعی و ژئومکانیکی یک

طریق تغییر در عوامل القایی موثر بر قابلیت تخریب می‌شود. تنش محصور بالا می‌تواند حتی در شرایط مناسب، از گسیختگی توده سنگ جلوگیری کند. به همین دلیل برش‌های مرزی و سست کردن مرزها اغلب برای آزادسازی تنش‌های افقی بالا در منطقه تخریب که می‌تواند مانع گسترش تخریب شود، به کار می‌روند. تصمیم‌گیری راجع به استفاده از برش‌های مرزی یا از ایجاد سست‌شدگی در مرزها، معمولاً بر اساس تجربه انجام می‌گیرد و تابعی از کیفیت توده سنگ، جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها و جهت و مقدار تنش‌های القایی در منطقه تخریب است [۳ و ۱۲].

جزئیات ایجاد برش در مرزها و تاثیر آن بر تخریب در منبع شماره [۱۲] آمده است.

۲-۲-۶- خردشدگی

موفقیت و کارایی کل عملیات تخریب بزرگ تا حد زیادی به میزان خردشدگی کانسار در طول عملیات تخریب بستگی دارد. پارامترهای عملیاتی مانند اندازه و فاصله-داری دهانه‌های تخلیه، انتخاب تجهیزات و عملکرد، متاثر از خردشدگی‌اند. عوامل موثر بر خردشدگی عبارت‌اند از [۳ و ۱۶]:

- شبکه برجای ناپیوستگی‌ها که با جهت‌یافتگی، فاصله‌داری و شرایط آن‌ها تعریف می‌شود.
- تنش‌های برجا و القایی در پیشانی یا سقف تخریب (با ارتفاع تخریب تغییر می‌کند)
- مقاومت سنگ
- ارتفاع ستون تخلیه

جهت زیربرش نسبت به جهت دسته درزه‌ها و تنش‌های اصلی تاثیر مهمی بر میزان خردشدگی دارد. پیشروی زیربرش در جهت تنش‌های اصلی، تنش‌های پایه‌ای زیادی را موجب شده که خود باعث ایجاد تخریب و بهبود خردشدگی می‌شود؛ اما ممکن است سبب آسیب رسیدن به طبقات زیربرش و تولید شود. سرعت تخلیه بر مدت زمانی که بلوک سنگی در ستون تخلیه باقی می‌ماند، تاثیر گذار بوده و در نتیجه به طور ضمنی بر خردشدگی تاثیرگذار است. سرعت تخلیه بالا سبب خردشدگی در ابعاد بزرگ‌تر شده و متقابلاً سرعت تخلیه کم باعث خردشدگی بهتری خواهد شد [۳، ۱۶ و ۱۷].

داده‌های مربوط به فراوانی انواع شکل‌های زیربرش، تاثیر شکل بر تنش‌های برجا و مساحت میانگین زیربرش برای تخریب اولیه در منبع شماره [۱۵] آمده است.

۲-۲-۳- تنش‌های القایی منطقه تخریب

محاسبه تنش‌ها در منطقه تخریب و کناره‌ها (هنگامی که تخریب گسترش می‌یابد) برای ارتفاع‌های مختلف مهم است. برای دستیابی به تخریب، منطقه‌ای با ابعاد کافی از پیکره کانسنگ زیربری شده و به تبع آن توده سنگ گسیخته می‌شود و تخریب گسترش می‌یابد. تنش‌های برجا دوباره در اطراف این فضای بزرگ توزیع شده و در پایه‌های پیشروی متمرکز می‌شوند که در آنجا تنش‌های القایی بسیار بیش‌تر از تنش‌های اولیه‌اند. بزرگی و جهت تنش‌های القایی در منطقه تخریب زمانی که تخریب ایجاد شد، رفتار توده‌سنگ را کنترل خواهد کرد [۱۲].

۲-۲-۴- کنترل تخلیه

کنترل تخلیه مهم‌ترین پارامتر در بهینه‌سازی بازایی کانسنگ و کمینه کردن اختلاط در تخریب است. موضوعی که کنترل تخلیه را مهم‌تر می‌کند، این است که سرعت کنترل تخلیه می‌تواند به شدت رفتار تخریب و خردشدگی پیکره کانسنگ را تحت تاثیر قرار دهد. ترتیب بهینه، برقراری تعادل در توالی و سرعت تخلیه در دهانه‌های تخلیه مجزا برای کنترل گسترش پیشانی تخریب ضمن حفظ سرعت‌های استخراج مساوی بین مناطق مختلف است. این کار باعث می‌شود که از شکستن توده سنگ در منطقه تخریب به‌طور صحیح بدون تشکیل پایه‌ها و دودکش که در مناطق با تخلیه ضعیف شکل می‌گیرند، اطمینان حاصل کرد. کنترل تخلیه ضعیف ممکن است باعث حرکت پایه سنگ شکسته شده به سمت دیواره‌ها شود که می‌تواند دیواره‌ها و سقف را نگهداری کند و باعث کاهش سطح زیربرش موثر شود و در نتیجه بر قابلیت تخریب اثر گذارد [۳ و ۱۲]. میانگین سرعت تخلیه (R_{DW})، متغیر بین ۰/۰۵ تا ۰/۷ متر در روز با میانگین ۰/۲ تا ۰/۲۵ متر در روز است [۱۵].

۲-۲-۵- ایجاد برش و سست‌شدگی در مرزها

ایجاد برش و سست‌شدگی در مرزها باعث تغییر تنش‌های القایی در منطقه تخریب و تسهیل گسترش تخریب از

۷-۲-۲- شعاع هیدرولیکی

شعاع هیدرولیکی زیربرش بر سطح تنش‌های القایی در طبقه استخراج موثر است. هر چه شعاع هیدرولیکی افزایش یابد، سرعت تخریب بیشتر شده و سبب توسعه ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌ها می‌شود. برای اطمینان از گسترش تخریب، شعاع هیدرولیکی باید بر اساس بزرگ‌ترین MRMR محاسبه شود. شعاع هیدرولیکی به دهانه حداقل برای شروع تخریب بستگی دارد و نه به سطح. با افزایش دهانه حداقل، شعاع هیدرولیکی افزایش می‌یابد. دهانه حداقل بعد بحرانی برای گسترش تخریب است [۱۶].

۸-۲-۲- سرعت تخریب^۴

سرعت گسترش رو به بالای منطقه تسلیم به عنوان سرعت تخریب شناخته می‌شود. تخریب بزرگ یک روش کمتر انتخابی است که سرعت تخریب تنها راه کنترل اختلاط باطله با ماده معدنی در منطقه تخریب است. کنترل سرعت تخریب عمدتاً تحت تاثیر رفتار تخریب و خردشدگی است [۱۲ و ۱۶].

سرعت تخریب بر کیفیت توده سنگ، تنش‌های القایی و سرعت گسترش درزه‌ها تاثیرگذار است. سرعت تخریب با افزایش سرعت پیشروی زیربرش افزایش می‌یابد، اما ممکن است باعث تشکیل فضای خالی در وسعت زیاد و سبب بروز مشکل شود. در چنین شرایطی، برهم‌کنش ساختارهای اصلی، آتشیاری سنگین و تاثیر آب می‌تواند موجب انفجار هوا^{۱۵} شود. سرعت مناسب تخریب زمانی است که سرعت زیربری (RU) کمتر از سرعت تخریب (RC) و بیشتر از سرعت وارد آمدن آسیب در تونل‌های زیربرش (RD) باشد ($RC > RU > RD$). سرعت نامناسب تخریب زمانی است که $RD > RU > RC$ [۱۲ و ۱۶].

۳- مدلسازی عددی

سنگ به صورت ذاتی ناپیوسته است. بنابراین روش‌هایی که به طور مستقیم ناپیوستگی‌ها را مدل می‌کنند، گزینه بهتری برای ارزیابی قابلیت تخریب‌اند. روش‌های اجزا مجزا (DEM) محاسبات فشرده و بسیار پیچیده‌ای دارند که به طور معمول برای مدلسازی سه بعدی در مقیاس بزرگ نامناسب‌اند. کدهای DEM توده سنگ را به دو صورت

مدل می‌کنند: هم‌چون یک اسمبلی از بلوک‌های قابل تغییر شکل یا صلب در معرض حرکت بلوکی و یا تغییر شکل بلوکی (به عنوان مثال UDEC و 3DEC) و یا به-عنوان ذرات به هم پیوسته صلب و تحت تاثیر شکستگی پیوندها و حرکات ذرات (به عنوان مثال PFC و PFC3D) [۱۸].

یکی از ویژگی‌های روش تخریب بزرگ، بزرگ مقیاس بودن آن است. از این رو مدل مورد نظر باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتوان آن را نماینده شرایط تخریب در روش تخریب بزرگ دانست. در نرم‌افزار PFC نیاز به واسنجی اولیه مدل ساخته شده وجود دارد. واسنجی نرم‌افزار نیاز به شبیه‌سازی آزمایش سه محوره و برزیلی دارد. یعنی با تغییر مکرر سختی نرمال و برشی اجزا، یک ماده تولید می‌شود که منحنی حاصل از آزمون سه محوره و برزیلی آن با نتایج آزمایشگاهی موجود همخوانی داشته باشد. ابعاد ذرات در آزمون‌های شبیه‌سازی شده در حدود میلی‌متر است که با ابعاد کل که در حد سانتی‌متر است همخوانی داشته و مدل به سادگی حل می‌شود، اما این ابعاد را نمی‌توان برای مدلی با ابعاد چند صد متر به کار گرفت. [۸] به دلیل مشکلات استفاده از PFC تصمیم گرفته شد تا از UDEC (نسخه ۵) برای انجام مدلسازی استفاده شود. نرم‌افزار UDEC یک برنامه عددی بر اساس روش اجزا مجزا برای مدلسازی ناپیوسته است. این نرم‌افزار پاسخ محیط ناپیوسته‌ای همچون توده سنگ درزه‌دار را تحت بارگذاری ایستا یا پویا شبیه‌سازی می‌کند. این محیط ناپیوسته به صورت یک اسمبلی از بلوک‌های مجزا تعریف می‌شود. ناپیوستگی‌ها همچون شرایط مرزی بین بلوک‌ها رفتار می‌کنند. جابه‌جایی‌های بزرگ در طول ناپیوستگی‌ها و چرخش برای بلوک‌ها مجاز است. با استفاده از UDEC می‌توان رفتار مواد مختلف را مدل کرد، یعنی هم امکان ساختن بلوک بکر وجود دارد و هم ناپیوسته که این امر ساخت محیط ناپیوسته زمین‌شناسی و امثال آن را ممکن می‌سازد [۱۹].

۱-۳- روش مدلسازی

همان‌گونه که گیلبرد^{۱۶} و همکاران [۲۰] و شاروک^{۱۷} و همکاران [۲۱] نشان دادند، شبیه‌سازی فرآیندهای ژئوتکنیکی و استخراج در مقیاس بزرگ به طور توأم در DEM به صورت سه‌بعدی به دلیل تراکم محاسبات بسیار بالای روش عددی، غیرعملی است. در حال حاضر نیز،

رسانده شد و سپس مدل رفتاری درزه‌ها به موهر کولمب تغییر یافت و زیربرش ایجاد شد.

با توجه به این که در اغلب مطالعات عددی و تجربی گذشته سه دسته درزه در مدل وارد شده است، از این رو در مدل اولیه ساخته شده سه دسته درزه با شیب‌های ۲۰، ۷۰ و ۹۰ درجه وارد شد. درزه‌های وارد شده در مدل به صورت سراسری و بدون بازشدگی اعمال شده‌اند.

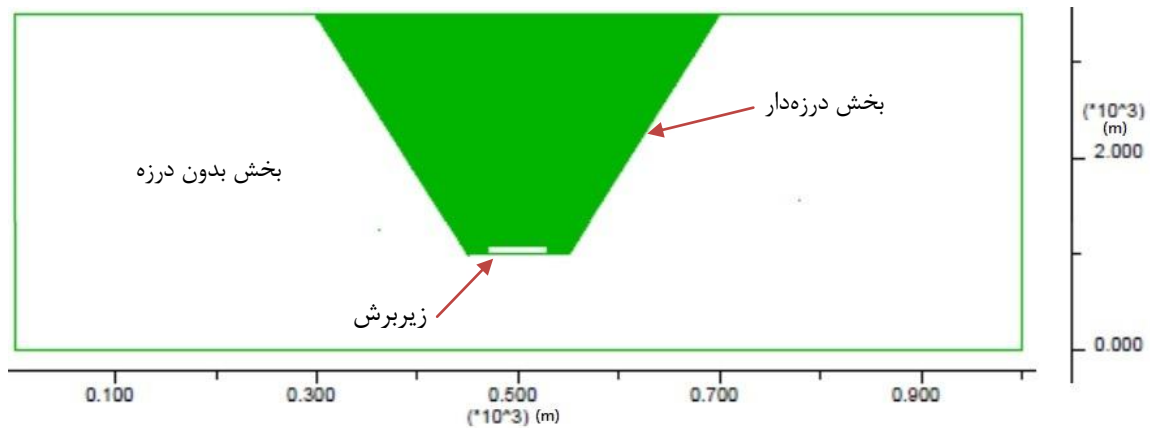
بر اساس مطالعات بین‌المللی تخریب ارتفاع بلوک ماده معدنی ۲۱۰ متر، عرض زیربرش ۶۰ متر و ارتفاع آن ۸ متر در نظر گرفته شد [۱۵]. زیربرش به صورت یک‌باره در مدل ایجاد می‌شود. ارتفاع باطله و روباره ۲۰۰ متر در نظر گرفته شد که ۴۰ متر آن در مدل مشخص است و باقیمانده آن به صورت تنش ثقلی بر مرز بالایی مدل وارد شده است. خصوصیات ماده معدنی و باطله فراگیر یکسان در نظر گرفته شده است. در این مدلسازی فرض شده است که تخلیه به صورت منظم انجام می‌گیرد. مرزهای جانبی با تکیه‌گاه غلتکی و مرز پایینی با تکیه‌گاه مفصلی ثابت شده‌اند. به عبارت دیگر، کناره‌های مدل در راستای افقی و قسمت پایینی مدل در راستای افقی و قائم محدود شده‌اند. خصوصیات مدل ساخته شده بر مبنای خصوصیات استفاده شده در مدلسازی یازمنسکی و همکاران [۲۲] و همچنین مطالعات بین‌المللی تخریب انتخاب شده است. در مدل‌های ساخته شده همراه تنش ثقلی، نسبت تنش افقی به قائم و مقاومت فشاری سنگ بکر بر دهانه حداقل برای شروع تخریب بررسی می‌شود. به دلیل زیاد بودن متغیرهای تاثیرگذار بر قابلیت تخریب، بررسی همه متغیرها به صورت چند عاملی نیاز به صرف زمان بسیار زیادی دارد. از این رو در این تحقیق تنها متغیرهایی که طبق مطالعات قبلی اهمیت بیشتری داشته‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است.

ادامه محدودیت‌های کامپیوتری سبب محدود کردن کاربرد DEM به مدل‌های کوچک مقیاس مسایل مقدار مرزی در سنگ درزه‌دار متراکم، شده است [۵].

مدلسازی دو بعدی امکان وارد کردن جزئیات بیشتر را با توجه به ظرفیت کامپیوتری در دسترس در مدل فراهم می‌کند. نتایج یاد شده در این تحقیق مفهومی بوده و بر مبنای مطالعه موردی نیست. با این حال، هندسه مدل و خصوصیات ژئومکانیکی استفاده شده در مدلسازی بر اساس داده‌های معادن واقعی تخریب بزرگ انتخاب شده است.

مدل مورد بررسی با ابعاد ۱۰۰۰ متر در ۳۵۰ متر در نظر گرفته شد که برای صرفه‌جویی در زمان اجرای برنامه به دو بخش ناحیه دارای درزه و بدون درزه تقسیم شده است. شکل ۱ هندسه مدل را نشان می‌دهد. بخش درزه-دار مناطقی را که پتانسیل تخریب دارند در بر می‌گیرد و در نتیجه تراکم مش بالاتری دارند (اندازه مش ۰/۵ متر). بخش بدون درزه تراکم مش کمتری دارد (اندازه مش ۱۰ متر). مرزهای مدل برای جلوگیری از تاثیرات مرزها بر نتایج توسعه داده شده‌اند. این نوع هندسه و ابعاد مش قبلاً توسط یازمنسکی^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۰) [۲۲] در تحلیل نشست حاصل از استخراج به روش تخریب بزرگ و همچنین جبین‌پور [۸] در بررسی عوامل ژئومکانیکی درزه‌ها بر قابلیت تخریب استفاده شده است. مدل ساخته شده از نظر ابعاد بزرگ‌تر از مدل‌های یاد شده است. با انجام آزمایش مشاهده شد که نتایج حاصل از این هندسه و حالتی که تمام بلوک درزه‌دار باشد، همخوانی مناسبی دارد. مرزهای مدل در تمام شرایط مورد بررسی یکسان بوده است.

در مدل عددی از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده شد. طبق روند مدلسازی ابتدا مدل با رفتار الاستیک به تعادل



شکل ۱- هندسه نهایی مدل تخریب بزرگ

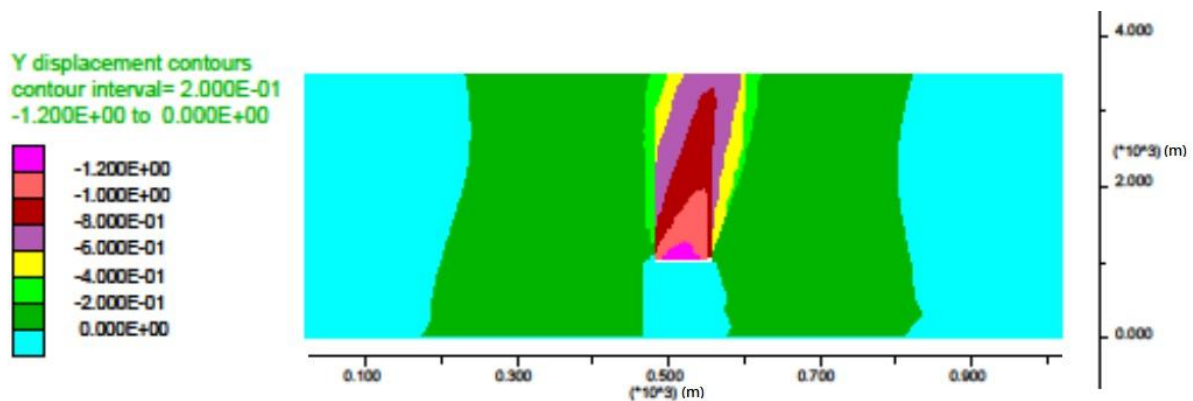
داشتند، حذف و یا به عبارت دیگر تخلیه شدند (شکل ۳) و مساله مجدد حل شد. شکل نهایی منطقه تخریب در شکل ۴ نشان داده شده است. می‌توان نتیجه گرفت که:

۱- شکل منطقه تخریب حاصل با توجه به موارد واقعی منطقی است.

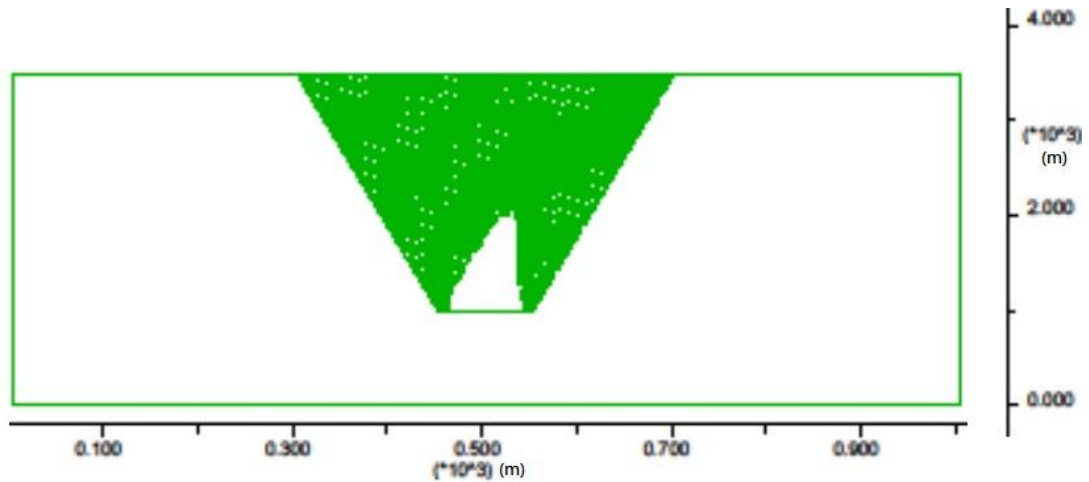
۲- وقتی تخریب اولیه رخ می‌دهد تا رسیدن به سطح بلوک ماده معدنی ادامه می‌یابد و بخشی از باطله را نیز در بر می‌گیرد. به عبارت دیگر پدیده قوس‌زدگی که باعث توقف تخریب می‌شود، اتفاق نمی‌افتد. همچنین جهت درزه‌ها جهت گسترش تخریب را نیز کنترل می‌کند.

طبق نظر ساینزباری (۲۰۱۲) در مدلسازی‌های عددی منطقه تخریب شده با جابه‌جایی بزرگ‌تر از ۱ متر بیان می‌شود. این معیار با استفاده از تحلیل‌های عددی انجام شده در معدن نورس پارک (Northparkes) استرالیا انتخاب شده است و با نتایج حاصل از معدن پالابورا (Palabora) در آفریقای جنوبی اعتبارسنجی شده است [۵].

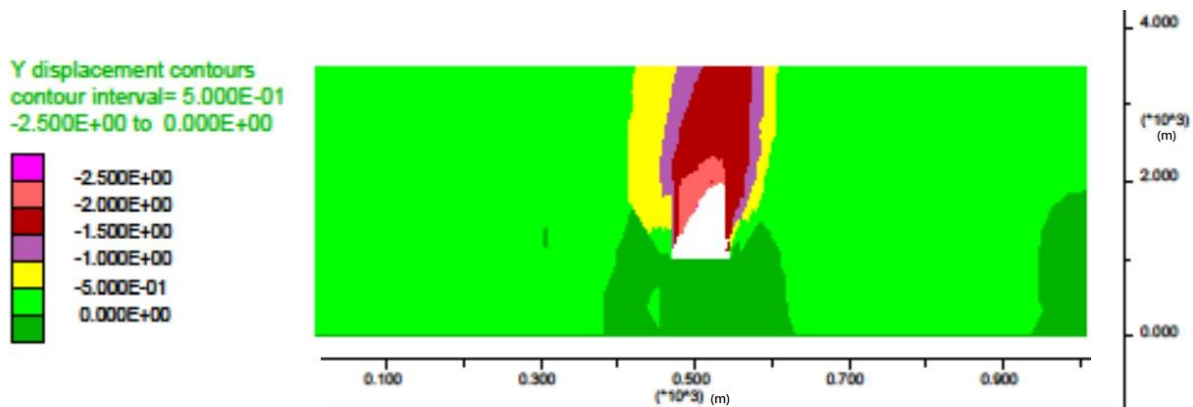
در مدل اولیه ساخته شده با توجه به جابه‌جایی‌های حاصل تخریب اولیه اتفاق افتاده است (شکل ۲). در مرحله بعد بلوک‌هایی که جابه‌جایی بزرگ‌تر از ۱ متر



شکل ۲- مدل با زیربرش ۶۰ متر و میزان جابه‌جایی‌های اتفاق افتاده



شکل ۳- شکل منطق تخریب پس از تخلیه مرحله اولیه



شکل ۴- شکل نهایی منطقه تخریب

۲-۳- بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر قابلیت تخریب

شیب یکی از دسته درزه‌ها تغییر داده شد. مدل‌های در نظر گرفته شده برای بررسی تک عاملی عبارت‌اند از :

- پنج مدل برای ارزیابی تاثیر عمق معدنکاری (H)
- چهار مدل برای یافتن تاثیر نسبت تنش افقی به قائم (K)
- پنج مدل برای ارزیابی تاثیر مقاومت فشاری سنگ بکر (UCS)
- چهار مدل برای ارزیابی تاثیر چسبندگی درزه (C_z)
- هفت مدل برای یافتن تاثیر زاویه اصطکاک درزه (ϕ_z)
- هشت مدل برای ارزیابی تاثیر شیب درزه (α)

تعداد ۲۸۳ دهانه برای یافتن تاثیر پارامترهای تنش ثقلی، نسبت تنش افقی به قائم، مقاومت فشاری سنگ بکر، تعداد دسته درزه‌ها، چسبندگی، زاویه اصطکاک، شیب و فاصله‌داری درزه‌ها بر دهانه حداقل برای شروع تخریب به صورت تک عاملی بررسی شد. در هر مدل تنها یک پارامتر تغییر داده شد و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. جدول ۱ این شرایط ثابت را نشان می‌دهد. معیار شروع تخریب رسیدن به جابه‌جایی یک متر در سقف زیربرش است. در هر حالت دهانه زیربرش تا آنجا تغییر داده شد که جابه‌جایی مورد نظر حاصل شود. تغییرات در خصوصیات درزه‌ها به غیر از شیب برای تمامی آن‌ها اعمال شد. برای تحلیل حساسیت شیب درزه‌ها، فقط

این تحقیق با مطالعه انجام شده توسط جبین پور عبارت‌اند از:

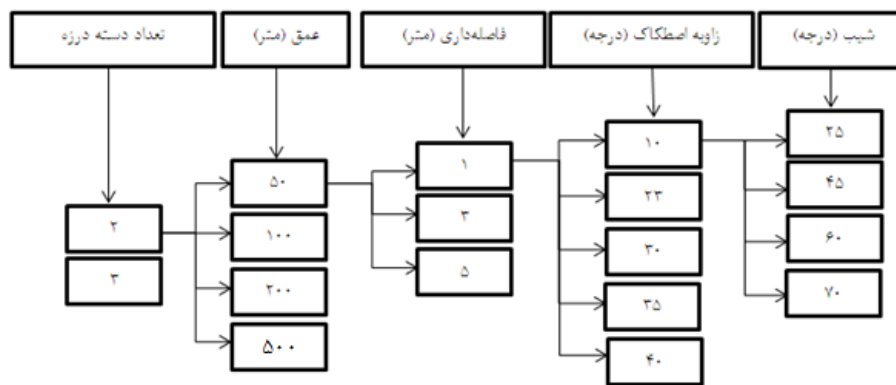
- بررسی تاثیر نسبت تنش قائم به افقی، تعداد دسته درزه و عمق
- در نظر گرفتن دامنه وسیع‌تر برای متغیرها
- بررسی تعداد دهانه‌های بیش‌تر و بزرگ‌تر برای هر مقدار از متغیرها
- در نظر گرفتن معیار تخریب متفاوت و مستند (جابه‌جایی ۱ متر)
- کمی کردن نتایج
- وارد کردن معیار عمق به جای چسبندگی در بررسی نهایی

- هفت مدل برای یافتن تاثیر فاصله‌داری درزه (S)
- چهار مدل برای یافتن تاثیر تعداد دسته درزه (N)

جدول ۱ - شرایط ثابت در بررسی تک عاملی متغیرها

خصوصیت	UCS (MPa)	S (m)	H (m)	K	C _j (MPa)	Φ _j (°)	N
مقدار	۱۳۰	۳	۵۰۰	۱	۰	۳۰	۳

برای بررسی پایانی، یک درخت پنج عاملی تشکیل شد که هر کدام مقادیری دارند که بر اساس تغییر تک عاملی نتیجه گرفته شده‌اند. در نهایت ۴۸۰ حالت مختلف بررسی شد. در هر بررسی دهانه زیربرش تا رسیدن به جابه‌جایی یک متر در سقف تغییر داده شد. شکل ۵، شاخه‌های درخت مورد نظر را نشان می‌دهد. این شیوه بررسی قبلاً توسط جبین پور [۸] به کار گرفته شده است. تفاوت‌های



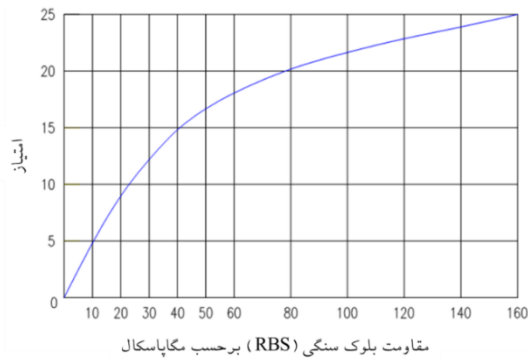
شکل ۵ - درخت مورد بررسی و مسیرهای انتخابی در مدلسازی

بازه انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت این عامل در شکل ۵ نشان داده شده است.

شکل ۶ نشان دهنده افزایش حداقل دهانه مورد نیاز برای وقوع تخریب با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ است. این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ قابلیت تخریب توده سنگ کاهش می‌یابد که با اظهارات دیگر محققان همخوانی دارد. همچنین مشاهده می‌شود که در مقاومت‌های فشاری بالا، تغییر در این عامل تاثیر قابل توجهی بر تغییرات دهانه حداقل ندارد. این تاثیر به این دلیل است که در مقاومت فشاری بالا (بالای حدود ۱۰۰ مگاپاسکال) شکست در اثر گسیختگی درزه‌ها اتفاق می‌افتد و تنش پیش از این که بر مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ غلبه کند، از

۳-۲-۱- مقاومت فشاری سنگ بکر

مقاومت فشاری تک‌محوری، حداکثر مقدار مقاومتی است که سنگ در برابر تنش فشاری تحمل می‌کند. مقاومت فشاری تک‌محوری به عنوان یک پارامتر مهم در اغلب سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ، مانند RMR و MRMR وارد می‌شود. عواملی مانند آهنگ آلتراسیون، آهنگ هوازدگی، شکستگی‌های داخلی و ریزترک‌ها، چگالی و تخلخل بر مقاومت فشاری تک‌محوری تاثیر می‌گذارند. رفیعی و همکاران اظهار داشته‌اند که افزایش این عامل باعث کاهش قابلیت تخریب توده سنگ می‌شود [۱۱] و [۱۶]. از آنجا که مقاومت فشاری سنگ‌ها از ۵ تا ۳۵۰ مگاپاسکال تغییر می‌کند [۲۳]، تحلیل حساسیت در این



شکل ۷- نمودار امتیاز مقاومت بلوک سنگی [۴]

۳-۲-۲- نسبت تنش افقی به قائم

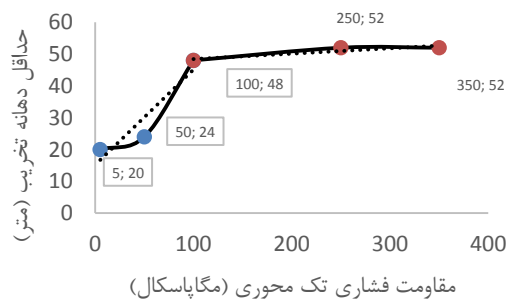
نسبت تنش افقی به قائم بر مقدار تنش‌های القایی ایجاد شده در منطقه تخریب در زمان شروع تخریب اثر گذاشته و با توجه به جهت یافتگی درزه‌ها، به طور قابل توجهی گسترش تخریب و سرعت آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تنش‌های افقی زیاد می‌تواند باعث قفل‌شدگی بلوک‌های سنگی در هم شود و توده‌سنگ را در مقابل گسترش تخریب در جایی که ناپیوستگی‌های کم شیب در توده سنگ وجود ندارند، پایدار کند [۱۲]. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت این عامل در شکل ۸ نشان داده شده است. حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات این عامل چندان زیاد نیست (شکل ۸). با ایجاد زیربرش تنش افقی در بالا و پایین زیربرش افزایش و تنش قائم در این قسمت‌ها کاهش می‌یابد. اگر تفاضل دو تنش القایی بزرگتر از مقاومت فشاری تک محوری سنگ یا مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها باشد منطقه‌ای در اطراف زیربرش دچار سست‌شدگی می‌شود که قسمتی از این منطقه همزمان با تخلیه، تخریب می‌شود. اگر این تفاضل تخریب به سمت بالا گسترش می‌یابد. به عبارت دیگر تاثیر نسبت تنش افقی به قائم بیشتر بر روی گسترش تخریب است. از طرف دیگر بازه تغییر کم این متغیر (از ۰/۳ تا ۱/۳) می‌تواند سبب این تغییر نامحسوس حداقل دهانه تخریب برحسب این پارامتر باشد.

در مدل‌های ساخته شده مقدار این پارامتر از ۰/۳ تا ۱/۳ تغییر داده شد. مشاهده می‌شود با افزایش مقدار K مقدار جابه‌جایی منطقه تخریب در بیشتر دهانه‌ها تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد (شکل ۹). همان‌طور که در شکل ۹

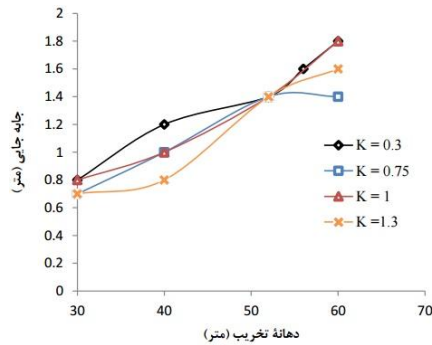
مقاومت برشی درزه‌ها فراتر رفته و باعث حرکت بلوک‌ها در امتداد درزه‌ها می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از مطالعات بین‌المللی تخریب میانگین UCS برای سنگ معادن زیرزمینی ۱۳۰ مگاپاسکال است [۱۵]، از این رو با در نظر گرفتن مقادیر بالا برای این عامل، این عامل در بررسی نهایی در نظر گرفته نشده است.

در روش لابسچر برای محاسبه مقاومت بلوک سنگی (RBS) از مقدار مقاومت سنگ بکر (IRS) استفاده می‌شود. عوامل مختلفی با توجه به شرایط بلوک سنگی بر مقدار RBS تاثیرگذار است. در روش لابسچر، پس از محاسبه RBS با استفاده از نمودار شکل ۷ امتیاز مربوط به دست می‌آید.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در روش لابسچر هم هر چه مقاومت سنگ بکر افزایش یافته امتیاز مربوط به این عامل افزایش داشته و در نتیجه مقدار MRMR افزایش می‌یابد و شرایط پایداری بهتر می‌شود. علاوه بر این، افزایش امتیاز در مقاومت‌های پایین‌تر محسوس‌تر است و هر چه مقاومت بیشتر شده است تغییرات امتیاز کاهش داشته است.

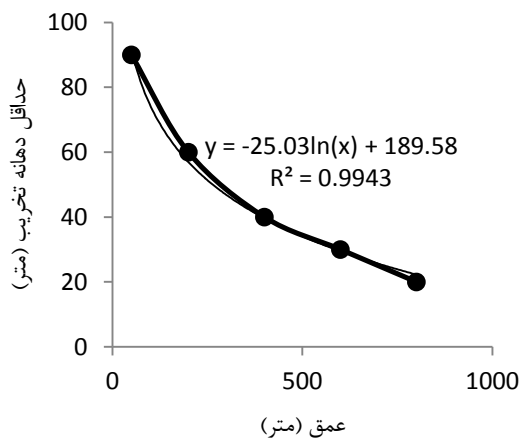


شکل ۶- تاثیر مقاومت فشاری تک محوری سنگ بر حداقل دهانه تخریب



شکل ۹- نمودار حداقل دهانه تخریب- جابه‌جایی در نسبت‌های مختلف تنش افقی به قائم

همان‌طور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است با افزایش عمق کانسار به دلیل افزایش تنش‌های برجا مقدار حداقل دهانه تخریب کاهش می‌یابد. بر اساس این نمودار مقادیر نهایی انتخاب شدند. شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نمودارهای مربوط به تاثیر عمق را در بخشی از درخت مورد مطالعه نشان می‌دهند. بررسی روند تغییرات دهانه بر حسب هر متغیر در کل درخت به دلیل تعداد بسیار زیاد این حالات در این مقاله میسر نیست، به همین دلیل سعی شده است تا نمودارها به صورتی آورده شود که معرف روند در کل درخت مورد مطالعه باشد.

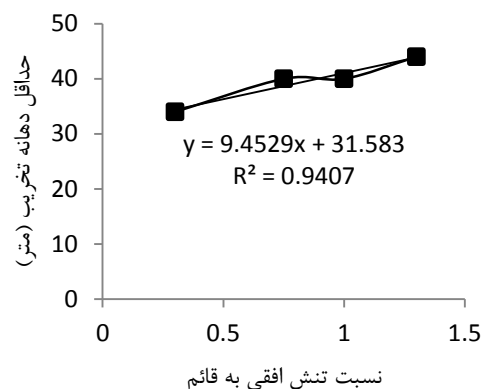


شکل ۱۰- تاثیر عمق بر حداقل دهانه تخریب در بررسی تک عاملی

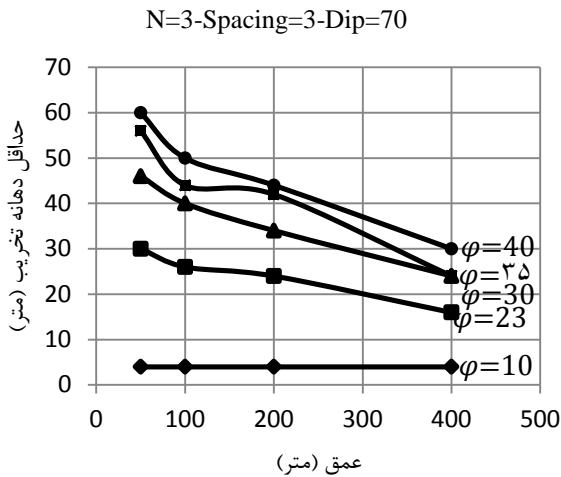
مشخص است، در دهانه ۳۰ متری اختلاف جابه‌جایی‌ها ۱۰ سانتی‌متر، در دهانه ۴۰ متری اختلاف جابه‌جایی‌ها ۴۰ سانتی‌متر، در دهانه ۵۲ متری اختلاف جابه‌جایی صفر و در دهانه ۶۰ متری این مقدار ۲۰ سانتی‌متر است. از این می‌توان نتیجه گرفت که میزان جابه‌جایی‌های سقف زیربرش نسبت به دهانه روند مشخصی ندارد. اما نتایج حاصل از مدلسازی نشان می‌دهد که ارتفاع منطقه تخریب شده در اثر زیربرش با افزایش K کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر تغییر در مقدار K بر گسترش تخریب تاثیرگذار است. با توجه به این نتیجه و در نظر گرفتن مقدار یک برای این عامل، برای کاهش تعداد متغیرها، این متغیر در بررسی نهایی لحاظ نشده است.

۳-۲-۳- عمق

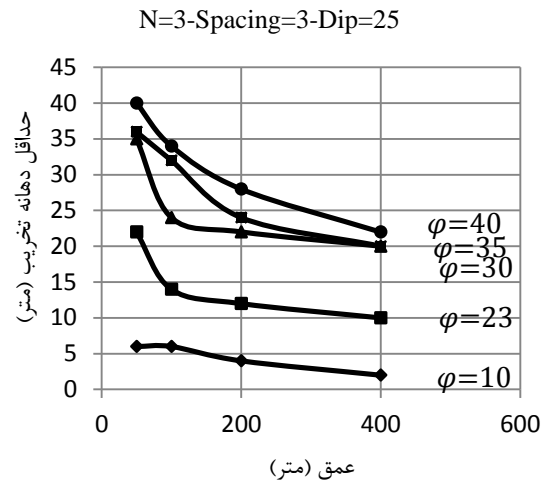
در میان عوامل ژئومکانیکی، تنش تاثیر زیادی بر قابلیت تخریب توده سنگ دارد. با افزایش عمق کانسار، تنش ثقلی افزایش می‌یابد. برای بررسی تک عاملی روند تغییر حداقل دهانه لازم برای شروع تخریب نسبت به عمق، عمق‌های ۵۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ متر انتخاب شد. این عمق‌ها به صورت روباره در مدل وارد می‌شوند. به عبارت دیگر ارتفاع ۲۱۰ متری ماده معدنی ثابت است و فقط مقدار روباره تغییر می‌کند.



شکل ۸- تاثیر نسبت تنش قائم به افقی بر حداقل دهانه تخریب



شکل ۱۰ - تاثیر عمق بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات زاویه اصطکاک داخلی، شیب درزه ۷۰ و فاصله‌داری ۳ متر



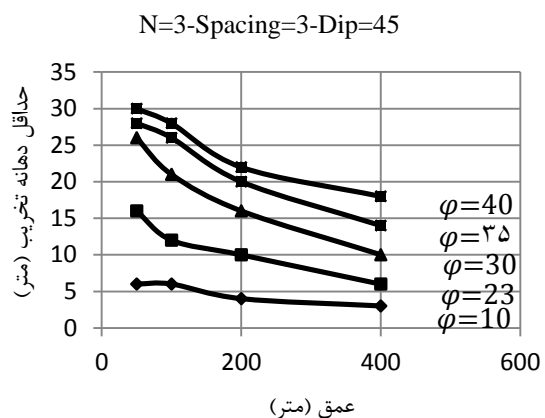
شکل ۱۱ - تاثیر عمق بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات زاویه اصطکاک داخلی، شیب درزه ۲۵ و فاصله‌داری ۳ متر

از این نمودارها می‌توان مشاهده کرد که با افزایش عمق شرایط پایداری نامساعد شده و حداقل دهانه برای شروع تخریب کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات این عامل در زوایای اصطکاک متوسط تا بالا بیشتر تاثیرگذار است. به عبارت دیگر در مقادیر پایین زاویه اصطکاک درزه، عمق بر حداقل دهانه تخریب تاثیر چندانی ندارد. با مقایسه نتایج به‌دست آمده نتیجه گرفته می‌شود که آهنگ تغییرات در شیب‌های ۴۵ و ۶۰ کمتر است.

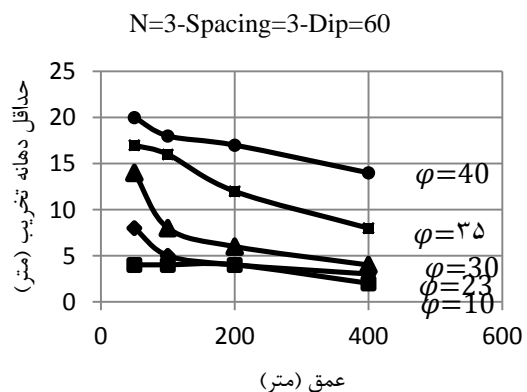
۳-۲-۴- فاصله‌داری درزه

فاصله‌داری درزه‌ها (فاصله عمودی بین ناپیوستگی‌های مجاور) از جمله خصوصیات هندسی درزه است که نقش زیادی در قابلیت تخریب توده‌سنگ دارد. فاصله‌داری درزه‌ها ابعاد بلوک‌های ایجاد شده در توده سنگ را تعیین می‌کند. مکانیزم تغییر شکل و گسیختگی با نسبت فاصله‌داری به ابعاد حداقل دهانه ریزش تغییر می‌کند. همچنین خواص مهندسی مانند قابلیت تخریب، میزان خردشدگی و نفوذپذیری توده سنگ با تغییر این عامل تغییر می‌کنند. به دلیل اهمیت این عامل برای یافتن تاثیر فاصله‌داری درزه‌ها بر حداقل دهانه لازم برای شروع تخریب هفت مدل با فاصله‌داری‌های مختلف ساخته شد که در جدول ۲ آورده شده‌اند. سایر پارامترها طبق جدول ۱ اعمال شده‌اند.

با توجه به کمبود اطلاعات فاصله‌داری درزه بر اساس مطالعات بین‌المللی تخریب مقادیر استفاده شده بر اساس

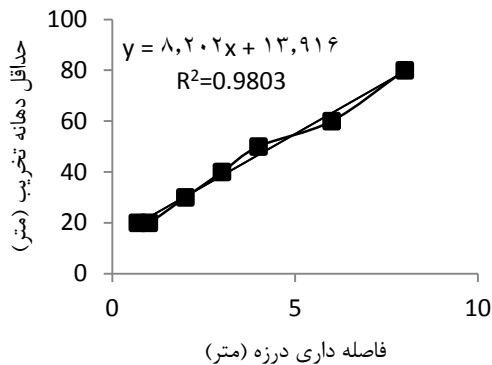


شکل ۱۲ - تاثیر عمق بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات زاویه اصطکاک داخلی، شیب درزه ۴۵ و فاصله‌داری ۳ متر

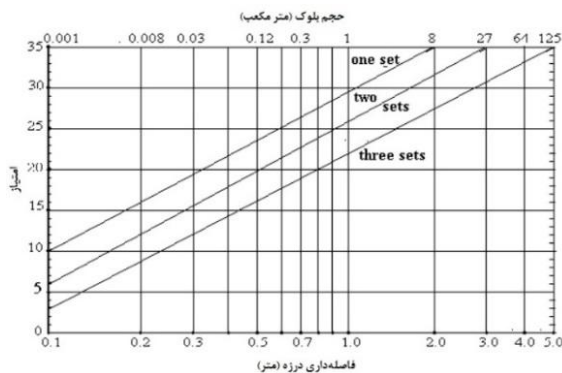


شکل ۱۳ - تاثیر عمق بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات زاویه اصطکاک داخلی، شیب درزه ۶۰ و فاصله‌داری ۳ متر

از تاثیر بیشتر عمق در فاصله‌داری کم بر حداقل دهانه تخریب نسبت به تاثیر فاصله‌داری درزه است.



شکل ۱۵- تاثیر فاصله‌داری درزه بر حداقل دهانه تخریب در بررسی تک عاملی



شکل ۱۶- نمودار محاسبه امتیاز فاصله‌داری درزه‌ها در روش لابیچرا [۱۲]

طبقه‌بندی RMR_{76} بیناوسکی [۲۴] انتخاب شده‌اند و بیانگر فاصله‌داری زیاد، متوسط و کم‌اند. در فاصله‌داری زیاد حد بالایی بر اساس جدول لابیچر درباره میزان خردشدگی ۸ متر (جدول ۳) انتخاب شده است. در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که با افزایش این عامل، مقدار حداقل دهانه برای شروع تخریب افزایش می‌یابد که با نمودار امتیاز مربوط به این عامل در روش لابیچر مطابقت دارد. در روش لابیچر فاصله‌داری درزه‌ها با توجه به تعداد دسته درزه‌های موجود در منطقه مورد نظر تفکیک شده و با استفاده از شکل ۱۶ امتیازی به آن اختصاص داده می‌شود. در این روش با افزایش تعداد دسته درزه‌ها امتیاز مربوط در محاسبه امتیاز معدنکاری توده سنگ کاهش می‌یابد. شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ نمودارهای مربوط به تاثیر فاصله‌داری درزه را در بخشی از درخت مورد مطالعه به ازای شیب ۵۰ درجه نشان می‌دهند. به دلیل یکسان بودن روند در سایر شیب‌ها، از آوردن نمودار مربوط به آن‌ها خودداری شده است. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش فاصله‌داری درزه، حداقل دهانه لازم برای شروع تخریب به صورت خطی افزایش می‌یابد که با نتایج تجربی همخوانی دارد. از این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله‌داری درزه شرایط پایداری نامساعد شده و حداقل‌دهانه برای شروع تخریب افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات این عامل در زوایای اصطکاک پایین تاثیرگذاری چندانی ندارد. به عبارت دیگر در این مورد نیز زاویه اصطکاک نقش بیشتری را نسبت به فاصله‌داری در تغییر حداقل دهانه برای شروع تخریب دارد (شکل ۱۵). نکته دیگر، افزایش شیب تغییرات با افزایش زاویه اصطکاک است (شکل ۱۸ تا ۲۰). از طرف دیگر در فاصله‌داری متوسط و زاویه اصطکاک بالا مقادیر حداقل دهانه برای شروع تخریب نزدیک‌اند (شکل ۱۷، ۱۸ و ۱۹). در نتیجه تغییرات حداقل دهانه تخریب در فاصله‌داری کم، اندک است. به علاوه با افزایش عمق، حداقل دهانه تخریب در فاصله‌داری کم به هم نزدیک می‌شود که نشان

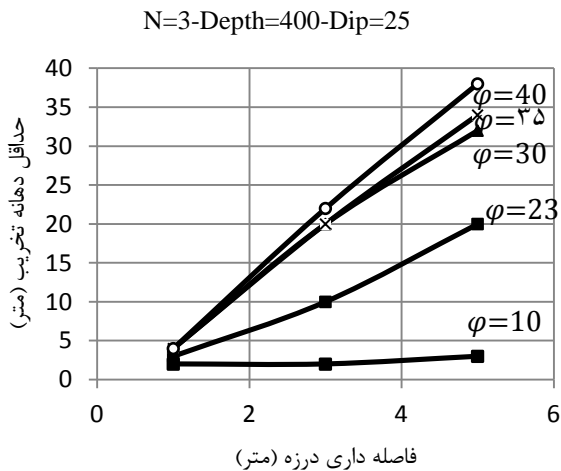
جدول ۲ - مقادیر استفاده شده در تحلیل حساسیت فاصله‌داری درزه [۲۴]

پارامتر	کم	متوسط	زیاد
فاصله‌داری (RMR_{76})	۰/۳-۱ متر	۱-۳ متر	> ۳
مقدار استفاده شده	۰/۷	۱ ۲ ۳ ۴ ۶ ۸	

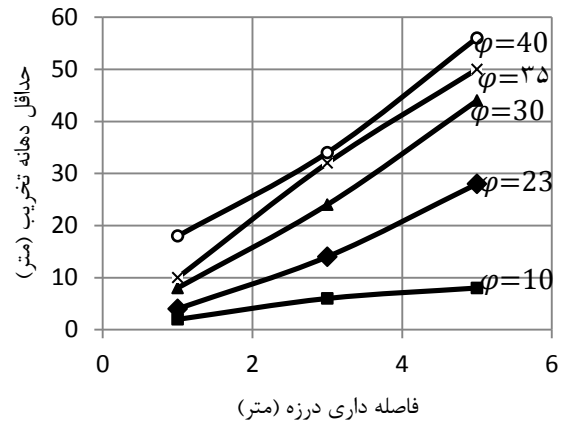
جدول ۳- میزان خردشدگی در معادن تخریب بزرگ [۱۲]

کلاس سنگ خردشده	تاثیر بالقوه	محدوده طول (متر)	طول میانگین (متر)	حجم متوسط (متر مکعب)	بیشترین حجم (متر مکعب)
A	۱۰۰ درصد آن از طریق گریزلی ۰/۳×۱/۵ متر مربعی عبور می‌کند.	کمتر از ۰/۵	۰/۲۵	۰/۰۰۴	۰/۰۳
B		۰/۵ تا ۱	۰/۷۵	۰/۱۱	۰/۲۵
C	۱۰۰ درصد آن در صندوقه LHD جای می‌گیرد.	۱ تا ۲	۱/۵	۰/۸	۲
D	گیر کردن دهانه تخلیه	۲ تا ۴	۳	۷	۱۶
E	گیر کردن شدید	۴ تا ۸	۶	۵۴	۱۲۸
F	بسته شدن قیف تخلیه	۸ تا ۱۶	۱۲	۴۳۲	۱۰۲۴
G	بسته شدن شدید تخلیه	بزرگتر از ۱۶	۲۴	۳۴۵۶	نامحدود

شکل ۱۹- تاثیر فاصله‌داری درزه بر حداقل دهانه تخریب برحسب تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در شیب درزه ۲۵ درجه و عمق ۲۰۰ متر



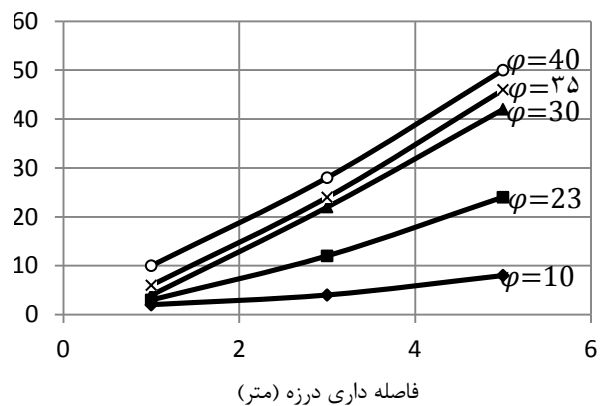
N=3-Depth=100-Dip=25



شکل ۱۸- تاثیر فاصله‌داری درزه بر حداقل دهانه تخریب برحسب تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در شیب درزه ۲۵ درجه و عمق ۱۰۰ متر

شکل ۲۰- تاثیر فاصله‌داری درزه بر حداقل دهانه تخریب برحسب تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در شیب درزه ۲۵ درجه و عمق ۴۰۰ متر

N=3-Depth=200-Dip=25

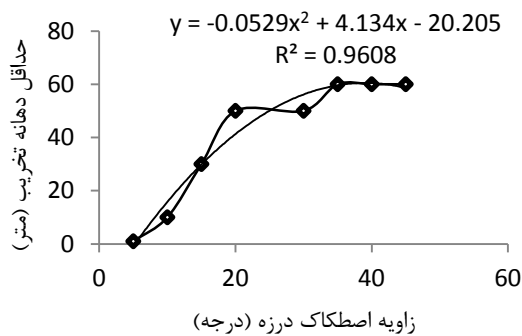


۳-۲-۵- زاویه اصطکاک درزه

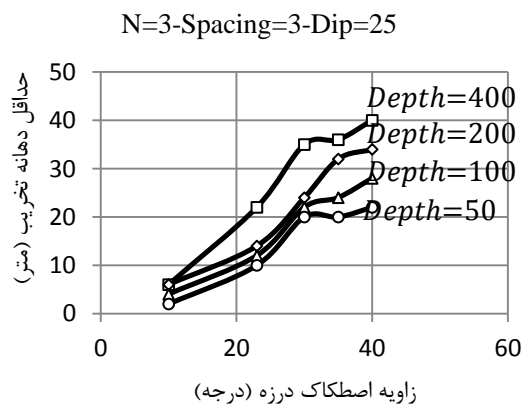
طبق گزارش تیم مطالعات بین‌المللی تخریب معمولاً دسترسی به اطلاعات مرتبط با مقاومت برشی و تغییر شکل‌پذیری در معادن تخریب بزرگ بسیار محدود است. از این‌رو در این تحقیق از اطلاعات موجود در مقالات و کتب استفاده شد.

برای یافتن تاثیر زاویه اصطکاک درزه‌ها بر حداقل دهانه لازم برای شروع تخریب هفت مدل مختلف ساخته شد. مقادیر بر اساس خصوصیات مربوط به مواد پرکننده

روندی افزایشی بالاترین مقادیر را دارد و این روند تا زاویه اصطکاک ۳۰ درجه خطی است (شکل ۲۳). در فاصله-داری متوسط و زاویه اصطکاک بالا مقادیر حداقل دهانه تخریب نزدیک‌اند. این تغییرات برای فاصله‌داری ۱، ۳ و ۵ یکسان است. با مقایسه نتایج حاصل مشخص می‌شود که تغییرات حداقل دهانه تخریب برحسب زاویه اصطکاک درزه در فاصله‌داری کم و زوایای اصطکاک پایین، اندک است و با افزایش فاصله‌داری به شکل تقریباً خطی افزایش یافته است. به علاوه با افزایش فاصله‌داری درزه، روند تغییرات شیب بیشتری می‌گیرد و در زوایای ۳۵ و ۴۰ درجه تغییرات بسیار ناچیزی در حداقل دهانه تخریب دیده می‌شود (شکل ۲۴). در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود که افزایش تعداد دسته درزه و کاهش زاویه اصطکاک درزه باعث کاهش حداقل دهانه تخریب شده است. تغییرات حداقل دهانه تخریب تا زاویه اصطکاک ۳۰ درجه پایین و سپس با شیب تندی افزایش یابد.



شکل ۲۱- تاثیر زاویه اصطکاک درزه بر حداقل دهانه تخریب در بررسی تک عاملی



شکل ۲۲- تاثیر زاویه اصطکاک درزه بر حداقل دهانه تخریب برحسب تغییرات عمق برای فاصله‌داری ۳ متر، شیب ۲۵ درجه و ۳ دسته درزه

ناپیوستگی‌ها انتخاب شده‌اند که در جدول ۴ آورده شده است. سایر پارامترها طبق جدول ۱ ثابت‌اند.

با توجه به اهمیت زاویه اصطکاک و نقشی که در مقاومت برشی درزه دارد، این عامل مورد بررسی واقع شد. شکل ۲۱ نحوه تغییرات حداقل دهانه را برحسب این عامل نمایش می‌دهد. مطابق شکل، افزایش زاویه اصطکاک، باعث مشکل‌تر شدن تخریب و افزایش حداقل دهانه می‌شود. با توجه به نمودار حاصل و همچنین نمودار فراوانی زاویه اصطکاک داخلی نشان داده شده در جدول ۴ مقادیر زاویه اصطکاک برای بررسی نهایی انتخاب شد. شکل‌های ۲۲ تا ۲۴ نمودارهای مربوط به تاثیر زاویه اصطکاک درزه را در بخشی از درخت مورد مطالعه نشان می‌دهند.

جدول ۴- مقاومت برشی ناپیوستگی‌های پر شده و مواد پرکننده [۲۵]

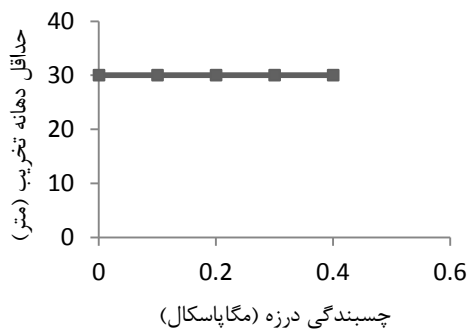
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (MPa)	سنگ
۴۲	۰٫۲۴	بازالت
۷٫۵	۰٫۱۵	بنتونیت
۱۲-۱۷	۰٫۰۹-۰٫۱۲	
۹-۱۳	۰٫۰۶-۰٫۱	رس
۱۲-۱۸٫۵	۰-۰٫۱۸	
۸٫۵-۲۹	۰-۰٫۲۷	شیل بنتونیتی
۳۲	۰٫۰۶	شیل رسی
۵	۰٫۰۴	دولومیت
۲۶٫۵	.	دیوریت، گرانودیوریت و پورفیری
۱۳-۱۴	۰٫۱	آهک
۱۴	۰٫۳۶	مونت موریونیت
۳۲	۰٫۰۳-۰٫۰۸	شیست و کوارتزیت
۳۳	۰٫۰۵	اسلیت
۳۶-۳۸	-۰٫۰۹	کوارتز، کائولن و پیرولولوزیت
	۰٫۰۴۲	

با افزایش عمق و زاویه اصطکاک تا ۳۰ درجه، حداقل دهانه تخریب با شیب نسبتاً زیاد افزایش می‌یابد و از آنجا به بعد شیب بسیار کم می‌شود و در برخی عمق‌ها حتی ثابت باقی می‌ماند. حداقل دهانه تخریب به ازای زاویه اصطکاک ۱۰ درجه برای تمامی شیب‌های درزه یکسان است ولی روند افزایشی حداقل دهانه با افزایش زاویه اصطکاک با شیب از ۲۵ تا ۶۰ درجه درزه کاهش می‌یابد. در زاویه شیب ۷۰ درجه درزه، حداقل دهانه تخریب با

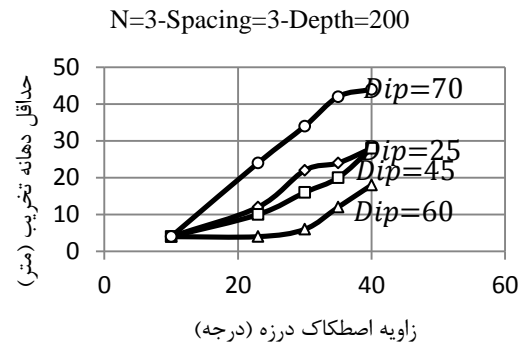
در روش لابسچر زاویه اصطکاک درزه در بخش امتیاز شرایط درزه آورده می‌شود که با افزایش زبری سطح درزه و در نتیجه افزایش زاویه اصطکاک درصد تعدیل از امتیاز ۴۰ بیشتر می‌شود و مقدار MRMR افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار شعاع هیدرولیکی لازم برای تخریب افزایش می‌یابد [۱۲].

۳-۲-۶- چسبندگی درزه

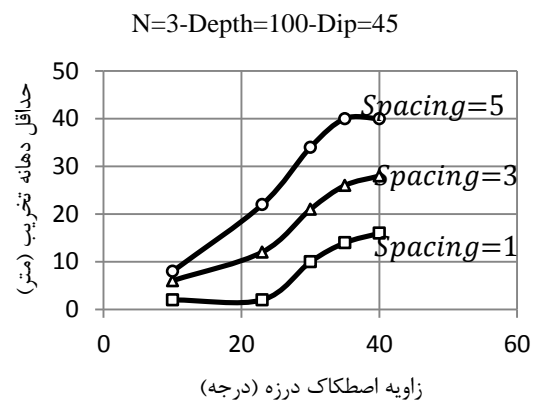
مقادیر استفاده شده در این بخش بر اساس خصوصیات مربوط به مواد پرکننده ناپیوستگی‌ها انتخاب شده‌اند که در جدول ۴ آورده شده است. در اکثر منابع مقدار چسبندگی صفر در نظر گرفته شده است [۵، ۲۴ و ۲۶]. در این قسمت با توجه به نمودار شکل ۲۶ ملاحظه می‌شود که با تغییر میزان چسبندگی مقدار حداقل دهانه تغییر نمی‌کند. تنها در چسبندگی صفر میزان جابه‌جایی‌ها در سقف در مقایسه با مقادیر دیگر بیشتر است (شکل ۲۷). همچنین مشاهده شد که در دهانه‌های یکسان با تغییر مقدار چسبندگی شکل منطقه تخریب و گسترش آن تفاوتی نمی‌کند. با توجه به عدم تغییرات در حداقل دهانه با تغییر چسبندگی در این بازه، این عامل در بررسی نهایی حذف شد.



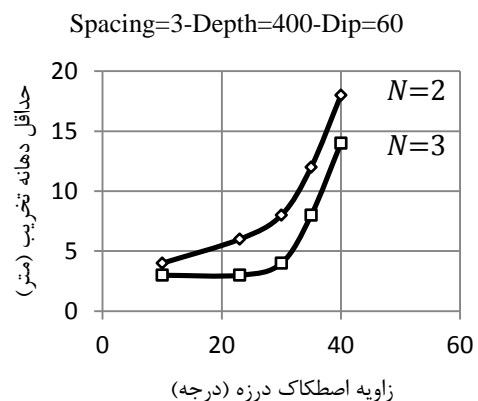
شکل ۲۶- تاثیر چسبندگی بر حداقل دهانه تخریب



شکل ۲۳- تاثیر زاویه اصطکاک درزه بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات شیب درزه برای فاصله‌داری ۳ متر، عمق ۲۰۰ متر و دسته درزه ۳

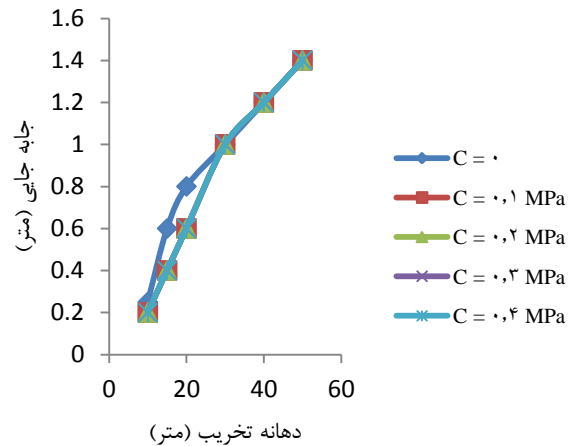
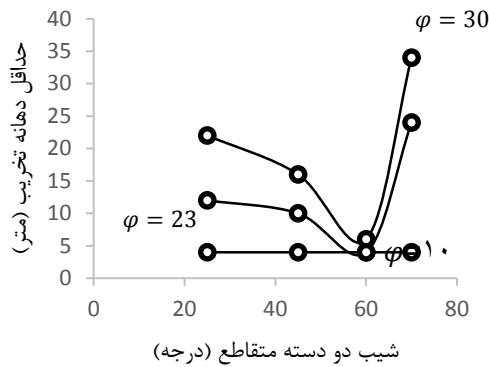


شکل ۲۴- تاثیر زاویه اصطکاک درزه بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات فاصله‌داری درزه برای شیب ۴۵ درجه، عمق ۱۰۰ متر و دسته درزه ۳ و



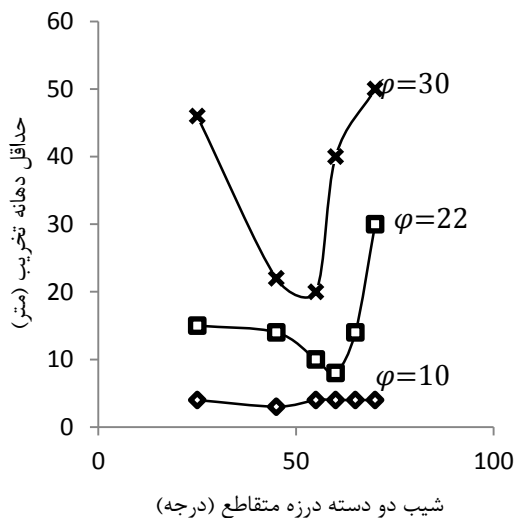
شکل ۲۵- تاثیر زاویه اصطکاک درزه بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات تعداد دسته درزه برای فاصله‌داری ۳ متر، عمق ۴۰۰ متر و شیب ۶۰ درجه

درزه افقی تصمیم گرفته شد تا شکل ۲۸ در مدل‌ها اعمال شود. در روش لابسچر با افزایش شیب دسته درزه عدد اصلاحی مربوط به جهت‌یافتگی درزه افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار MRMR افزایش یافته و شعاع هیدرولیکی لازم برای تخریب افزایش می‌یابد.



شکل ۲۷- نمودار دهانه تخریب- جابه‌جایی در چسبندگی‌های مختلف

شکل ۲۸- نحوه تغییرات دهانه تخریب برحسب زاویه شیب درزه در حالت یک دسته درزه افقی ثابت و دو دسته درزه متقاطع



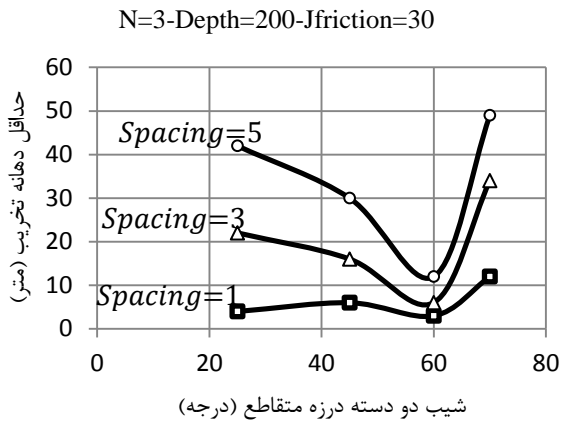
شکل ۲۹- نحوه تغییرات دهانه تخریب برحسب زاویه شیب درزه در حالت یک دسته درزه قائم ثابت و دو دسته درزه متقاطع

شکل‌های ۳۰ تا ۳۳ نشان می‌دهند که با افزایش شیب از ۲۵ تا ۶۰ درجه حداقل دهانه تخریب کاهش پیدا می‌یابد و از آن به بعد با افزایش چشمگیر حداقل دهانه با افزایش شیب روبرو هستیم. دلیل این تغییرات را می‌توان ناشی از سه فاکتور کنترل‌کننده دانست: کاهش تنش لازم برای وقوع شکست با کاهش زاویه بین درزه‌ها و تنش حداکثر

۳-۲-۷- شیب درزه

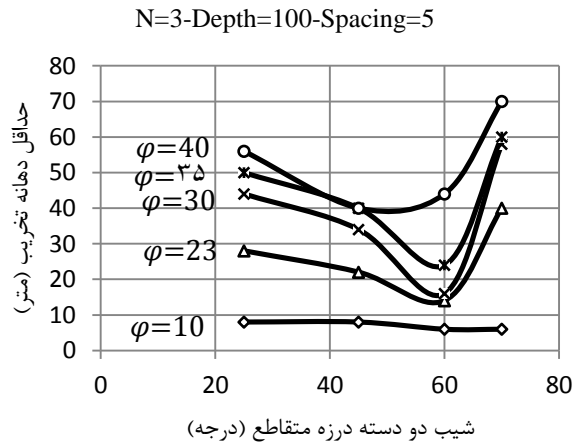
ناپوستگی‌ها یک سری ویژگی‌های ظاهری دارند که زاویه شیب یکی از آن‌ها محسوب می‌شود. با توجه به اهمیتی که زاویه شیب بر پایداری دارد، تغییرات این عامل بررسی شده است. طبق نظر لابسچر جهت‌یافتگی، شکل و ابعاد فضای حفر شده، بر رفتار توده‌سنگ به صورت پایداری بلوک سنگی تاثیرگذار است. وضعیت درزه‌ها، با توجه به محور قائم بلوک، مشخصات اصطکاکی درزه‌ها و باز یا بسته بودن قاعده بلوک‌های سنگی، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر پایداری فضای حفر شده دارند و امتیاز RMR باید مطابق با آن اصلاح شود. مقادیر اصلاحی تابعی از تعداد، شیب و مشخصات اصطکاکی درزه‌ها است و به وضعیت درزه‌ها نسبت به محور قائم بلوک نیز بستگی دارد. ناپایداری بلوک وابسته به تعداد درزه‌هایی است که از محور قائم می‌گذرد [۱۲].

به دلیل پیچیدگی این متغیر برای تحلیل آن برای مرتبه اول یک دسته درزه افقی ثابت (شکل ۲۸) و دو دسته درزه متقاطع در نظر گرفته شد و سپس یک دسته درزه قائم ثابت و دو دسته درزه متقاطع (شکل ۲۹) بررسی شد. سایر پارامترها به غیر از عمق که ۲۰۰ متر است، طبق جدول ۱ اعمال شده‌اند. سپس مقادیر نهایی شیب انتخاب شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش شیب دسته درزه تا حدود ۶۰ درجه در هر دو حالت مقدار حداقل دهانه تخریب کاهش می‌یابد و سپس روند افزایشی داشته است. بر همین مبنا و با توجه به نقش مهم‌تر وجود دسته

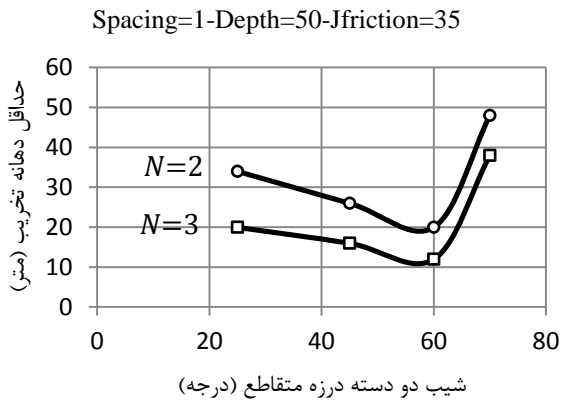


شکل ۳۲- تاثیر شیب درزه بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات فاصله داری درزه

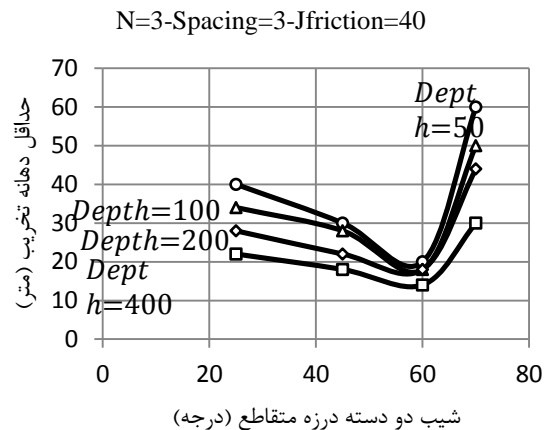
(تنش ثقلی) که در شکل ۳۴ نشان داده شده است، نسبت مولفه سینوسی به مولفه کسینوسی نیروی ثقل و وسعت ناحیه مستعد گسیختگی [۲۷].



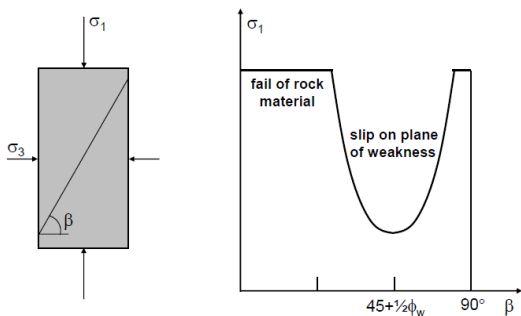
شکل ۳۰- تاثیر شیب درزه بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات زاویه اصطکاک



شکل ۳۳- تاثیر شیب درزه بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات تعداد دسته درزه



شکل ۳۱- تاثیر شیب درزه بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تغییرات عمق

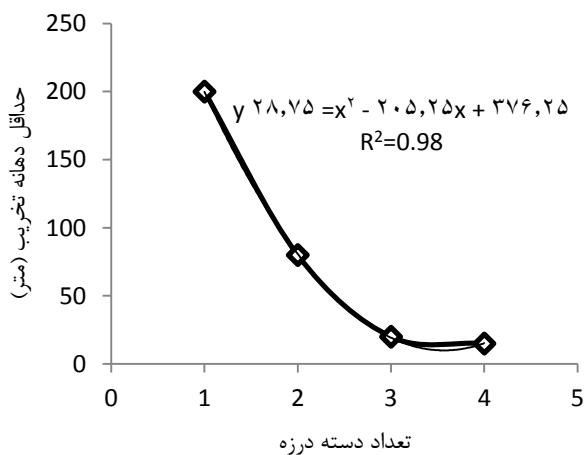


شکل ۳۴- تغییرات مقاومت فشاری (σ) نسبت به زاویه بین صفحات ناپیوستگی و تنش حداکثر (β) در فشار جانبی ثابت [۲۸]

هنگامی که شیب درزهها ۲۵ درجه است، فاکتورهای اول و دوم تاثیر مثبت بر ناپایداری دارند و باعث کاهش دهانه حداقل می‌شوند. در این حالت زاویه بین درزهها و تنش

۳-۲-۸- تعداد دسته درزه

در اکثر منابع سه دسته درزه در نظر گرفته شده است. شکل ۳۵ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد دسته درزه، دهانه حداقل کاهش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده شد که در دهانه‌های یکسان، شکل منطقه تخریب و شکل یا نحوه گسترش آن تفاوت می‌کند (شکل ۳۶) و می‌توان نتیجه گرفت که شکل منطقه تخریب به تعداد و شیب دسته درزه‌ها بستگی دارد. با توجه به این که تغییرات زاویه اصطکاک درزه و شیب در تعداد دسته درزه‌های متفاوت در بخش‌های قبلی نشان داده شد، در این بخش تغییرات دهانه حداقل بر حسب فاصله‌داری درزه و عمق به ازای مقادیر مختلف تعداد دسته درزه آورده شده است (شکل-های ۳۷ و ۳۸). مشاهده می‌شود که در فاصله‌داری کم تغییر در تعداد دسته درزه تاثیر چندانی بر حداقل دهانه تخریب ندارد. شیب افزایشی تغییرات در تعداد دو دسته درزه بیش‌تر است.



شکل ۳۵- تاثیر تعداد دسته درزه بر حداقل دهانه تخریب در بررسی تک عاملی

حداکثر (β) برابر ۶۵ درجه است و در نتیجه تنش زیادی برای وقوع گسیختگی نیاز است. از طرف دیگر با توجه به شیب ۲۵ درجه درزه‌ها مولفه سینوسی (عامل محرک) کمتر از مولفه کسینوسی (عامل مقاومت‌کننده) تنش ثقلی است. با توجه به این توضیحات علاوه بر این که تنش زیادی برای گسیختگی نیاز است، تنش عامل گسیختگی نیز کم است. در شیب ۴۵ درجه دو فاکتور اول و سوم تاثیر مثبت روی ناپایداری دارند زیرا در این حالت زاویه ۴۵ درجه بین سطوح درزه و تنش حداکثر باعث کاهش تنش لازم برای گسیختگی نسبت به حالت شیب ۲۵ درجه خواهد شد. از طرف دیگر ناحیه مستعد گسیختگی نسبت به حالت شیب ۲۵ درجه بیشتر است.

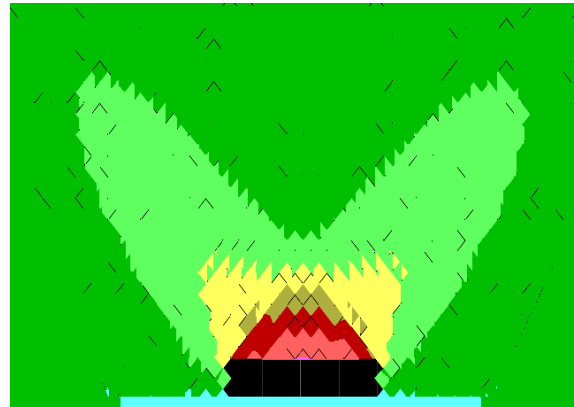
در شیب ۶۰ درجه هر سه فاکتور گفته شده تاثیر مثبت روی ناپایداری دارند زیرا در این حالت زاویه ۳۰ درجه بین سطوح درزه و تنش حداکثر باعث کاهش تنش لازم برای گسیختگی نسبت به حالات ۲۵ و ۴۵ درجه خواهد شد. به علاوه بزرگ‌تر بودن مولفه سینوسی نسبت به مولفه کسینوسی ثقل باعث تسهیل گسیختگی می‌شود چرا که باعث افزایش تنش گسیختگی می‌شود.

در شیب ۷۰ درجه نسبت به حالت ۶۰ درجه ناحیه کمتری مستعد گسیختگی است ولی نیروی محرک افزایش یافته است. از طرف دیگر با توجه $\beta = 20$ تنش لازم برای گسیختگی از حالت ۶۰ درجه بیشتر است. در شیب‌های نزدیک به قائم مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده زاویه اصطکاک سطوح درزه است.

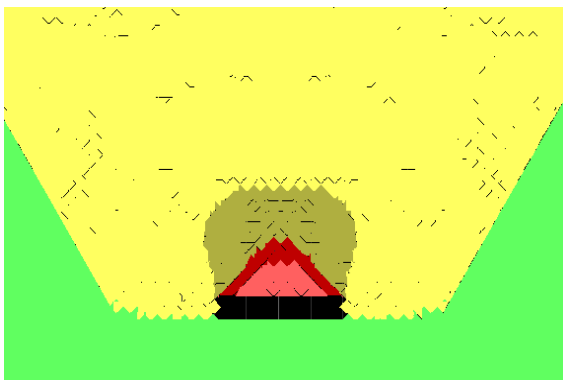
تاثیر فاصله‌داری درزه‌ها بیشتر در شیب ۲۵ و ۷۰ درجه مشهود است که با افزایش گیرداری بلوک‌ها نسبت به یکدیگر باعث کاهش جابه‌جایی در سقف زیربرش و در نتیجه افزایش حداقل دهانه تخریب می‌شوند. با حذف لایه‌بندی افقی مشاهده می‌شود که حداقل دهانه برای شروع تخریب افزایش داشته است. نتایج مدلسازی فیزیکی موسایی [۱۷] برای مطالعه تاثیر شیب لایه‌بندی بر ناپایداری تونل نشان داد که با تفسیرهایی مشابه مطالب از پیش گفته در شیب ۶۰ درجه بیش‌ترین مقدار ناحیه ناپایدار وجود دارد. از شیب ۳۰ درجه تا ۶۰ درجه روند افزایش ناحیه ناپایدار و از شیب ۶۰ درجه تا ۹۰ درجه کاهش ناحیه ناپایدار اتفاق افتاده است.



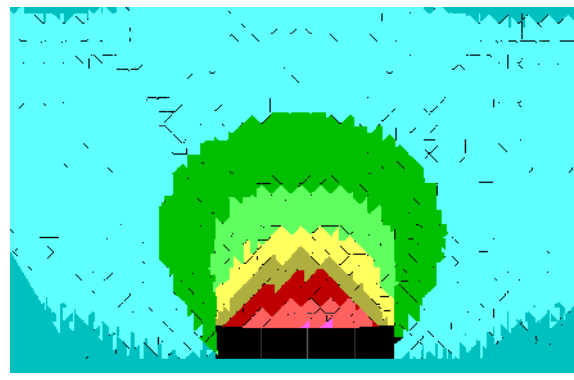
تعداد دسته درزه: ۱



تعداد دسته درزه: ۲

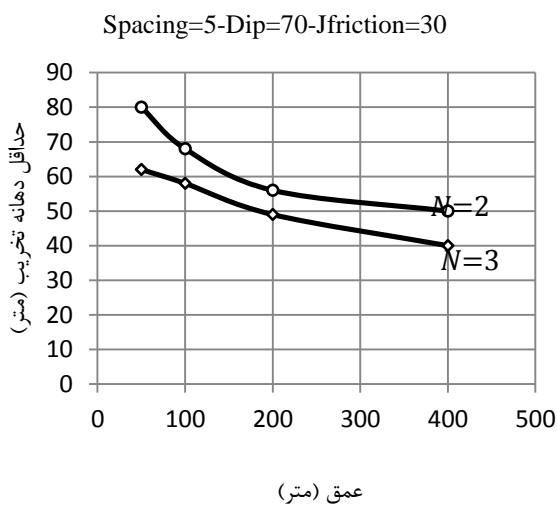


تعداد دسته درزه: ۳

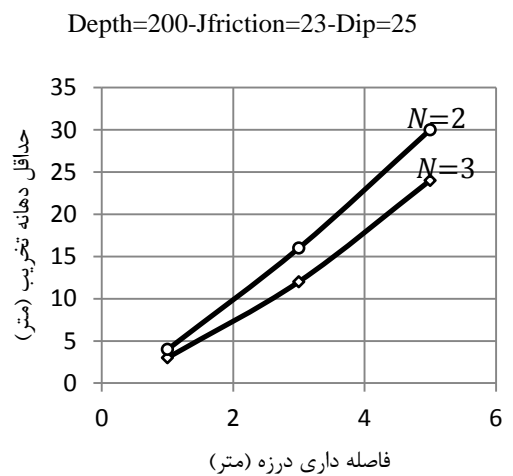


تعداد دسته درزه: ۴

شکل ۳۶- تاثیر تعداد دسته درزه بر شکل منطقه تخریب



شکل ۳۸- تاثیر عمق بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تعداد دسته درزه



شکل ۳۷- تاثیر فاصله داری بر حداقل دهانه تخریب بر حسب تعداد دسته درزه

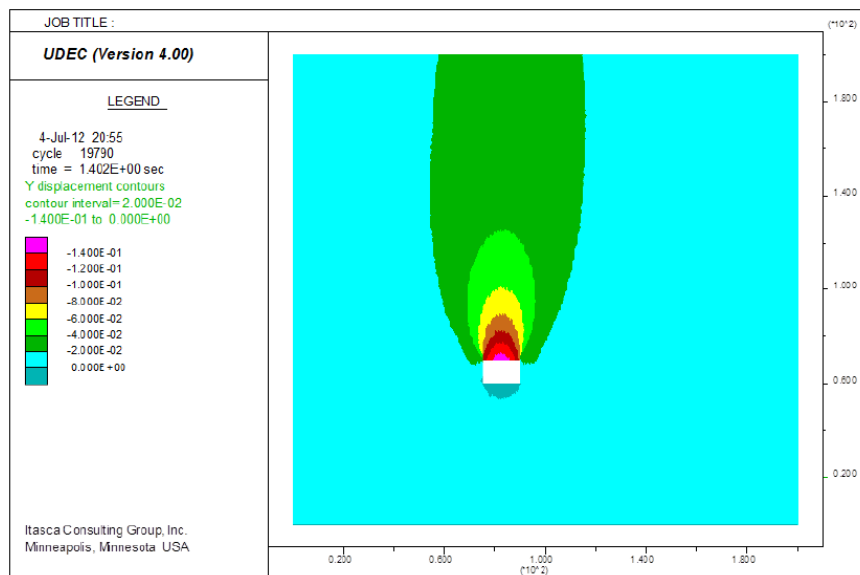
۴- اعتبارسنجی مدل عددی

اعتبارسنجی این تحقیق در دو مرحله انجام شده است. در ابتدا از مقایسه مدلسازی انجام شده با مطالعه جبین پور [۸ و ۹] صحت مدل بررسی شده است. در ادامه نتایج حاصل از مدلسازی عددی که تحلیل حساسیت عوامل مختلف است، با روندهای موجود در روش تجربی لابسچر مقایسه شده است.

شکل ۳۹ نتیجه مدلسازی عددی جبین پور [۹] در حالت ۴ دسته درزه با شیبهای ۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ را نشان

می‌دهد. بیشترین جابه‌جایی ۱۴ سانتی‌متر در سقف زیربرش با عرض ۱۵ متر قابل مشاهده است. با مقایسه شکل ۲، ۳۶ و ۳۹ (حالت ۴ دسته درزه) می‌توان دریافت که الگوها و مقدار جابه‌جایی‌ها در مدل عددی ساخته شده روند منطقی را دارد.

همچنین مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ و شکل‌های ۸ و ۱۶ مطابقت نتایج حاصل از مدلسازی عددی را با روش تجربی لابسچر نشان می‌دهد.



شکل ۳۹ - مدل با زیربرش ۱۵ متر

۵- نتیجه‌گیری

مدلسازی عددی در کنار روش‌های تجربی راهکاری مناسب برای پیش‌بینی قابلیت تخریب یک کانسار است.

از میان هفت عامل موثر در قابلیت تخریب با بررسی تک عاملی پنج عامل عمق زیربرش، زاویه اصطکاک درزه، فاصله‌داری درزه، تعداد دسته درزه‌ها و شیب درزه‌ها برای بررسی نهایی انتخاب شد. مقاومت تراکم تک محوری و نسبت تنش افقی به قائم تاثیر کمی بر حداقل دهانه تخریب داشتند.

بیش‌ترین دهانه تخریب مربوط به حالت دو دسته درزه - متقاطع با شیب ۷۰ درجه، زاویه اصطکاک ۴۰ درجه،

با توجه به چشم‌انداز رو به پایان ذخایری که امکان استخراج به روش روباز را دارند و همچنین مزایای بسیار زیاد روش تخریب بزرگ نسبت به سایر روش‌های استخراج زیرزمینی، می‌توان آینده‌ای روشن برای این روش پیش‌بینی کرد. آشنایی با این روش و موضوعات کلیدی در به‌کارگیری آن در کشور ایران امری ضروری به نظر می‌رسد. یکی از موضوعات کلیدی در این روش قابلیت تخریب ماده معدنی و سنگ باطله است. انجام

[۸] جبین پور، علیرضا؛ ۱۳۹۱، "بررسی قابلیت تخریب توده‌سنگ و عوامل مؤثر بر آن به روش عددی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گرایش استخراج، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران.

[۹] جبین پور، علیرضا؛ "مدلسازی عددی تاثیر عوامل ژئومکانیکی بر تخریب توده‌سنگ در روش تخریب بزرگ"، ۱۳۹۵، مجموعه مقالات دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن.

[10]- Keevil, N., 2011, "An Introduction to Block & Panel Caving", Institute of Mining Engineering, The University of British Columbia.

[11] Rafiee, R., Ataei, M., Khalokakaie, R., Jalali, S. M. E., & Sereshki, F., 2015, "A fuzzy rock engineering system to assess rock mass cavability in block caving mines", Neural Computing and Applications Journal.

[12]- Laubscher, D H. A., 2000, "Practical Manual on Block caving. Brisbane", pp. 262-278

[13] Jakubec, J. Esterhuizen. G., 2007, "Use of the mining rock mass rating (MRMR)", Proceedings of the International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining. pp. 73-78

[14] Laubscher, D H. Jakubec. J., 2001, "The MRMR Rock Mass Classification for Jointed Rock Masses", Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies., pp. 475-481.

[15] Brown, E T., 2003, "Block Caving Geo mechanics". The International Caving Study I 1997-2000, JKMRM Monograph Series in Mining and Mineral Processing 3, University of Queensland.

[16] Rafiee, R. Ataei, M. Khalokakaie, R. Jalali, S M E. Sereshki, F., 2014, "Determination and Assessment of Parameters Influencing Rock Mass Cavability in Block Caving Mines Using the Probabilistic Rock Engineering System", Rock Mech Rock Eng 48, pp. 1207-1220.

[17] Charles A. Brannon, Gordon K. Carlson, and Timothy P. Casten., 2011, "Block Caving & Cave Mining". 3rd Edition, SME Mining Engineering Handbook, Chapter 13.10., pp. 1437-1450.

[18] Tollenaar, R N., 2008, "Characterization of Discrete Fracture Networks and their Influence on Cavability and Fragmentation", Faculty of Mining Engineering. University of British

عمق ۵۰ متری و فاصله‌داری درزه‌ی ۵ متر است. کم‌ترین دهانه تخریب مربوط به حالت دو دسته درزه متقاطع با شیب ۶۰ درجه، زاویه اصطکاک ۱۰ درجه، عمق ۴۰۰ متری و فاصله‌داری درزه ۱ متر است. زاویه اصطکاک درزه بیش‌ترین تاثیر را بر حداقل دهانه تخریب دارد. با کاهش فاصله‌داری درزه، افزایش عمق و تعداد دسته درزه حداقل دهانه تخریب کاهش می‌یابد. توده سنگ دارای درزه‌هایی با شیب ۶۰ درجه بیش‌ترین قابلیت تخریب را دارد. به ازای مقادیر کمتر و بیش‌تر از ۶۰ درجه، قابلیت تخریب کاهش می‌یابد.

۶- منابع

[۱] علی‌پنهانی، بهنام؛ ۱۳۹۴؛ «بررسی قابلیت تخریب در روش تخریب بزرگ با استفاده از مدل‌سازی عددی و فیزیکی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران.

[۲] علی‌پنهانی، بهنام؛ ۱۳۹۳؛ «آماده‌سازی و بهره‌برداری در روش تخریب بزرگ»، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران.

[3] Mawdesley, C., 2002, "Predicting rock mass cavability in block caving mines". Ph.D.thesis, University of Queensland.

[4] Lorig, L., 2000, "The Roel of Numerical Modelling in Assessing Caveability", Itasca Consulting Group Inc., Report to the International Caving Study, ICG00-099-3-16.

[5] Sainsbury, B., 2012, "A Model for cave propagation and subsidence assessment in jointed rock masses", A thesis submitted to University of New South Wales in Fulfilment of requirements for the degree Doctor of Philosophy. pp.16-44.

[6] A. Vakili, B.K. Hebblewhite., 2010, "A new cavability assessment criterion for Longwall Top Coal Caving", Rock Mechanics & Mining Sciences 48, pp. 1318-1328.

[7] K. Brummer, H. Li., 2005, "The transition from open pit to underground mining : An unusual slope failure mechanism at Palabora", International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering.

-
- Lorig^۱
 Sainsbury^۲
 Vakili^۳
 Li^۴
 Brummer^۵
 Palabora^۶
 Insitu Rock Mass Rating^۷
 Mining rock mass rating^۸
 Structural domains^۹
 Structural domains^{۱۰}
 Minor structures^{۱۱}
 Cap Rock^{۱۲}
 Abutment Pressure^{۱۳}
 Caving rate^{۱۴}
 Air blast^{۱۵}
 Gilbride^{۱۶}
 Sharrock^{۱۷}
 Vyazmensky^{۱۸}
- Columbia, Canada,. Master of Applied Science thesis.
- [19] Itasca Consulting Group., 2000, “**Universal Distinct Element Code User’s Guide**”.
- [20] Gilbride, J. Free, K. S. and Kehrman, R, 2005, “**Modeling Block Cave Subsidence at the Molycorp**”, Inc., Questa Mine, Alaska Rocks 2005, The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), June 25 - 29, 2005, Anchorage, AK.
- [21] Sharrock, G., Vakili, A., Duplancic, P. and Hastings, N, 2011, “**Numerical analysis of subsidence for Perserverence Deeps Block Cave in Continuum and Distinct Element Numerical Modelling in Geomechanics**”, Sainsbury, Hart, Detournay and Nelson (eds.), Paper 06-03, Itasca International Inc, Minneapolis, ISBN 978-0-9767577-2-6.
- [22] Vyazmensky, A Stead, D.Elmo, D., 2010, “**Role of Rock Mass Fabric and Faulting in the Development of Block Caving Induced Surface Subsidence**”, Rock Mechanics Rock Eng, 43:533–556.
- [23] www.academia.edu/11169854/ “**Properties of Rock Materials Chapter 4**”.
- [24] Bieniawski, Z. T., 1976, “**Rock mass classification in rock engineering. In: Exploration for Rock Engineering**”, Cape Town, PP 97-106.
- [25] 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.
- [26] Ivars, D M. Pierce. M E. Darcel, C. Reyes-Montes, J. Potyondy, D O. Young, R P. Cundall, P A., 2011, “**The synthetic rockmass approach for jointed rockmass modelling**”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. pp. 219–244.
- [27] Moussaei, N. Sharifzadeh. M. Sahriar, K. Khosravi, M H., 2015, “**Evaluation of tunnel instability in layered structures using physical modeling**”, Promoting Tunneling in SEE Region, ITA.
- [28] Brady, BB.H.G. and Brown, E.T., 2005, “**Rock Mechanics For underground mining**”, Springer; 4th edition. Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, Chapter 1, pp. 13-15.