

### بررسی منطقه تسلیم در روش تخریب بزرگ با استفاده از مدل سازی اجزا محدود و معیار نرخ کرنش پلاستیک

مهدی یآوری شهرضا<sup>۱</sup>؛ بهنام علی پنهانی<sup>۲</sup>؛ جواد لطفی گودرزی<sup>۳\*</sup>

۱- مربی؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی دانشگاه تهران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکتری؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۵/۱۲/۲۴؛ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۸/۰۳/۲۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2019.5518.1306

واژگان کلیدی	چکیده
زیربرش ارتفاع تسلیم مدل مصالح درزه دار تخریب بزرگ قابلیت تخریب مدل سازی عددی	<p>در دهه اخیر روش تخریب بزرگ به عنوان بهترین گزینه برای استخراج ذخایر بزرگ مقیاس و کم عیار که در اعماق زیاد قرار گرفته اند، مطرح شده است. این روش استخراج، تنها روش استخراج زیرزمینی است که از جنبه هزینه و ظرفیت تولید قابلیت مقایسه با روش استخراج روباز را دارد. با این حال، تجارب عملیاتی در معادن تخریب بزرگ در سراسر جهان، لزوم فهم دقیق فرآیندهای ژئوتکنیکی در تخریب را به اثبات رسانده است. در این میان یک عامل بسیار مهم در معادن تخریب بزرگ تعیین قابلیت تخریب کان سنگ و سنگ فراگیر است که تخریب پذیری آنها شرط اصلی به کارگیری این روش است. تخمین نامناسب این متغیر می تواند مشکلاتی در تولید و فرآوری ایجاد کند یا در بدترین حالت، پروژه را با شکست روبرو سازد. تحلیل مناطق شکل گرفته در اثر ایجاد زیربرش برای اطمینان از صحت پیش بینی تخریب در معادن مختلف بسیار مفید است. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار آباکوس 6.12 و در نظر گرفتن مدل رفتاری دراگر- پراگر تأثیر خصوصیات مکانیکی توده سنگ بر ارتفاع منطقه تسلیم شده در بالای زیربرش در روش تخریب بزرگ مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی های مکانیکی و هندسی درزه ها با استفاده از مدل مصالح درزه دار در مدل وارد شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که ارتفاع منطقه تسلیم با افزایش پارامترهای مقاومتی توده سنگ و درزه ها کاهش می یابد. زاویه اصطکاک درزه بیشترین تأثیر را بر ارتفاع منطقه تسلیم دارد. توده سنگ دارای درزه هایی با شیب ۲۰ درجه بیشترین ارتفاع ناحیه تسلیم شونده را دارد. هر چه شیب درزه بیشتر می شود، ارتفاع منطقه تسلیم کاهش می یابد. این کاهش در بازه ۳۰ تا ۴۵ درجه با شیب بسیار کم و در بازه ۴۵ تا ۸۰ با شیب بسیار زیادی رخ می دهد.</p>

#### ۱- مقدمه

تعیین قابلیت تخریب یک توده سنگ، اندازه گیری (اغلب غیر کمی) قابلیت آن در تخریب شدن تحت شرایط خاص برای شروع، گسترش و پیوستگی تخریب است (Charles, 2011). شروع تخریب همان گسیختگی اولیه توده سنگ است که به طور مستقیم با قابلیت تخریب توده سنگ ارتباط دارد. به محض ایجاد زیربرش، در صورت وقوع گسیختگی و ریزش، تخریب شروع می شود. گسترش تخریب، تداوم ریزش منطقه تخریب به سمت بالا در ستون

روش استخراج تخریب بزرگ روشی است که در آن یک کانسار توده ای به دلیل ایجاد زیربرش به صورت بلوکی، پهنه ای یا توده ای تحت تأثیر نیروی وزن یا تنش شکسته می شود. کان سنگ شکسته شده از طریق دهانه های تخلیه (ساختار واقع در طبقه استخراج یا تولید برای بارگیری و انتقال سنگ تخریب شده) استخراج می شود (Brady, 2004).

\* تهران؛ خیابان کارگر شمالی؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ طبقه اول؛ آزمایشگاه مدل سازی و شبیه سازی؛ صندوق پستی: ۱۱۱-۱۴۱۵۵؛ رایانامه: [j.loffi98@gmail.com](mailto:j.loffi98@gmail.com)

کردند. امروزه، هنوز هم روابط حجمی ساده توسط بسیاری از محققین برای برآورد آهنگ انتشار تخریب به کار گرفته می‌شود که برای مثال می‌توان به کار تحقیقاتی بیک و همکاران در سال ۲۰۱۱ (Beck, et al., 2011) اشاره کرد. در روش تحلیلی فرضیاتی در نظر گرفته می‌شود که بعدها چندین مطالعه موردی، نشان داد که این فرضیات نادرست هستند. از مهم‌ترین روش‌های تجربی می‌توان به نمودار پایداری ماتئوس (۱۹۸۰)، نمودار لابسچر (۱۹۹۰) و نمودار اصلاح‌شده ماتئوس توسط مادسلی (۲۰۰۲) اشاره کرد (Mawdesley, 2002). معمول‌ترین روش در بین روش‌های تجربی روش لابسچر است که بر اساس تلفیق اطلاعات مربوط به معادن تخریبی در آفریقای جنوبی ارائه شده است. در این روش با مشخص بودن امتیاز معدنکاری توده‌سنگ و شعاع هیدرولیکی کف زیربرش می‌توان وضعیت توده‌سنگ را از نظر تخریب‌پذیری تعیین کرد.

در تحقیقات عددی پیوسته، مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن محیط پیوسته معادل توده‌سنگ انجام شده است. در این تحقیقات بررسی تأثیر خواص درزه در قابلیت تخریب بررسی نشده است که به‌طور مثال می‌توان به کار تحقیقاتی لوریگ و همکاران (Lorig, et al., 2000) اشاره کرد.

در روش‌های ترکیبی مثل روش *FEM/DEM-DFN* از توده‌سنگ مصنوعی استفاده می‌شود. در این روش از ترکیب مدل‌های *DFN* (Discrete Fracture Network) و شبیه‌سازی‌های *FEM/DEM* برای استنتاج خواص توده‌سنگ، استفاده می‌شود. این روش بین سیستم ثبت‌شده شکستگی‌ها و مقاومت توده‌سنگ ارتباط برقرار می‌کند. از جمله تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعه ساینزباری (Sainsbury, 2012) در مورد گسترش تخریب و نشست اشاره کرد. در این تحقیق با استفاده از کد عددی نوشته‌شده امکان وارد کردن ناپیوستگی‌های بزرگ‌مقیاس در مدل فراهم شده بود. همچنین امکان تخلیه مواد تخریب‌شده وجود داشت تا بتوان رفتار گسترش تخریب را مطالعه کرد.

از کدهای ناپیوسته مثل *UDEc* و *3DEC* برای ارزیابی قابلیت تخریب به‌طور محدود استفاده شده است. به‌عنوان مثال می‌توان به ایجاد معیار قابلیت تخریب در روش جبهه کار طولانی توسط وکیلی (Vakili, 2010) اشاره کرد.

کان‌سنگ همزمان با تخلیه مواد تخریب‌شده از طریق دهانه‌های تخلیه است. معمولاً لازم است تا ابعاد زیربرشی که در آن تخریب شروع می‌شود، در حدی باشد که از تشکیل قوس پایدار در منطقه تخریب که باعث توقف گسترش تخریب می‌شود، جلوگیری به عمل آید. پیوستگی تخریب هدف طراحی در تخریب بزرگ است، تداوم گسترش تخریب مادامی است که تخلیه صورت می‌گیرد. با ایجاد یک سطح زیربرش با ابعاد به‌حدکافی بزرگ برای جلوگیری از تشکیل قوس پایدار، پیوستگی تخریب هم تحقق خواهد یافت. هنگامی که پیوستگی تخریب محقق شد، آهنگ گسترش تخریب توسط الگو و سرعت تخلیه مواد شکسته شده، کنترل می‌شود (Mawdesley, 2002). در این تحقیق به کمک روش‌های عددی و استفاده از مدل رفتاری مصالح درزه‌دار در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس (*Abaqus*)، تخریب در روش استخراج تخریب بزرگ در یک محیط درزه‌دار مدل شده است. با ایجاد زیربرشی با ابعادی که اطمینان از تخریب اولیه آن وجود دارد، به بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر اندیس مقاومت زمین‌شناختی (*Geological Strength Index*) که بیانگر مقاومت کلی توده سنگ است و پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها بر ارتفاع منطقه شروع تخریب پرداخته شده است. هوک و براون بر پایه ویژگی‌های دیداری توده‌سنگ‌ها برای رده‌بندی آنها و در نتیجه برآورد پارامترهای ژئومکانیکی آنها برای طراحی سازه‌های مهندسی زیرزمینی روش اندیس مقاومت زمین‌شناختی را پیشنهاد کردند. در این روش، توده‌سنگ از دیدگاه درزه‌داری که نتیجه آن تکه‌تکه‌ای شدن توده‌سنگ است و همچنین نمود آن در روی زمین مانند هوازگی و دگرسانی و ماده پرکننده درزه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- پیشنهاد مطالعات

به‌طور 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 مقاله پنهانی (Alipenhani, 2015) آمده است.

رایس (Rice, 1934) و بعد از او پانک (Panek, 1984) یک روش حجمی یک‌بعدی ساده را برای بررسی خواص رفتار گسترش تخریب با فرض ضرایب افزایش حجم ابداع

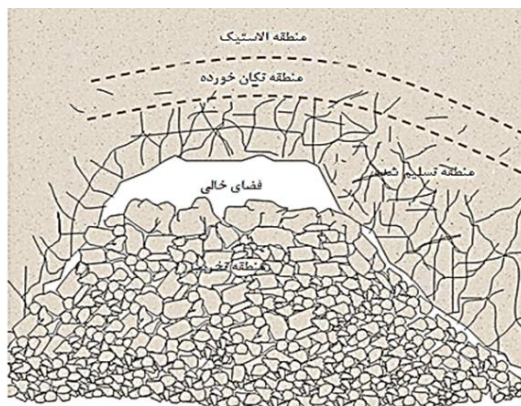
مدلی مفهومی از تخریب در این معدن بود که در شکل ۱ نشان داده شده است. توضیح این مناطق به شرح زیر است. منطقه تخریب‌شده (*Caved Zone*): این منطقه شامل بلوک‌های سنگی است که از کانسار جدا شده و می‌توان آنها را از طریق سیستم‌های تخلیه، استخراج کرد.

فضای خالی (*Aire Gap*): در زمان تخریب، یک فضای خالی بین منطقه تخریب‌شده و منطقه تسلیم شکل می‌گیرد که ارتفاع آن تابع سرعت بیرون کشیدن مواد از منطقه تخریب‌شده است.

منطقه تسلیم (*Yield Zone*): توده‌سنگ در این منطقه شکسته شده و همه یا بخشی از مقاومت چسبندگی خود را از دست می‌دهد و در نتیجه کمترین نگهداری را برای لایه‌های بالایی دارند. در این منطقه جابجایی‌های بزرگی اتفاق می‌افتد.

منطقه تکان‌خورده (*Seismogenic Zone*): در اثر افت مقاومت ناپیوستگی (ناپیوستگی‌ها از مقاومت اوج به مقاومت باقی‌مانده می‌رسند)، ریزلرزش‌ها (و گاهی لرزش‌ها) در این ناحیه متمرکز شده و شکستگی‌های جدیدی ایجاد می‌کنند.

منطقه الاستیک (*Elastic Zone*): خواص و رفتار توده‌سنگ در این منطقه دست‌نخورده باقی می‌ماند. تنش‌های القایی در این ناحیه ممکن است به اندازه‌ای باشد که بر زیرساخت‌های سطحی اثر بگذارد (*Ivars & Pierce, 2011*).



شکل ۱- مناطق شکل‌گرفته در اثر تخریب (*Brady, 2004*)

#### ۴- مدل‌سازی عددی

در این تحقیق برای بررسی تأثیر خصوصیات مکانیکی

اما کاربرد آنها بیشتر در مطالعات نشست سطح زمین و پایداری پایه‌ها بوده است. به‌عنوان مثال می‌توان به مطالعه انجام شده توسط لی و برومر (*Brummer & Li, 2005*) در پالابورا (*Palabora*) اشاره کرد.

از کارهایی که مستقیماً تأثیر درزه‌داری را بر قابلیت تخریب مورد مطالعه قرار داد، می‌توان به مطالعه جبین‌پور و علی‌پنهانی اشاره کرد. جبین‌پور در تحقیق خود به بررسی اثر فاصله‌داری درزه، چسبندگی سطح درزه، زاویه اصطکاک سطح درزه و شیب دسته درزه پرداخت (*Jabinpur, 2013*). علی‌پنهانی عوامل عمق، نسبت تنش افقی به قائم، مقاومت فشاری تک‌محوری و تعداد دسته درزه را نیز بررسی کرد (*Alipenhani, 2015*).

ازجمله روش‌های دیگر بررسی قابلیت تخریب می‌توان به مدل‌سازی فیزیکی (*McNearney, 1986*) و (*Alipenhani, 2015*)، استفاده از روش مهندسی سنگ (*Rafiee, et al., 2014*) و فازی (*Rafiee, et al., 2014*) اشاره کرد.

در تحقیقات ذکرشده مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن محیط پیوسته معادل توده‌سنگ انجام شده است. در چنین شرایطی بررسی تأثیر درزه‌ها در ناهمسانگردی توده‌سنگ امکان‌پذیر نخواهد بود. در این تحقیق اثر درزه‌ها با استفاده از مدل رفتاری مصالح درزه‌دار که در بخش ۴-۳ توضیح داده می‌شود، بررسی شده است.

#### ۳- سازوکار تخریب

به‌طور کلی تخریب در اثر دو عامل نیروی ثقل و تنش وارد بر تاج زیربرش یا منطقه تخریب رخ می‌دهد. مکانیزم تخریب به رابطه بین تنش‌های القایی، مقاومت توده‌سنگ، هندسه و مقاومت ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ بستگی دارد. رفتار شروع و گسترش تخریب توسط برون (*Brown*) در سال ۲۰۰۳ و پیرس (*Pierce*) در سال ۲۰۱۰ توضیح داده شده است (*Sainsbury, 2012*).

به‌طور کلی در بالای زیربرش در صورت وقوع تخریب پنج منطقه تشکیل می‌شود که اولین بار توسط داپلانچیک و بردی (*Duplancic & Brady, 1999*) و با مطالعه تخریب در معدن نورث پارک (*Northparkes*) استرالیا، توضیح داده شده است (*Brady, 2004*). نتایج تحقیقات آنها ساخت

هشت‌گه‌ای با چهار نقطه انتگرال‌گیری استفاده شده است. 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 (جابه‌جایی‌ها صفر در نظر گرفته شده) شده‌اند. در مدل‌های ساخته‌شده تأثیر خصوصیات هندسی و مقاومتی درزه‌ها به همراه ارتفاع منطقه تسلیم بررسی شده است. لازم به ذکر است که به دلیل زیاد بودن متغیرهای تأثیرگذار بر قابلیت تخریب، بررسی همه متغیرها به صورت چندعاملی نیاز به صرف مدت‌زمان بسیار طولانی خواهد داشت. از این رو در این تحقیق تنها متغیرهایی که طبق مطالعات قبلی اهمیت بیشتری داشتند مورد بررسی قرار گرفته است.

زیربرش به صورت یک‌باره در مدل ایجاد می‌شود. بار وارد بر مدل به صورت تنش ثقلی در مدل وارد شده است. نسبت تنش افقی به قائم برابر یک در نظر گرفته شد. در این مدل‌سازی فرض شده است که تخلیه به صورت منظم انجام می‌گیرد.

#### ۴-۲- خصوصیات مواد

در مدل ساخته‌شده از داده‌های مربوط به لیفت ۱ معدن نورث پارک (Northparkes) استرالیا استفاده شده است. خصوصیات مربوط به توده‌سنگ و دسته درزه‌های مربوط به آن در جدول‌های ۱ و ۲ خلاصه شده است. خصوصیات مربوط به توده‌سنگ با استفاده از نرم‌افزار راک‌دیتا (Rock Data) و بر اساس خصوصیات سنگ بکر و ناپیوستگی به دست آمده‌اند. بنابراین اثر اندیس مقاومت زمین‌شناختی به طور غیرمستقیم بررسی شده است. به عبارت دیگر با وارد کردن مقدار اندیس مقاومت زمین‌شناختی در نرم‌افزار راک دیتا از خروجی این نرم‌افزار که همان خصوصیات توده‌سنگ است به عنوان ورودی نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

#### ۴-۳- مدل رفتاری مصالح درزه‌دار

مسئله برآورد ارتفاع منطقه تسلیم در روش استخراج بلوکی، با سازوکارهای مختلفی نظیر فشارهای محصورکننده، تنش‌های کششی در اطراف زیر برش، پدیده اتساع و به دنبال آن کرنش‌های پلاستیک و لغزش در راستای درزه‌ها همراه است. به همین دلیل انتخاب یک مدل رفتاری مناسب که رفتار توده سنگ را تحت اثر چنین سازوکارهایی پیش‌بینی کند، از حساس‌ترین مراحل تحقیق به حساب می‌آید. در این تحقیق

توده‌سنگ و درزه‌ها بر ارتفاع منطقه تسلیم‌شده در اثر ایجاد زیربرش از روش مدل‌سازی عددی استفاده شده است. مدل‌سازی عددی به صورت دوبعدی در نرم‌افزار آباکوس 6.12 انجام شده است. نرم‌افزار آباکوس یک نرم‌افزار المان محدود است که برای مدل‌سازی محیط‌های پیوسته به کار می‌رود اما با استفاده از مدل رفتاری مصالح درزه‌دار در این نرم‌افزار، امکان برآورد اثر درزه‌ها در مدل فراهم آمده است.

روش‌هایی که به روشنی شامل وجود ناپیوستگی‌ها هستند یک گزینه جذاب برای ارزیابی قابلیت تخریب هستند؛ اما روش‌های اجزای مجزا محاسبات فشرده و بسیار پیچیده‌ای دارند که به طور معمول برای مدل‌سازی سه‌بعدی در مقیاس بزرگ نامناسب هستند.

مدل‌های پیوسته رفتار توده‌سنگ را به صورت پیوسته در نظر می‌گیرند. با این فرض که سنگ بسیار متغیر است و رفتار آن توسط دسته‌های ناپیوستگی خاصی به صورت سینماتیکی کنترل نخواهد شد. خواص توده‌سنگ به صورت معادل یعنی ترکیبی از سنگ بکر و درزه‌ها تعریف می‌شود.

در این تحقیق سعی شده است تا با در نظر گرفتن معیار شکست دراگر-براگر و مدل مصالح درزه‌دار تأثیر درزه‌ها در مدل پیوسته وارد شود. با این کار ضمن وارد کردن نقش درزه در مدل، پیچیدگی‌های محاسباتی نرم‌افزارهای UDEC و PFC حذف شود.

#### ۴-۱- هندسه مدل و مش‌بندی

عرض و ارتفاع زیربرش بر اساس مقادیر معمول اشاره‌شده در مطالعه بین‌المللی تخریب، مانند برون (۲۰۰۷) و ترومن (۲۰۰۲)، به ترتیب ۲۰۰ و ۱۰ متر، در نظر گرفته شده است. ابعاد مش در اطراف زیربرش ۵ متر لحاظ شده است که به سمت مرزها بزرگ‌تر می‌شود. این ابعاد مش بر اساس ابعاد مشی است که مادسلی (Mawdesley, 2002) در مدل‌سازی خود استفاده کرده است. ابعاد مرزها بر اساس پیشنهاد کارکل (Karekal, 2011) ۸۰۰ متر در راستای افقی و ۵۰۰ متر در راستای قائم در نظر گرفته شده است. در مورد ابعاد مرز، از آنجاکه حداکثر دهانه ۲۰۰ متر است، با در نظر گرفتن ابعاد ذکرشده، از عدم تأثیر مرزها بر نتایج اطمینان حاصل شد. مرزهای مدل در تمام شرایط مورد بررسی یکسان بوده است. برای افزایش دقت نتایج مدل‌سازی از المان‌های

عمود بر راستای هر یک از سیستم درزه‌ها، کششی شود پدیده بازشدگی در نقطه موردنظر رخ خواهد داد. در چنین شرایطی سختی برشی ماده در راستای درزه‌ها معادل صفر در نظر گرفته می‌شود. اما لغزش درزه‌ها علاوه بر تنش‌های کششی عمود بر درزه‌ها می‌تواند ناشی از تنش‌های فشاری نیز باشد. در چنین شرایطی رفتار درزه از تابع تسلیم دراگر- پراگر تبعیت می‌کند. تابع تسلیم مذکور توسط دراگر و پراگر در سال ۱۹۵۱ برای موادی که تنش تسلیم کششی آنها بسیار کمتر از تنش تسلیمی فشاری است، ارائه شد. تابع تسلیم دراگر- پراگر برای سیستم درزه  $\alpha$  با استفاده از رابطه ۱ تعریف می‌شود (Dassault Systèmes Simulia Corp, 2008):

$$f_{\alpha} = q_{\alpha} - p_{\alpha} \tan \beta_{\alpha} - d_{\alpha} \quad (1)$$

که در آن:  $d_{\alpha}$  و  $\beta_{\alpha}$  به ترتیب پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک دراگر- پراگر برای سیستم درزه  $\alpha$  هستند. همچنین نمادهای  $p_{\alpha}$  و  $q_{\alpha}$  به ترتیب تنش فشاری و برشی اعمال شده بر سطح درزه را نشان می‌دهند.

این مقادیر را می‌توان از طریق آزمایش‌های مکانیک سنگی تخمین زد. از آنجایی که آزمایش‌های مکانیک سنگی عمدتاً برای برآورد پارامترهای مقاومتی موهر-کلمب توده سنگ انجام می‌شوند، روابط زیر برای تعیین پارامترهای مقاومتی دراگر- پراگر از روی پارامترهای مقاومتی موهر کلمب در حالت کرنش صفحه‌ای، ارائه شده‌اند. خواننده می‌تواند برای آگاهی از روند اثبات این روابط به منبع (Jiang, 2011) مراجعه کند.

$$\beta_{\alpha} = \text{Arctan}\left(\frac{9 \sin \phi_{\alpha}}{\sqrt{3(9 - \tan^2 \psi_{\alpha})} + \sin \phi_{\alpha} \tan \psi_{\alpha}}\right) \quad (2)$$

$$d_{\alpha} = \frac{c_{\alpha} \cos \phi_{\alpha} (9 - \tan \beta_{\alpha} \tan \psi_{\alpha})}{\sqrt{3(9 - \tan^2 \psi_{\alpha})}} \quad (3)$$

در روابط مذکور نمادهای  $c_{\alpha}$ ،  $\phi_{\alpha}$  و  $\psi_{\alpha}$  به ترتیب چسبندگی موهر کلمب، زاویه اصطکاک موهر-کلمب و زاویه اتساع سیستم درزه  $\alpha$  هستند. تا زمانی که در یک نقطه مشخص مقدار  $f_{\alpha}$  به دست آمده از رابطه کوچک‌تر از صفر باشد، سیستم درزه  $\alpha$  در آن نقطه دچار تسلیم نمی‌شود (Dassault Systèmes Simulia Corp, 2008).

همچنین مدل رفتاری مصالح درزه‌دار این امکان را فراهم می‌سازد تا با تعریف خواص مکانیکی توده سنگ، رفتار سنگ در راستاهایی که درزه وجود ندارد، بر اساس معیار تسلیم دراگر- پراگر مورد بررسی قرار گیرد. به همین علت

مدل رفتاری مصالح درزه‌دار که یکی از جدیدترین روش‌های موجود برای ایجاد یک مدل پیوسته در محیط‌های به شدت درزه‌دار است، استفاده شده است.

جدول ۱- خصوصیات توده سنگ (Sainsbury, 2012)

۵۵	مدول الاستیسیته (GPa)	
۱۰۵	مقاومت تک‌محوری (MPa)	خصوصیات سنگ بکر
۰/۱۵	نسبت پواسن	
۲۴	$m_i$ ثابت هوک و براون	
۲۷۱۰	چگالی ( $Kg/m^3$ )	
۲۷/۳۵	مدول الاستیسیته (GPa)	خصوصیات توده سنگ
۷/۷	چسبندگی (MPa)	
۴۰/۸	زاویه‌ی اصطکاک (درجه)	
۱۰	زاویه‌ی اتساع (درجه)	

جدول ۲- خصوصیات درزه‌ها (Sainsbury, 2012)

۰	شیب (درجه)	
۰	چسبندگی (MPa)	دسته درزه ۱
۳۰	زاویه اصطکاک (درجه)	
۵	زاویه اتساع (درجه)	
۴۵	شیب (درجه)	
۰	چسبندگی (MPa)	دسته درزه ۲
۳۰	زاویه اصطکاک (درجه)	
۵	زاویه اتساع (درجه)	
۱۳۵	شیب (درجه)	
۰	چسبندگی (MPa)	دسته درزه ۳
۳۰	زاویه اصطکاک (درجه)	
۵	زاویه اتساع (درجه)	

با توجه به مدل رفتاری مذکور، به محض اینکه تنش

پارامترهایی که تأثیر آنها بررسی شد عبارت‌اند از شاخص مقاومت زمین‌شناختی توده‌سنگ، شیب، چسبندگی و زاویه اصطکاک درزه‌ها. بازه مقادیر انتخابی بر اساس مقادیر ثبت‌شده در مطالعه بین‌المللی تخریب انتخاب شده است (Brown, 2007). مقدار  $RMR$  معمول در معادن تخریب بلوکی و پهنه‌ای بین ۳۰ تا ۷۰ است (Panek, 1984). بر این اساس شاخص مقاومت زمین‌شناختی که طبق فرمول، ۵ واحد کمتر از  $RMR$  است از ۲۵ تا ۶۵ در نظر گرفته شد. مقدار شیب دو دسته درزه ۴۵ و ۱۳۵ درجه ثابت و تنها شیب دسته درزه اول از ۲۰ تا ۸۰ درجه تغییر داده شد. مقادیر استفاده شده در این بخش بر اساس خصوصیات مربوط به مواد پرکننده ناپیوستگی‌ها انتخاب شده‌اند که در جدول ۳، آورده شده است. معیار استفاده شده برای تشخیص منطقه تسلیم‌شده کرنش پلاستیک توده‌سنگ است. در شکل ۳ و ۴ به ترتیب خروجی کنتورهای کرنش پلاستیک و کنتورهای جابجایی قائم مدلی با خصوصیات ارائه شده در جدول‌های ۲ و ۳ به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در شکل‌های ۵ تا ۹ گردآوری شده است. شکل ۵، نشان می‌دهد که هرچه اندیس مقاومت زمین‌شناختی افزایش می‌یابد ارتفاع منطقه تخریب کاهش می‌یابد. نرخ کاهش ارتفاع تخریب با افزایش اندیس مقاومت زمین‌شناختی کاهش می‌یابد. در شکل ۶ تأثیر شیب درزه‌های مایل بر ارتفاع تخریب را در حالتی که دو دسته درزه برای توده‌سنگ در نظر گرفته شده است، نشان می‌دهد. شکل حاکی از آن است که هر چه شیب درزه‌ها به حالت قائم نزدیک‌تر می‌شود ارتفاع تخریب کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به کاهش بازشدگی درزه‌ها تحت اثر تنش‌های کششی در درزه‌های کم‌شیب نسبت داد. شکل ۷، تأثیر زاویه اصطکاک درزه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است به ازای زاویه اصطکاک ۴۰ درجه برای درزه‌ها در طول زیر برش مشخص‌شده، تخریب رخ نمی‌دهد. شکل ۹، کنتورهای کرنش پلاستیک این حالت خاص را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است تنش‌های سیستم منجر به تشکیل ناحیه گنبدی شکل تسلیم نشده است. در نهایت شکل ۸، تأثیر چسبندگی درزه‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد. افزایش چسبندگی درزه‌ها در

تابع تسلیم دراکر- پراگر توده سنگ با استفاده از رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود (Dassault Systemes Simulia Corp, 2008).

$$f = q - p \tan \beta_B - d_B \quad (4)$$

پارامترهای  $d_B$  و  $\beta_B$  به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک دراکر- پراگر توده‌سنگ هستند و مقادیر آن از روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شود.

$p$  و  $q$  به ترتیب تنش‌های معادل فشار ون میز هستند که به‌صورت رابطه ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند.

$$p = -\frac{1}{3} I_1 \quad (5)$$

$$q = \sqrt{I_1^2 - 3I_2^2} \quad (6)$$

در روابط ۵ و ۶،  $I_1$  و  $I_2$  به ترتیب نامتغیرهای اساسی اول و دوم تانسور تنش هستند.

تا زمانی که در یک نقطه مشخص مقدار  $f$  به‌دست‌آمده از رابطه ۴ کوچک‌تر از صفر باشد، توده سنگ در آن نقطه دچار تسلیم نمی‌شود.

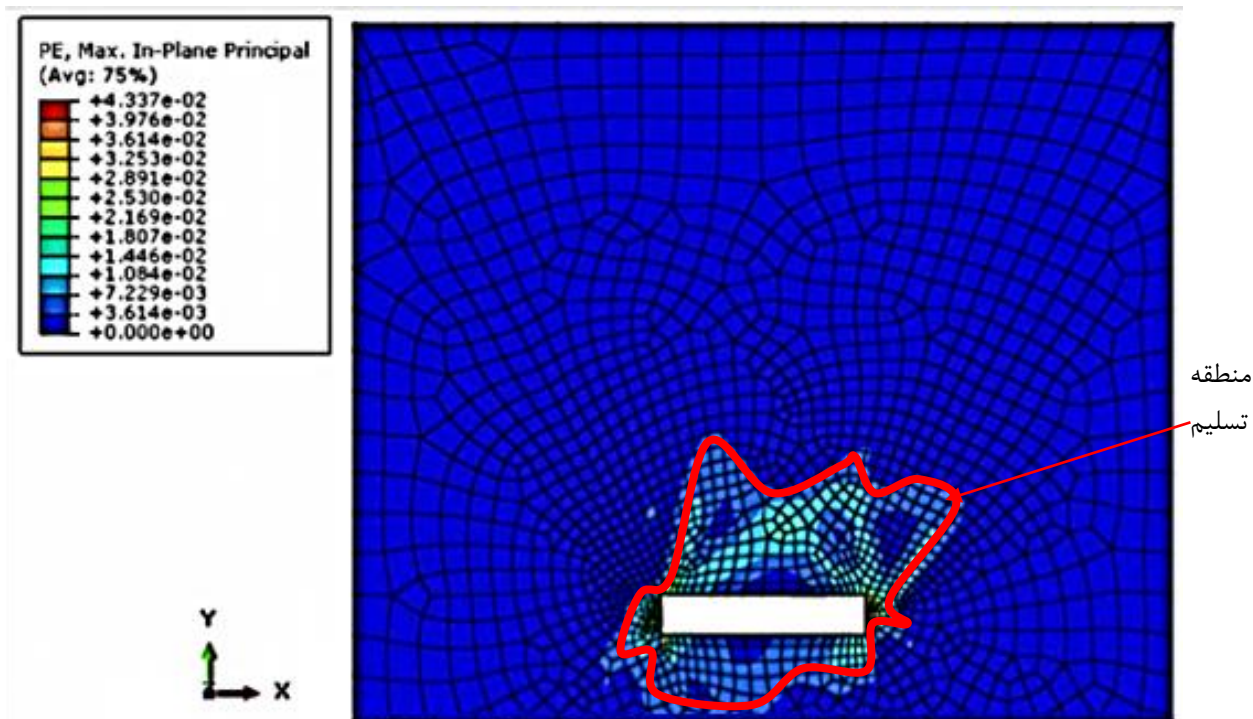
شکل ۲- الف، نشان‌دهنده کنتورهای کرنش پلاستیک در توده‌سنگ دارای یک دسته درزه مایل است. همان‌طور که از شکل پیداست، مدل مصالح درزه‌دار، تسلیم در توده‌سنگ و در راستای درزه‌ها را به‌خوبی نشان می‌دهد. نتایج این تحلیل مطابقت مناسبی با نتایج تحلیل ساینزباری (Sainsbury, 2012) که در شکل ۲- ب، نشان داده شده‌است، دارد. همان‌طور که در شکل ۲- ب، نشان داده شده است در حالتی که توده‌سنگ دارای یک دسته درزه با شیب ۴۵ درجه است، منطقه تسلیم‌شده در جهت شیب گسترش یافته است و ارتفاع آن نسبت به حالت ایزوتروپیک و شیب افقی کمتر و از حالت شیب قائم دسته درزه‌ها بیشتر است. در مدل مصالح درزه‌دار (شکل ۲- الف) گسترش منطقه پلاستیک که همان منطقه تسلیم است در جهت شیب دسته درزه یعنی ۴۵ درجه اتفاق افتاده است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت شیب درزه‌هایی که عمود بر راستای تخلیه هستند (وجود دسته درزه افقی) برای گسترش تخریب بسیار مطلوب است.

## ۵- بحث و تحلیل

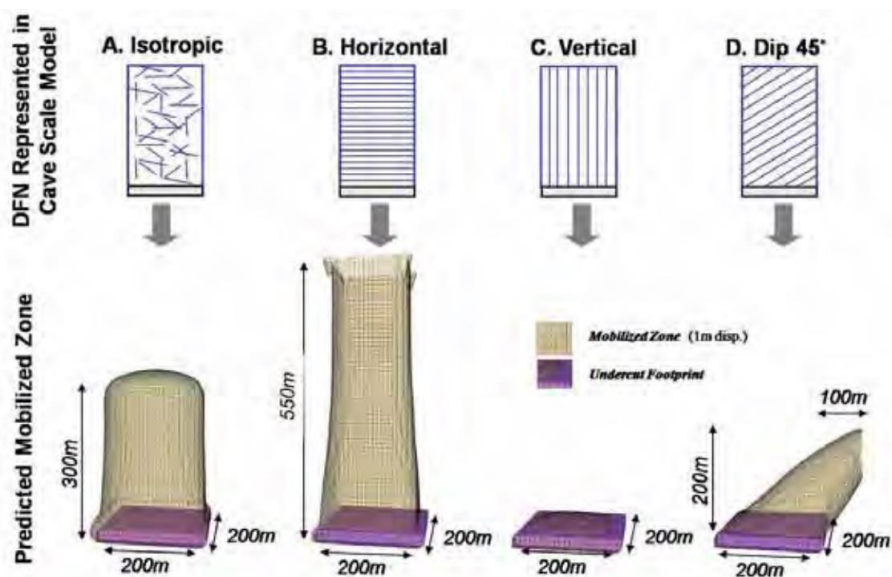
در این تحقیق چندین مدل برای برآورد تأثیر پارامترهای مختلف بر ارتفاع ناحیه تخریب، مورد بررسی قرار گرفت.



صورت ثابت ماندن پارامترهای دیگر، موجب کاهش ارتفاع تخریب با الگوی نسبتاً خطی خواهد شد.



الف- ناحیه تسلیم در حضور دسته درزه با شیب ۴۵ در مدل مصالح درزه‌دار

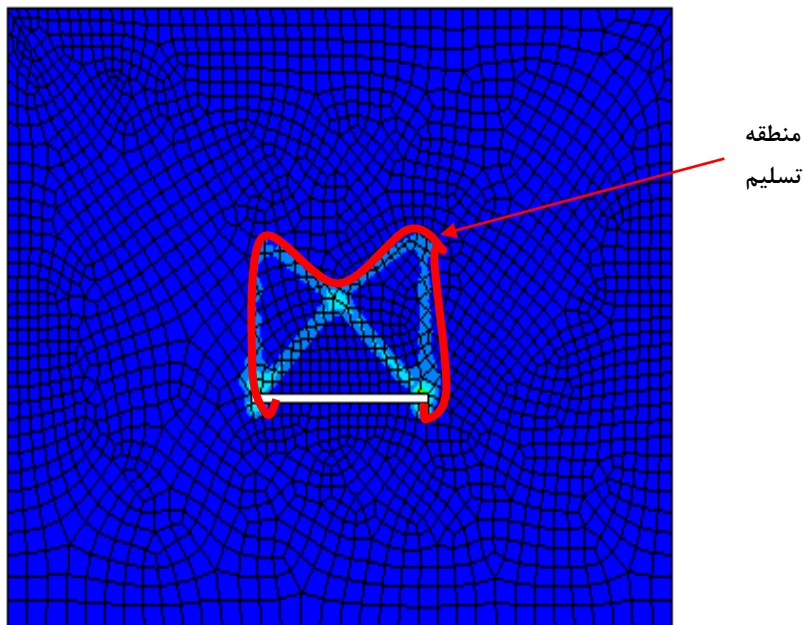
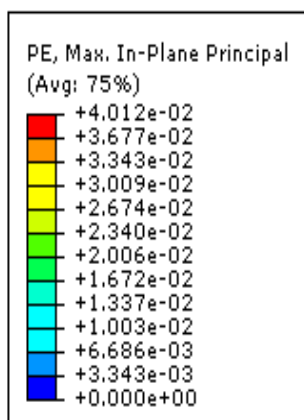


ب- ناحیه تسلیم پیش‌بینی شده در مطالعات ساینزباری (Sainsbury, 2012)

شکل ۲- مقایسه نحوه گسترش منطقه تسلیم در مدل مصالح درزه‌دار و نتایج مطالعات ساینزباری

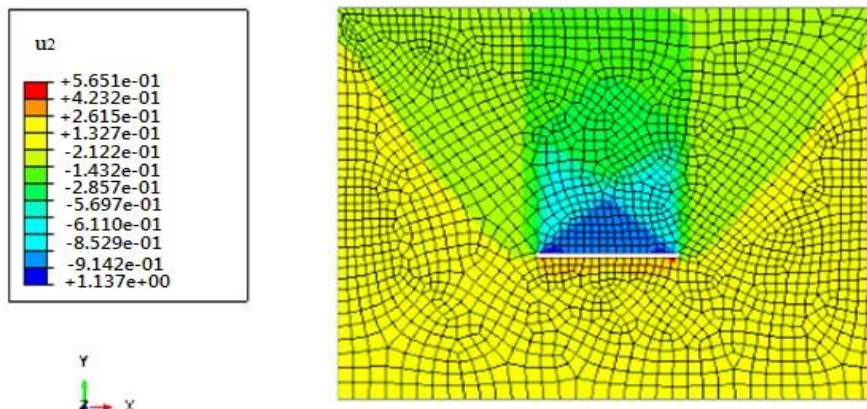
جدول ۳- مقاومت برشی ناپیوستگی های پر شده و مواد پرکننده (Alipenhani, 2015)

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

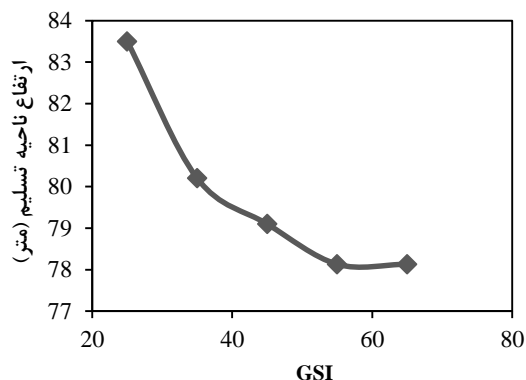
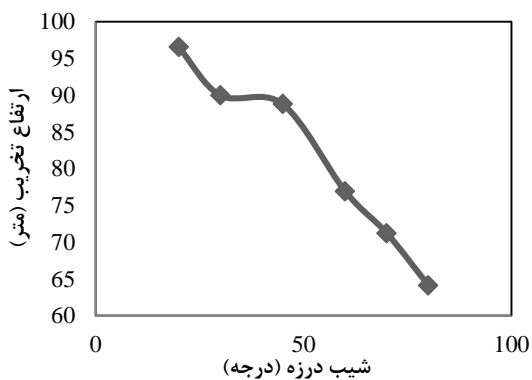


شکل ۳- کنتور کرنش پلاستیک



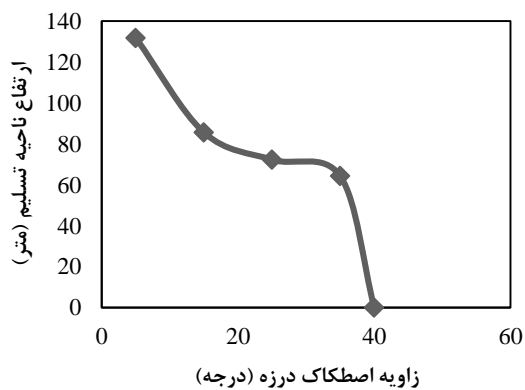
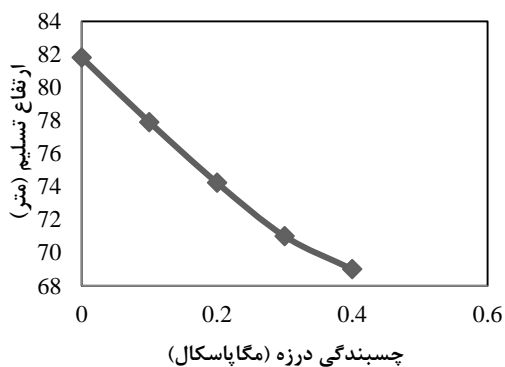


شکل ۴- کنتور جابجایی قائم



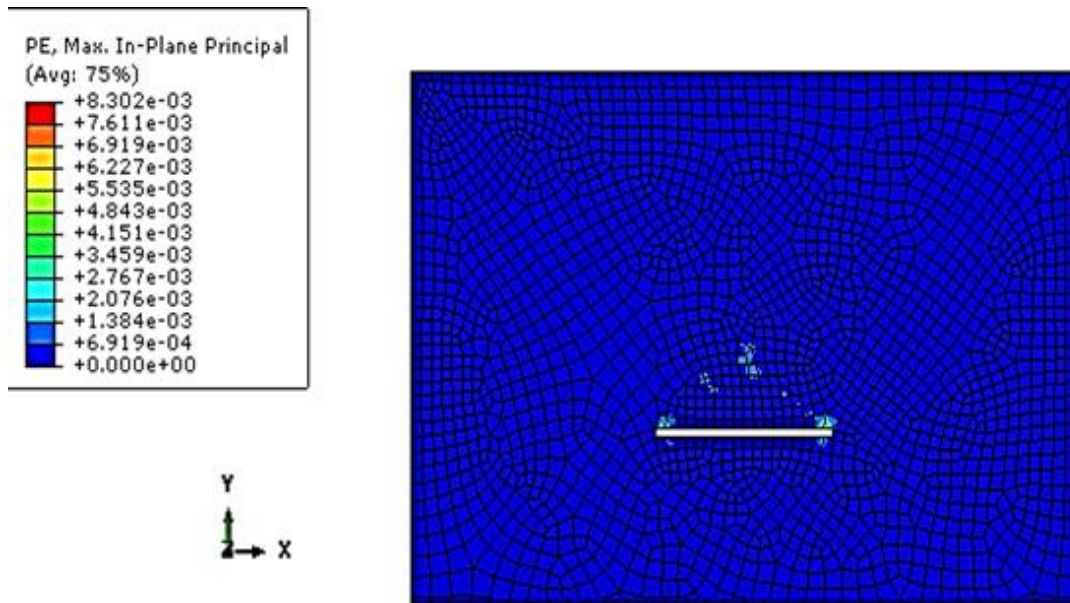
شکل ۵- تأثیر اندیس مقاومت زمین‌شناختی بر ارتفاع منطقه تخریب

شکل ۶- تأثیر شیب ناپیوستگی‌ها بر ارتفاع منطقه تخریب



شکل ۷- تأثیر چسبندگی ناپیوستگی‌ها بر ارتفاع منطقه تخریب

شکل ۸- تأثیر زاویه اصطکاک ناپیوستگی‌ها بر ارتفاع منطقه تخریب



شکل ۹- کنترل کرنش پلاستیک در حالتی که تخریب رخ نداده است.

### ۶- نتیجه گیری

تحقیق حاضر تحت بررسی منطقه تسلیم در روش تخریب بزرگ با استفاده از مدل سازی اجزای محدود و معیار نرخ کرنش پلاستیک، با استفاده از روش عددی اجزای محدود آباکوس انجام گرفت. نتایج این تحقیق به شرح زیر ارائه می شود:

۱- زاویه ی اصطکاک درزه بیشترین تأثیر را بر ارتفاع منطقه تسلیم تخریب دارد. با افزایش زاویه شیب ارتفاع منطقه تسلیم کاهش می یابد. این کاهش در بازه ۳۰ تا ۴۵ درجه با شیب بسیار کم و در بازه ۴۵ تا ۸۰ با شیب بسیار زیادی رخ می دهد.

۲- با افزایش اندیس مقاومت زمین شناختی مقاومت تراکم تک محوری و مدول الاستیک توده سنگ افزایش می یابد و در نتیجه ارتفاع منطقه تسلیم کاهش می یابد. این تأثیر تا مقدار ۵۵ محسوس بوده و از این مقدار به بعد افزایش اندیس مقاومت زمین شناختی تأثیر چندانی بر ارتفاع منطقه تسلیم ندارد. به عبارتی از این مقدار به بعد، نقش درزه ها اهمیت بیشتری پیدا می کند.

۳- شکل منطقه تسلیم از زاویه شیب درزه ها تبعیت می کند.

گسیختگی برشی یا کششی در راستای درزه ها باعث گسترش منطقه تسلیم به سمت جوانب شود.

۴- وجود دسته درزه افقی یا کم شیب باعث افزایش ارتفاع منطقه تسلیم شده و بنابراین برای تخریب مطلوب است.

۵- وجود دسته درزه قائم یا نزدیک به قائم باعث کاهش ارتفاع منطقه تسلیم می شود.

۶- پس از ایجاد زیربرش تنش های اصلی در سقف زیربرش افزایش پیدا می کنند و هرکدام از آنها که مقدارش بر مقاومت توده سنگ (بر مقاومت فشاری توده سنگ یا مقاومت کششی درزه ها) غلبه کند، باعث ایجاد تخریب می شود. تأثیر تنش های القایی تابعی از تغییرات در جهت یافتگی درزه های موجود در توده سنگ است. جهت یافتگی دسته درزه ها نسبت به تنش های القایی در زمان گسیختگی در وقوع و گسترش تخریب نقش بسیار مهمی دارند و عامل مهمی در تعیین اثر قوس زدگی و قفل شدگی بلوک های سنگی است. همان طور که نتایج نشان می دهد ساختارهای کم شیب منجر به جابه جایی قائم مناسب در توده سنگ می شود و از این رو به تخریب کمک می کنند. در حالی که تنش های القایی باعث قفل شدگی در ساختارهای پرشیب می شود و ارتفاع منطقه تسلیم کاهش می یابد.

۷- منابع

- Alipenhani, B. (2015). Development and Exploitation In Block Caving Methide, Schole of Mining Engineeeng, University of Tehran.
- Alipenhani, B. (2016). Investigation of Rock Mass Cavability Using Numerical and Physical Modeling, Master Thesis, School of Mining Engineering, University of Tehran.
- Brady, BB.H.G., & Brown, E.T. (2004). Rock Mechanics For Underground Mining. Chapter 1 (pp. 13-15). Springer; 4th edition. Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers.
- Beck, D., Sharrock, G., and Capes, G. (2011). A Coupled DFE-Newtonian Cellular Automata Scheme for Simulation of Cave Initiation, Propagation and Induced Seismicity. 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium Held in San Francisco, CA.
- Brummer, K., 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.
- Brown ET. (2007). Block Caving Geomechanics. International Caving Study 1997–2004. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland.
- Charles, A., Brannon, K., Gordon, K., & Timothy, P. (2011). Block Caving. Chapter 13.10 (pp. 1437-1450). 3rd Edition, SME Mining Engineering Handbook.
- Dassault Systèmes Simulia Corp. (2008). Abaqus Documentati Version 6.8.
- Ivars, D M., Pierce, M E., Darcel, C., Reyes-Montes, J., Potyondy, D O., Young, R P., Cundall, P A. (2011). The Synthetic Rock Mass Approach for Jointed Rock Mass Modelling, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. pp. 219–244.
- Jabinpur, A. (2013). Investigation of Rock Mass Cavability and Influncing Factor Using Numerical Methode, Master Thesis, Schol of Mining Engineeering, University of Tehran.
- Jiang, H., Xie, Y. (2011). A Note on Mohr-Coulomb and Drucker-Prager Strength Criteria. Mechanic Research Communications. PP. 309-314.
- Karekal, S., Das, R., Mosse, M., Cleary, P. (2011). Application of a Mesh-Free Continuum Method for Simulation of Rock Caving Processes, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. PP. 703–711.
- Lorig, L. (2000). The Roel of Numerical Modelling in Assessing Caveabilty, Itasca Consulting Group Inc., Report to the International Caving Study, ICG00-099-3-16.
- Mawdesley, C. (2002). Predicting Rock Mass Cavability in Block Caving Mines. Ph.D. Thesis, University of Queensland.
- McNearny. R. L., Abel. J. F. (1986). Large-scale Two-Dimensional Block Caving Model Tests, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Vol. 30, No. 2, pp. 93-109.
- Panek, L.A. (1984). Subsidence in Undercut-Cave Operations, Subsidence Resulting from Limited Ex-traction of Two Neighboring-Cave Operations, Department of Mining Engineering, Michigan Technological University, Houghton, Michigan.
- Rice, G., (1934). Ground Movement From Mining in Brier Hill Mine, Norway, Michigan. Mining and Metallurgy, v 15, n 325, p.12-14.

- 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.
- 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*.
- Sainsbury, B., (2012, August). 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.
- Trueman, R., Pierce, M., Wattimena, R. (2002). Quantifying Stresses and Support Requirements In The Undercut and Production Level Drifts of Block and Panel Caving Mines, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 39, PP. 617–632
- Vakili, A., Hebblewhite. B.K., (2010). A New Cavability Assessment Criterion for Longwall Top Coal Caving, *Rock Mechanics & Mining Sciences* 48, pp. 1318–1328.

## Investigation of Yielded Zone in Block Caving Method using Finite Element Modeling and Plastic Strain Rate Criteria

M. Yavari<sup>1</sup>; B. Alipenhani<sup>2</sup>; J. Loffi<sup>3</sup>

1- School of Mining Engineering, University of Tehran

2- Graduated Student, School of Mining Engineering, University of Tehran

3- Ph.D. student, Department of Mining Engineering, Tarbiat Modares University

Received: 14 Mar 2017; Accepted: 16 Jun 2019

DOI: 10.22044/TUSE.2019.5518.1306

### Keywords

Undercut  
Yield Height  
Jointed Material  
Block Caving  
Cavability  
Numerical Modeling

### Extended Abstract

#### Summary

In the last decade, block caving method have been proposed as the best option for extraction of large volume and low grad deposits at depth. This method is the only underground mining method, which is comparable to open pit mining in terms of cost and production capacity. However, operational experience in large block caving mines worldwide has proven the need for comprehensive understanding of the geotechnical processes in caving. The main condition for applicability of block caving method is the cavability of the ore body and surrounding rock. The inappropriate estimation of this variable can create problems in production and processing, or in the worst case, the project will fail. Analysis of the formed areas by caving is very useful for ensuring the accuracy of prediction of caving in different mines. In this study, using Abaqus 6.12 software and Drucker-Prager's behavioral model, the effect of mechanical rock mass characteristics on yielded zone at the top of the undercut in the block caving method has been investigated. The mechanical and geometric properties of the joints have been introduced using jointed materials in the model.

### Introduction

In general, cavability assessment methods and caving propagation are divided into three categories; Analytical, experimental and numerical. The most important experimental methods are Matews stability graph (1980), Laubschur graph (1990) and modified Matews stability graph by Madewslly (2002). In continuous numerical research (for example, Lorig et al. (2000), numerical modeling has been performed taking into account the continuous environment equivalent rock mass. In that research, the effect of joint properties on cavability has not been investigated. The discrete methods and software packages base on these methods like UDEC and 3DEC have limitedly been used for cavability assessment. The parameters considered in this paper include strength, stiffness, pre-mining stresses joint frequency, and top coal thickness. Their applications are mostly about the study of surface subsidence and stability of pillars.

### Methodology and Approaches

The details, approach, tools, software, and the method of the research have clearly and briefly been explained in this paper.

### Results and Conclusions

The results show that the height of yielded zone decreases with increasing strength parameters of the rock mass and joints. The friction angle of the joint has the greatest effect on the height of the yielded zone. The joints with dip of 20 degrees have highest height of yielded zone. As the dip of the joints increases, the height of the yielded zone decreases. This decrease occurs in the dip range of 30 to 45 degrees with very low gradient and in the dip range of 45 to 80, with a large gradient.