

### برآورد قابلیت جریان سنگ آهن و باطله در منطقه تخریب معدن زیرزمینی آنومالی ۱۲ سه چاهون

#### پژوهشی

علیرضا جبین پور<sup>۱</sup>؛ سیدحسین سعادت میرقدیم<sup>۲</sup>؛ علیرضا یاراحمدی بافقی<sup>۳\*</sup>

۱- دکتری استخراج معدن؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، [alireza.jabin@yahoo.com](mailto:alireza.jabin@yahoo.com)

۲- کارشناس ارشد مکانیک سنگ؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، [h.saadat313@yahoo.com](mailto:h.saadat313@yahoo.com)

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، [ayarahmadi@yazd.ac.ir](mailto:ayarahmadi@yazd.ac.ir)

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۰۷/۲۶

شماره صفحات: ۴۳ تا ۶۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2019.8575.1370

واژگان کلیدی	چکیده
قابلیت جریان ثقلی مدل‌سازی فیزیکی مدل سه بعدی تخریب در طبقات فرعی آنومالی ۱۲ سه چاهون	جریان ثقلی در معادن زیرزمینی تخریبی به دلیل اثرگذاری آن بر اختلاط و بازیابی دارای اهمیت بسزایی است. از این‌رو ارزیابی و بررسی آن به روش‌های مختلف تا کنون به انجام رسیده است. در این پژوهش قابلیت جریان ثقلی ماده معدنی و باطله در آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی برآورد شده است. به این منظور ابتدا ابعاد طراحی مورد مطالعاتی انتخاب و بر اساس آن با مقیاس ۱:۱۰، مدل فیزیکی سه‌بعدی ساخته شده است. مدل فیزیکی با استفاده از ماده معدنی و باطله دانه‌بندی‌شده ایجاد شده است. انجام آزمایش روی مدل در ابتدا با مشخص کردن زاویه قرار ماده معدنی و باطله و عمق برداشت آغاز و با به دست آمدن عمق برداشت برابر با ۱۱ سانتی متر، فرایند مدل‌سازی جریان انجام گرفت. نتایج مدل‌سازی نشان داد که میزان بازیابی برابر با ۶۳ درصد است و عمده مواد خروجی در دسته خوب و قابل قبول قرار می‌گیرد. همچنین با استفاده از روش المان مجزا، مدل‌سازی عددی جریان انجام گرفت که با توجه به اعتبارسنجی انجام‌شده، می‌توان از آن مدل برای مدل‌سازی‌های دیگر بهره برد.

#### ۱- مقدمه

تولید فعلی است تا روند جریان نقدینگی با چالش روبرو نشود. در ابتدا لازم است، توان تولید معدن حفظ شود. در بین روش‌های استخراج زیرزمینی، روش‌های استخراج تخریبی بیش از بقیه از این مزیت برخوردارند و قابلیت رقابت با روش روباز را دارند؛ بنابراین معادن و صنایع معدنی در ابتدای برنامه‌ریزی‌ها بر این روش‌ها متمرکز می‌شوند تا در صورتی که شرایط فنی این امکان را بدهد، از روش‌های استخراج تخریبی بهره‌مند شوند.

روش‌های استخراج تخریبی به روش‌های استخراجی

در سال‌های اخیر نیاز به مواد معدنی روند رو به رشدی از خود به جا گذاشته است. این روند باعث افزایش استخراج معادن و در نتیجه کاهش شدید ذخایر سطحی در معادن شده است. از این‌رو برنامه‌ریزی‌ها برای به کارگیری روش‌های استخراج زیرزمینی در کانسارهای عمیق در برنامه‌های آتی معادن قرار گرفته است. اولین چالشی که این برنامه‌ریزی برای معادن ایجاد می‌کند، مبحث توان تولید و دستیابی به

در بونکر، یک عملیات بسیار پیچیده محسوب می‌شود. هندسه، ابعاد و هر ویژگی عملیاتی در این روش را نمی‌توان به صورت تصادفی انتخاب کرد، بلکه باید بر اساس قوانینی که ناظر بر جریان ثقلی ماده معدنی آتشیاری شده و سنگ باطله تخریب شده است، برنامه‌ریزی شود. به علت غیرهمگن بودن این مواد و تعدد عوامل و شرایط، جریان ثقلی مذکور یک عملیات بسیار پیچیده است.

باید توجه شود جریان ثقلی به معنای حرکت مواد درشت‌دانه بوده و فرایندی کاملاً متفاوت از جریان سیال‌ها است. از این رو، دانش مربوط به جریان سیال نمی‌تواند برای جریان ثقلی مواد درشت‌دانه به کار رود؛ زیرا قوانین اصلی و اصول جریان ثقلی وابسته به اندازه خردشدگی است.

همانطور که گفته شد، میزان اختلاط ماده معدنی و باطله یک عامل بسیار مهم در روش تخریب در طبقات فرعی است که با بررسی‌های انجام گرفته، مشخص شده است که عوامل مختلفی بر این مهم اثرگذار است. این عوامل را می‌توان به دو دسته مختلف تقسیم‌بندی کرد:

۱. پارامترهای تأثیرگذار مرتبط با سنگ‌های تخریب شده: اندازه ذرات، شکل ذرات، زبری سطح ذرات، زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص، درصد ترکیبات روان‌ساز یا قفل‌کننده، خواص فیزیکی ذرات (مقاومت، رطوبت، چسبندگی و...) و ضریب تورم سنگ.
۲. پارامترهای مرتبط با روش استخراج: ابعاد تخریب، بازیابی و اختلاط، آتشیاری، تورم و ساز و کار تخلیه.

با بررسی پژوهش‌ها و مطالعات گذشته، به نظر می‌رسد که کوپیل اولین مطالعات مرتبط با اصول جریان ثقلی را در معادن تخریبی انجام داده است. از نظر دانه‌بندی، مواد تخریبی می‌توانند به شکل‌های گوناگونی باشند که در شکل ۱، نشان داده شده است. مواد تخریبی با قطعات کروی بزرگ با شکل و اندازه یکسان (الف) (دارای بیش‌ترین قابلیت حرکت)، مواد تخریبی با قطعات هم‌اندازه و با شکل‌های متفاوت (ب)، مواد تخریبی شامل قطعات بزرگ، شن و تراشه‌ها (پ) و مخلوط مواد تخریبی شامل قطعات بزرگ، ماسه و تراشه‌ها و اجزای خاکی و گلی (ت) (دارای کم‌ترین قابلیت حرکت) نمایش داده شده است.

اجزای خاکی و گلی هنگامی که به سطح مشخصی از رطوبت دست می‌یابند، می‌توانند تغییر شکل پلاستیک پیدا

اطلاق می‌شود که در آن ماده معدنی و کمربالا به صورت خودبه‌خودی تخریب و قابل استخراج می‌شوند. در این دسته روش‌ها، روش‌های تخریب بزرگ (تخریب ماده معدنی و کمربالا)، تخریب در طبقات فرعی (تخریب کمربالا) و جبهه‌کار طولانی (تخریب کمربالا) قرار دارند. به کارگیری روش‌های استخراج تخریبی مستلزم بررسی‌های مختلفی است. مهم‌ترین مواردی که باید در روش‌های استخراج تخریبی در نظر گرفته شوند، وضعیت تخریب‌پذیری توده‌سنگ، شرایط جریان ثقلی مواد تخریبی و مبحث نشست سطح زمین است. در این پژوهش موضوع مربوط به جریان ثقلی مواد مورد بررسی قرار گرفته است.

یک طراحی مناسب برای به کارگیری روش‌های استخراج زیرزمینی تخریبی مستلزم شناخت و درک صحیحی از چگونگی جریان مواد خرد شده تحت تأثیر ثقل است. جریان ثقلی از این جهت در روش‌های استخراج تخریبی حائز اهمیت است که کنترل اختلاط ماده معدنی و باطله را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقدار اختلاط ماده معدنی با باطله تأثیر بسزایی در شرایط اقتصادی یک معدن دارد. برای مثال، یکی از نقطه‌ضعف‌های روش تخریب در طبقات فرعی میزان اختلاط نسبتاً بالای آن است. به همین جهت یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در روش‌های استخراج تخریبی، مبحث مربوط به جریان ثقلی ماده معدنی و باطله است. به همین منظور، پژوهش‌های مختلفی در زمینه بررسی جریان ثقلی تاکنون انجام گرفته است.

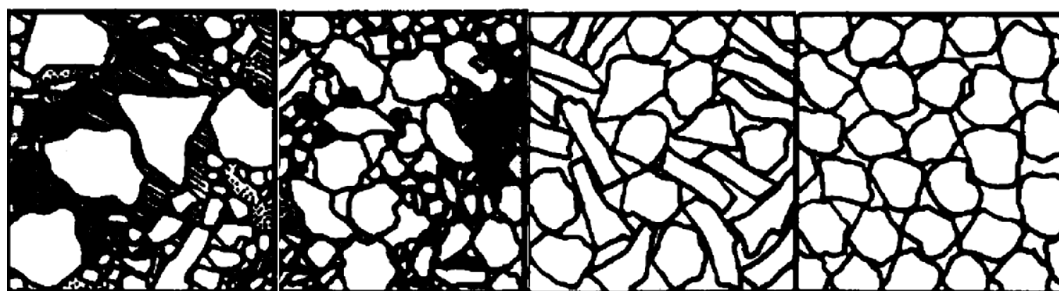
## ۲- قابلیت جریان در روش‌های تخریبی

روش‌های استخراج تخریبی وابستگی شدیدی به نیروی گرانش دارند. از این رو بررسی جریان ثقلی مواد تخریبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. به صورت کلی، با توجه به این که فرایند استخراج و جریان کمربالا در روش جبهه کار طولانی تفاوت عمده‌ای با دو روش دیگر دارد و با توجه به این که روش استخراج تخریب در طبقات فرعی برای مورد مطالعاتی این پژوهش انتخاب شده است، جریان ثقلی مواد در روش تخریب در طبقات فرعی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

جریان ثقلی ماده معدنی آتشیاری شده و باطله تخریب شده در روش تخریب در طبقات فرعی در برابر جریان مواد

و گلی، ظرفیت خردکنندگی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، اگر شکل قطعات تخریبی به گونه‌ای باشد که امکان قفل‌شدگی (*interlock*) وجود داشته باشد، می‌تواند باعث کاهش قابلیت حرکت شود. در جدول ۱، به صورت خلاصه مواد گفته شده به همراه وضعیت آنها در شرایط مختلف شرح داده شده است.

کنند و یا به قطعات بزرگتر چسبیده و فضای خالی بین آنها را پر کنند. این مسئله باعث کمتر شدن جابه‌جایی قطعات بزرگ‌تر از ۴۰ اینچ (۱۰۱ سانتی‌متر) می‌شود و در نتیجه کاهش قابلیت حرکت مواد تخریبی را به همراه دارد. از طرفی، حجم زیاد اجزای خاکی و گلی در مواد تخریبی باعث ایجاد مشکلات عملیاتی می‌شود. اثر انباشتگی اجزای خاکی



الف) مواد تخریبی با قطعات کروی بزرگ با شکل و اندازه یکسان  
ب) مواد تخریبی با قطعات هم‌اندازه و با شکل‌های متفاوت  
پ) مواد تخریبی شامل قطعات بزرگ، شن و تراشه‌ها  
ت) مخلوط مواد تخریبی شامل قطعات بزرگ، ماسه و تراشه‌ها و اجزای خاکی و گلی

شکل ۱- انواع مواد تخریبی

جدول ۱- دسته‌بندی مواد تخریبی و وضعیت آنها در شرایط مختلف

شماره گروه	ترکیب مواد تخریبی	خطر قفل شدن	خطر جفت‌شدگی	مقدار آب جذب‌شده توسط مواد تخریبی
۱	توزیع یکنواخت ابعاد (هم‌اندازه و هم‌شکل)	هرگز	هرگز	هرگز
۲	مخلوطی از قطعات هم‌اندازه اما به شکل‌های مختلف	بسیار کم	تقریباً هرگز	تقریباً هرگز
۳	مخلوطی از قطعات با اندازه‌های مختلف و به شکل‌های مختلف	متوسط	کم، شاید متوسط	متوسط
۴	مخلوطی از قطعات با اندازه و شکل‌های مختلف، با ترکیبات خاکی-رسی	زیاد	زیاد	زیاد

ثقلی مواد دانه‌ای در قیف‌ها و سیلواها انجام گرفته‌است. در بخش دیگر، مطالعه اصول جریان ثقلی مواد دانه‌ای به صورت خاص در معادن و با تمرکز بر مواد زبر و درشت‌دانه انجام شده است.

پس از مطالعات کوپیل، مک کورمیک در سال ۱۹۶۸ با طرح این پرسش که طول عمر یک دهانه تخلیه چه مدت است، جریان ثقلی و اثر آن بر این پرسش را مورد مطالعه قرار داد. جاست و فری در سال ۱۹۷۱ جریان ثقلی مواد در تخریب طبقات‌فرعی را مورد مطالعه قرار دادند. جانلید در سال ۱۹۷۲ فرایند جریان ثقلی را در روش استخراج تخریب

از آنجا که مباحث مربوط به اصول جریان ثقلی بسیار گسترده است، در این مقاله بیش از این به آن پرداخته نمی‌شود. برای اطلاعات بیشتر می‌توان از مراجع بهره برد.

### ۳- تاریخچه قابلیت جریان در منطقه تخریب

در زمینه قابلیت جریان ثقلی در معادن زیرزمینی تخریبی مطالعات مختلف و متعددی تا کنون انجام گرفته است. همانطور که ذکر شد، اولین مطالعات در این زمینه را کوپیل انجام داده است. این مطالعات در دو بخش ارائه شده است. یک بخش آن به صورت عام، مطالعات بر روی اصول جریان

در معدن طلا که با روش تخریب طبقات فرعی استخراج می‌شود را مورد مطالعه قرار دادند. ویمر در سال ۲۰۱۰ بررسی اجمالی بر مطالعات انجام گرفته در زمینه جریان ثقلی انجام داد و موارد موجود از جمله بیضوی‌های جریان و اصلاحاتی را که روی آن‌ها انجام شده است بیان کرد. تالو و همکاران در سال ۲۰۱۰ با نصب تجهیزات هوشمند اقدام به بررسی رفتار جریان مواد در معدن نورث پارک کردند. وایتمن در سال ۲۰۱۰ با ارائه یک سیستم هوشمند، ابزاری مبتنی بر سیستم *RFID* برای اندازه‌گیری جریان ماده معدنی در روش‌های تخریب بزرگ و تخریب در طبقات فرعی را معرفی کرد. کاسترو و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از متدولوژی فنی و اقتصادی مبتنی بر جریان ثقلی مواد در نزدیکی نقاط بیرون‌کشی (تخلیه) و هزینه‌های آماده‌سازی، فاصله بهینه نقاط بیرون‌کشی (تخلیه) را در معدن ال تنینت (*El Tenient*) شیلی تعیین کردند. مطالعات مربوط به جریان ثقلی به جز مواردی که ذکر شد، عمدتاً با استفاده از روش‌های مدل‌سازی بوده است. به طور کلی در این مطالعات از مدل‌سازی‌های ریاضی، فیزیکی و عددی بهره گرفته شده است. این مطالعات به صورت کلی و مختصر در جدول ۲، به تفکیک نوع مدل‌سازی ارائه شده است.

در طبقات فرعی را مورد بررسی و مطالعه قرار داد. کالام در سال ۱۹۷۴ اثر آتشباری محدود را بر خردایش ماده معدنی و پارامترهای جریان ثقلی مورد بررسی قرار داد. ینگ در سال ۱۹۸۰ جریان ثقلی مواد تخریبی را با ارتباط دادن جریان تخریب در طبقات فرعی با جریان در سیلوها و بونکرها مورد مطالعه قرار داد (*Yenge, 1980*). جاست در سال ۱۹۸۱ در مطالعه‌ای، اهمیت جریان ثقلی مواد را بر طراحی و تولید معدن را مورد بررسی قرار داد. استاژفسکی در سال ۱۹۹۶ جنبه‌های مختلف جریان مواد خرد شده در استخراج مواد معدنی در روش تخریب در طبقات فرعی را مورد مطالعه قرار داد. کوپیل در ادامه مطالعات خود در سال ۲۰۰۸ نظریه مربوط به جریان ثقلی در روش تخریب طبقات فرعی را به روزرسانی کرد. وجه تمایز این نظریه با مطالعات گذشته در این است که بر مبنای آن ماده معدنی خردشده در مواد تخریبی درشت‌تر فرو می‌رود. بایدن و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از سنسورهایی که در معدن تخریب بزرگ قرار داده بودند، به صورت لحظه‌ای شرایط جریان ثقلی را مورد بررسی قرار دادند. برانتون در سال ۲۰۰۹ تأثیر آتشباری را بر رفتار جریان ثقلی و بازیابی ماده معدنی در روش تخریب در طبقات فرعی مورد مطالعه قرار داد. برانتون و همکاران در سال ۲۰۱۰ عوامل مؤثر بر بازیابی ماده معدنی

جدول ۲- مطالعات جریان ثقلی با استفاده از مدل‌سازی

شرح پژوهش	پژوهشگر	سال	نوع مدل‌سازی
مطالعه حرکت ماده معدنی و باطله در معادن زیرزمینی	جولی	۱۹۶۸	
مطالعه جریان ثقلی ماده معدنی در روش تخریب در طبقات فرعی	آلفورد ( <i>Alford, 1978</i> )	۱۹۷۸	
بررسی تغییرات مقدار باطله در جریان ثقلی به صورت بزرگ مقیاس	گوستافسون ( <i>Gustafsson, 1998</i> )	۱۹۹۸	
مطالعه جریان ثقلی و برآورد نقش پارامترهای کلیدی در آن با نرم‌افزار <i>PFC3D</i>	پیرس و همکاران ( <i>Pierce, et al., 2002</i> )	۲۰۰۲	
تحلیل ژئوتکنیکی جریان ثقلی با مدل‌سازی پیوسته و با استفاده از نرم‌افزار <i>FLAC3D</i>	وردوگو و اوبیلا ( <i>Verdugo &amp; Ubilla, 2004</i> )	۲۰۰۴	عددی
بررسی رفتار جریان ثقلی در روش تخریب در طبقات فرعی با استفاده از نرم‌افزار <i>PFC3D</i>	سلدن و پیرس ( <i>Sellden &amp; Pierce, 2004</i> )	۲۰۰۴	
بررسی اثر آتشباری بر جریان ثقلی و بازیابی ماده معدنی در روش تخریب در طبقات فرعی با نرم‌افزار <i>PFC3D</i>	دگانگ ( <i>DeGagne, 2005</i> )	۲۰۰۵	
مطالعه آتشباری و جریان ثقلی مواد در روش تخریب در طبقات فرعی	مینچینتون و دار برایان	۲۰۰۵	

شرح پژوهش	پژوهشگر	سال	نوع مدل سازی
ارزیابی فاصله بین نقاط بیرون کشی در روش تخریب بزرگ با استفاده از مدل سازی عددی جریان ثقلی	کاسترو و همکاران	۲۰۰۹	
توسعه مدل سینماتیک بهبود یافته برای مطالعه جریان مواد در تخریب بزرگ با استفاده از چندین دهانه بیرون کشی	کاسترو و همکاران	۲۰۱۰	
شبیه سازی بزرگ مقیاس جریان ثقلی در تخریب بزرگ با نرم افزار المان مجزای <i>ESyS-Particle</i>	هانکوک و همکاران	۲۰۱۰	
مطالعه مدل های تصادفی جریان ثقلی با استفاده از نرم افزار تحلیل عددی <i>MFlow</i>	گیسون	۲۰۱۴	
مطالعه ویژگی های جریان ماده معدنی تخریب شده تحت شرایط پیچیده مرزی با نرم افزار <i>PFC3D</i>	سان و همکاران	۲۰۱۵	
ارزیابی تأثیر تغییر در اصطکاک و خردشدگی توده سنگ بر جریان ثقلی در روش تخریب در طبقات فرعی	لاپسویک و توربیکا	۲۰۱۷	
شبیه سازی عددی رفتار جریان ماده معدنی از یک دهانه بیرون کشی منفرد با نرم افزار <i>PFC2D</i>	چن و همکاران	۲۰۱۹	
مطالعه جریان مواد در روش تخریب در طبقات فرعی	فری	۱۹۷۰	
ارائه تئوری تصادفی مجزا برای مطالعه جریان ثقلی مواد	مولینز	۱۹۷۲	
ارائه راهکار <i>CA</i> به منظور مدل سازی جریان مواد دانه ای	باکستر و بهرینگر	۱۹۹۰	
مطالعه جریان ثقلی مواد خرد شده با استفاده از مدل سازی تصادفی	چن	۱۹۹۷	
استفاده از یک روش محاسباتی برای مدل سازی بزرگ مقیاس معدن <i>LKAB</i>	هاسترو لید	۱۹۹۷	
بهره گیری از تئوری برگمارک-روس به عنوان بهترین تئوری ریاضی در مطالعه جریان ثقلی	روستان	۲۰۰۰	
بازبینی تئوری برگمارک-روس و ارائه یک فرم جدید از این تئوری برای توصیف جریان ثقلی مواد خرد شده	کوچتا	۲۰۰۲	
مطالعه مدل های پیش بینی جریان ثقلی مواد خرد شده	آلفارو و ساودرا	۲۰۰۴	ریاضی
شبیه سازی جریان ثقلی در روش تخریب در طبقات فرعی با استفاده از راهکار <i>CA</i>	شاروک و همکاران	۲۰۰۴	
راهکار جدید <i>CA</i> برای مدل سازی جریان ثقلی در روش تخریب بزرگ بر اساس تجارب مدل سازی فیزیکی	کاسترو و ویتن	۲۰۰۷	
توسعه نرم افزار <i>FlowSim</i> مبتنی بر راهکار <i>CA</i> و ارائه مدل بهبود یافته جریان ثقلی	کاسترو و همکاران	۲۰۰۹	
کالیبره کردن مکانیزم جدید نرم افزار <i>FlowSim</i> و شبیه سازی جریان ثقلی در روش تخریب بزرگ	کاسترو و همکاران	۲۰۱۸	
استفاده از مدل سازی ریاضی برای کنترل بیرون کشی در شرایط عدم قطعیت جریان مواد با حل کننده <i>CPLEX</i>	خدایاری و همکاران	۲۰۱۸	
مطالعه فرایند جریان ثقلی را در روش استخراج تخریب در طبقات فرعی	جانلید	۱۹۷۲	
بررسی بهینه سازی در روش تخریب در طبقات فرعی	پانزاکویچ	۱۹۷۷	فیزیکی
مطالعه جریان ثقلی در تخریب در طبقات فرعی	ینگ	۱۹۸۱	
مطالعه رفتار بیرون کشی سنگ های خرد شده حاصل از تخریب	پیترز .	۱۹۸۴	

مطالعه جریان مواد در معادن تخریبی با مدل‌سازی فیزیکی به منظور درک کافی از پیچیدگی‌های جریان	پاور	۲۰۰۴
مطالعه نواحی بیرون‌کشی ایزوله در روش تخریب بزرگ با مدل‌سازی سه‌بعدی بزرگ مقیاس	کاسترو و همکاران	۲۰۰۷
مطالعه اندرکنش جریان ثقلی در نواحی بیرون‌کشی در روش تخریب بزرگ با مدل‌سازی سه‌بعدی بزرگ مقیاس	ترومن و همکاران	۲۰۰۸
کمی‌سازی اثر بیرون‌کشی همزمان در روش تخریب بزرگ با مدل‌سازی فیزیکی بزرگ مقیاس سه‌بعدی	هالیم و همکاران	۲۰۰۸
تعیین ویژگی‌های جریان ثقلی مواد ریزدانه در روش تخریب بزرگ	سانچز و همکاران	۲۰۱۹

به‌صورت متمرکز در این عمق واقع شده است و با شیب تقریبی ۲۰ درجه نسبت به قائم گسترش یافته است. ذخیره این معدن با مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی مقدماتی و در مرحله تفصیلی با حفاری‌های گسترده اکتشاف شده است. بر اساس گزارش اکتشافی در این منطقه، آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون دارای ذخیره قطعی ۲/۵ میلیون تن در سطح و ۲۴ میلیون تن در عمق است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، این کانسار دارای دو زون پرعیار با عیار بالای ۴۵ درصد و کم عیار با عیاری بین ۲۰ تا ۴۵ درصد است.

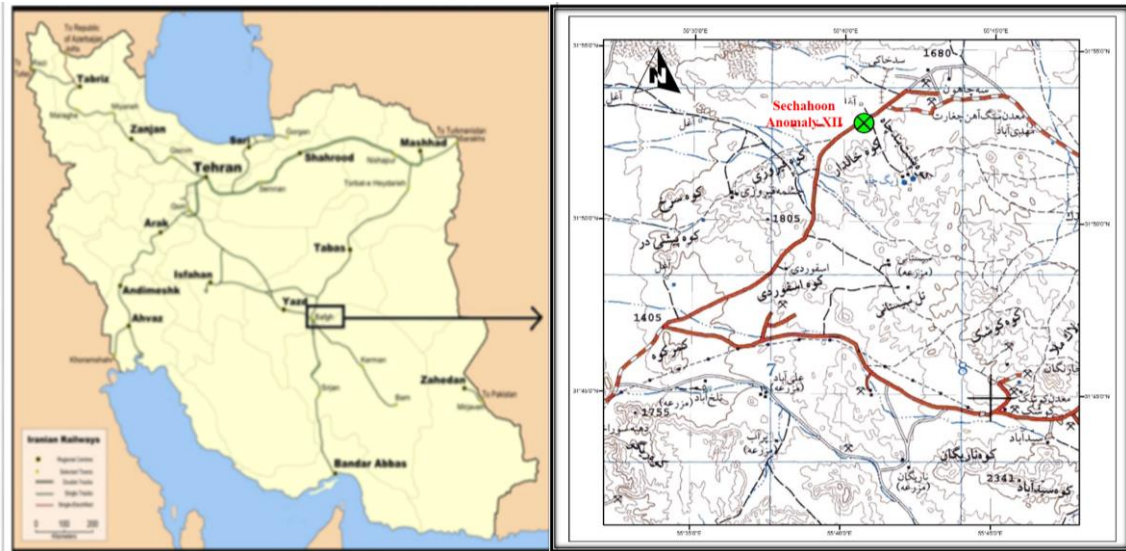
مطالعات گذشته در این محدوده مبنی بر این است که با توجه به محل قرارگیری ذخیره، روش تخریب در طبقات فرعی برای آن انتخاب شده است. همچنین وضعیت تخریب‌پذیری توده‌سنگ مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه دارای شرایط تخریب‌پذیری نسبتاً مناسب برای به کارگیری روش تخریب در طبقات فرعی است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در این مطالعه با استفاده از تلفیق روش تجربی-زمین آماری وضعیت تخریب‌پذیری ارزیابی شده است. با در نظر گرفتن شعاع هیدرولیکی ۱۲/۵ متر، ۸۲ درصد بلوک‌ها با معیار لابسچر در وضعیت تخریبی قرار می‌گیرند و ۱۸ درصد مابقی در وضعیت گذار قرار دارند. بر اساس همین بررسی، هیچ بلوکی شرایط پایداری قطعی را تجربه نخواهد کرد. از این رو همانطور که گفته شد باید سایر شرایط به کارگیری این روش استخراج ارزیابی شود. بدین منظور در این مطالعه ارزیابی جریان ثقلی مواد تخریبی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی انجام شده است.

با بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه جریان ثقلی مواد در روش‌های تخریبی و با توجه به اهمیت جریان ثقلی در موفقیت یا عدم موفقیت این روش‌ها، مطالعات قابلیت جریان ثقلی برای آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون انجام می‌گیرد. در ادامه مورد مطالعاتی به‌صورت خلاصه معرفی می‌شود.

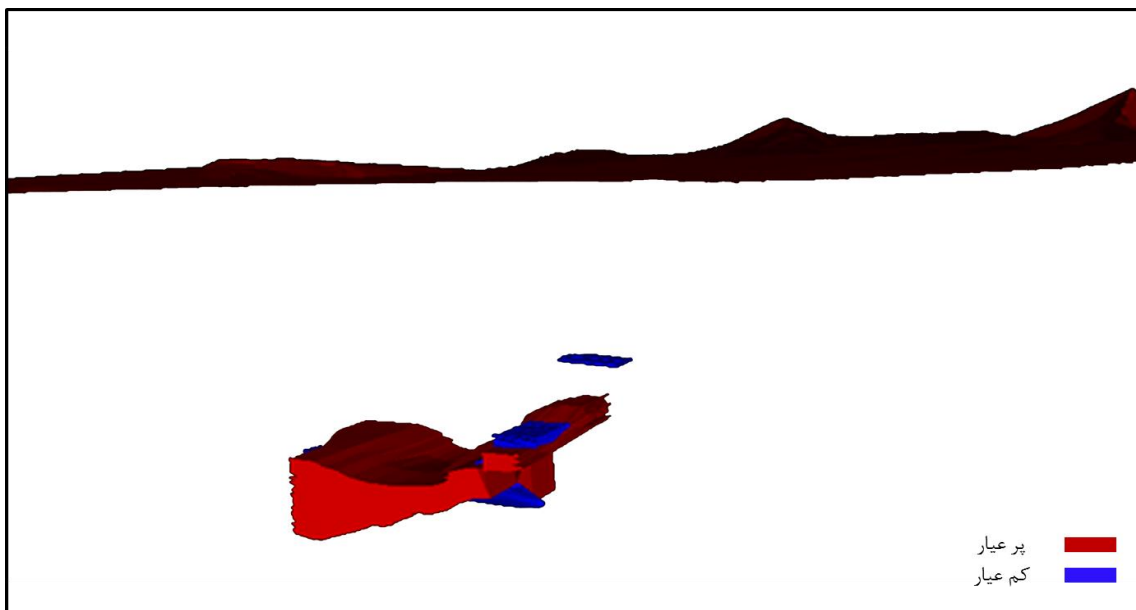
#### ۴- آنومالی شماره ۱۲ سه‌چاهون

آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون در استان یزد در فاصله ۱۴۲ کیلومتری شرق شهر یزد و ۳۲ کیلومتری شمال‌شرق شهرستان بافق قرار دارد. همچنین این آنومالی در ۲۳ کیلومتری شمال‌شرقی معدن سنگ‌آهن چغارت و ۵ کیلومتری جنوب‌غربی معدن سنگ‌آهن سه‌چاهون (آنومالی شماره ۱۱) قرار دارد. شکل ۲، محل قرار گرفتن آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون را نشان می‌دهد.

ذخیره آهن آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون در بخش جنوب‌غربی معدن سنگ آهن سه چاهون (آنومالی شماره ۱۱) و در مرز غربی آنومالی سنگ آهن شماره ۱۰ قرار دارد. این ذخیره به‌صورت دو بخش جدا از هم که بخش اصلی آن در عمق تقریبی ۳۵۰ تا ۴۹۰ متری از سطح زمین و در شمال‌غربی قرار دارد، تشکیل شده است (شکل ۳). سطح آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون به‌وسیله سنگ‌های رسوبی کواترنری پوشیده شده است که در یک منطقه‌ای به مساحت حدودی ۲۶۰ هکتاری قرار دارد. بر اساس سیستم مختصات *UTM* طول جغرافیایی محدوده آنومالی ۱۲ مابین ۳۷۳۸۰۰-۳۷۵۴۰۰ متر شرقی و عرض جغرافیایی آن مابین ۳۵۲۸۵۰۰-۳۵۲۶۹۰۰ متر شمالی است. این آنومالی



شکل ۲- موقعیت آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون



شکل ۳- مدل سه بعدی تهیه شده برای بخش عمقی آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون

مشخص شود. از این رو با بررسی‌های انجام شده در مطالعات گذشته، این نتیجه حاصل شد که ابعاد کارگاه‌ها و طبقات بر اساس معادن مشابه همچون معدن *Grängesberg* سوئد، *Longtan* چین، *Kiruna* سوئد، *Stobie* کانادا و *Ridgeway* استرالیا با شرایط موجود انتخاب شود. برای مدل‌سازی فیزیکی یک حلقه تخریب مشابه مقطع شکل ۴، انتخاب شده است.

## ۵- مدل‌سازی فیزیکی قابلیت جریان آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون

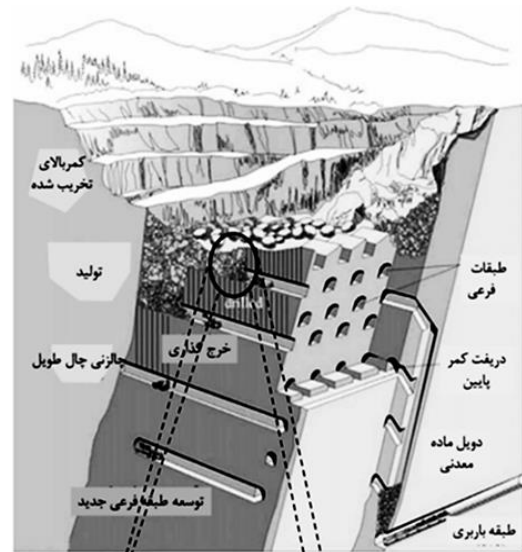
از آنجا که آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون در مرحله مطالعات امکان‌سنجی است، بنابراین هنوز به مرحله طراحی کارگاه‌ها و طبقات نرسیده است. به منظور ارزیابی جریان ثقلی مواد با مدل‌سازی فیزیکی لازم است تا ابعاد طبقات و کارگاه‌ها

### ۵-۱- تعیین ابعاد واقعی روش استخراج تخریب در طبقات فرعی

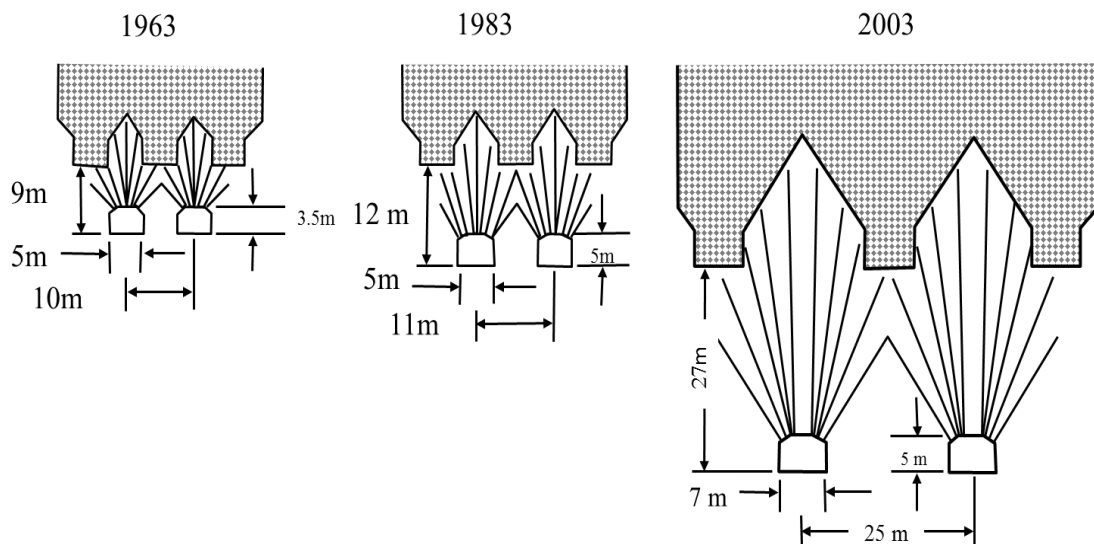
مطالعه انجام شده توسط هاسترویلید و کوپیل در سال ۲۰۰۸ بر روی گذشته و آینده روش تخریب در طبقات فرعی نشان از آن دارد که با بهبود فناوری در معادن، ابعاد کارگاه‌ها و طبقات در این روش رو به افزایش است که با افزایش تولید همراه است (W. Hustrulid & Kvapil, 2008). روند تغییرات در ابعاد مورد نظر در شکل ۵، نشان داده شده است. پارامترهای دارای اهمیت مربوط به شکل ۵، به صورت تفکیک شده در جدول ۳، آورده شده است.

دسته‌بندی دیگری که در این زمینه انجام شده است بر اساس اطلاعات معادن مختلف است. جدول ۴، اطلاعات مربوط به پارامترهای طراحی در سه معدن مختلف که با روش تخریب در طبقات فرعی استخراج می‌شود را ارائه می‌کند.

از آنجا که بررسی‌ها نشان‌دهنده این است که هیچ کدام از موارد مورد بررسی کاملاً با شرایط مورد مطالعاتی این پژوهش همخوانی ندارد، تصمیم بر آن شد تا ابعاد واقعی به صورت میانگینی از موارد موجود در سایر مطالعات و معادن انتخاب شود؛ بنابراین ابعاد واقعی برای روش استخراج به صورت آنچه که در جدول ۵، ارائه شده است، انتخاب شد.



شکل ۴- منطقه مورد نظر در معدنکاری به روش تخریب در طبقات فرعی برای مدل‌سازی فیزیکی



شکل ۵- هندسه تخریب در طبقات فرعی در سه زمان مختلف (W. Hustrulid & Kvapil, 2008)



جدول ۳- مهم ترین پارامترهای طراحی در روش تخریب در طبقات فرعی به تفکیک سال (W. Hustrulid & Kvapil, 2008)

پارامتر	سال		
	۱۹۸۳	۱۹۶۳	۲۰۰۳
عرض راهرو (m)	۵	۵	۷
ارتفاع راهرو (m)	۴	۳/۵	۵
ارتفاع طبقات (m)	۱۲	۹	۲۷
فاصله داری طبقات راهرو (m)	۱۱	۱۰	۲۵
بارسنگ (m)	۱/۸	۱/۶	۳
چال‌ها / حلقه انفجاری	۹	۹	۱۰
تن / حلقه انفجاری	۱۰۸۰	۶۶۰	۹۳۰۰
تن / هر متر راهرو	۶۰۰	۴۰۰	۳۱۰۰

جدول ۴- مهم ترین پارامترهای طراحی در روش تخریب در طبقات فرعی به تفکیک معدن

پارامتر	معدن		
	کایرونا	گرنگسبرگ	پرسویرنس
فاصله داری راهروهای طبقات (m)	۲۵	۷	۱۴/۵
فاصله داری طبقات (m)	۲۷	۱۳	۲۵
قطر چال (mm)	۱۱۴	۴۱	۱۰۲
بارسنگ (m)	۳	۱,۵	۳
عرض راهرو (m)	۷	۳ - ۳/۵	۵/۱
ارتفاع راهرو (m)	۵	۳	۴/۸
شیب پیشانی (degrees)	۸۰	۹۰	۷۵
فاصله داری تونل‌های طبقات (m)	۲۵	۷	۱۴/۵

جدول ۵- ابعاد واقعی انتخابی برای روش تخریب در طبقات فرعی

عرض راهرو (متر)	ارتفاع حلقه انفجاری (متر)	ضخامت بارسنگ (متر)	ارتفاع تونل (متر)	شیب پیشانی (درجه)
۵	۱۵	۲	۴	۹۰

## ۵-۲- تعیین ابعاد مدل فیزیکی

آزمایش‌های مقیاس کوچک از مدل‌های ظرفی ساده تا مدل‌های نسبتاً پیچیده که در برگزیده هندسه تخریب طبقات فرعی و پارامترهای مواد غیرهمگن است، تکامل یافته است. محدودیت‌های متعدد مرتبط با آزمایش‌های مقیاس کوچک در مقالات مربوط به مدل‌سازی، طراحی مدل و خواص سنگ و باطله مورد مطالعه قرار گرفته است. با وجود این محدودیت‌ها، این نتیجه شد که کار تجربی مقیاس

کوچک، نتایج کمی و کیفی قابل استفاده برای طراحی و بهره‌برداری از معادن تخریب طبقات فرعی ارائه می‌دهد. در مدل‌سازی فیزیکی مقیاس بر نتایج آن تأثیرگذار است. هرچه مدل‌های فیزیکی بزرگ‌تر ساخته شوند، به واقعیت نزدیک‌تر و بوده و دارای خطای کم‌تری نسبت به مدل‌های کوچک‌تر هستند. ابعاد مدل بعد از بررسی‌های ابعاد مختلف و برخورد با مشکلاتی از جمله مواد تخریبی با حجم و وزن بالا، ماشین‌آلات بزرگ برای حمل و نقل، دریچه

در مطالعات گذشته انتخاب شده است. در این مطالعه با بررسی شرایط و امکانات مدل‌سازی، نسبت ۱:۱۰ برای مدل‌سازی انتخاب شده است (جدول ۶).

تخلیه مقاوم برای تحمل وزن مواد تخریبی و قابلیت حرکت سریع (به‌عنوان لحظه انفجار و تخریب مواد معدنی)، مقدار مقاومت شیشه‌های جانبی و غیرممکن بودن جداسازی مواد معدنی و باطله مخلوط‌شده پس از تخلیه، تا نسبت ۱:۲۰۰

جدول ۶- ابعاد انتخابی مدل فیزیکی برای روش تخریب در طبقات فرعی

عرض راهرو (سانتی‌متر)	ارتفاع حلقه انفجاری (سانتی‌متر)	ضخامت بار سنگ (سانتی‌متر)	ارتفاع تونل (سانتی‌متر)	شیب پیشانی (درجه)
۵۰	۱۵۰	۲۰	۴۰	۹۰

#### ۵-۳-۱- ماده معدنی (سنگ آهن)

دانه‌بندی ماده معدنی (سنگ آهن) مورد استفاده در محدوده صفر تا ۲۵ میلی‌متر است (شکل ۷) که داده‌های توزیع تجمعی آن در جدول ۷ نشان داده شده است و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۸ آورده شده است. ماده معدنی خردشده دارای چگالی ۱۹۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب، چگالی برجای‌ماده معدنی ۳۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و میزان فضای خالی آن ۴۷ درصد است.



شکل ۶- مدل فیزیکی جریان ثقلی

بنابراین، بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۶، یک چهارچوب کلی با استفاده از فولاد که دیواره‌های آن را شیشه تشکیل داده است تهیه شد. مدل فیزیکی ساخته شده در شکل ۶، نشان داده شده است.

در ساخت این مدل سعی شده است به نحوی عمل شود که هم نسبت مناسبی بین شرایط واقعی و مدل‌سازی برقرار باشد و هم امکان انجام آزمایش به سادگی میسر باشد. از طرفی دیواره‌های مدل از جنس شیشه انتخاب شده است که بتوان به خوبی روند جریان ثقلی موجود را رصد کرد.

#### ۵-۳- انتخاب مواد

ابعاد دانه‌بندی مورد استفاده در مدل فیزیکی، با توجه به مطالعات پیشین (شامل مطالعه تخمین قابلیت انفجار در روش تخریب در طبقات فرعی در آنومالی ۱۲ سه چاهون به جهت تعیین دانه‌بندی مواد بر اساس تئوری‌های انفجار و همچنین مدل‌سازی‌های فیزیکی انجام گرفته توسط سایر پژوهشگران) در محدوده صفر تا ۳۰ میلی‌متر تعیین شده است.

در این مدل فیزیکی از خرد کردن قلوه‌سنگ‌ها یا قطعات بزرگ سنگ آهن، به‌عنوان ماده معدنی و خرد کردن قلوه‌سنگ و قطعات بزرگ گراول (شن و ماسه شکسته شده)، به‌عنوان سنگ باطله استفاده شده است که شکل تقریباً یکنواخت و گرد، اما زاویه‌دار و با دانه‌بندی‌های مختلف (از صفر تا ۲۵ میلی‌متر) دارد. همچنین با استفاده از تفاوت رنگ سنگ آهن و گراول با یکدیگر، اختلاط و چگونگی تخلیه مشاهده شده است.

جدول ۸ نشان داده و منحنی دانه بندی آن در شکل ۱۰ آورده شده است. سنگ باطله خرد شده دارای چگالی ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، چگالی سنگ باطله برجا ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد فضای خالی آن ۴۸ درصد است.



شکل ۹- باطله استفاده شده در مدل فیزیکی

جدول ۸- دانه بندی ذرات باطله در مدل فیزیکی

ابعاد چشمه (میلی متر)	وزن مانده (گرم)	درصد مانده	درصد تجمعی عبوری
۲۲/۴	۳۸	۱/۴۵	۹۸/۵۵
۱۶	۵۵۰	۲۰/۹۸	۷۷/۵۷
۱۱/۲	۶۱۶	۲۳/۵	۵۴/۰۶
۸	۳۸۰	۱۴/۵	۳۹/۵۷
۶/۳	۲۶۰	۹/۹۲	۲۹/۶۵
۴/۷۵	۲۹۲	۱۱/۱۴	۱۸/۵
۳/۳۵	۱۷۵	۶/۶۸	۱۱/۸۳
۲/۳۶	۱۰۸	۴/۱۲	۷/۷۱
۱/۷	۱۰۲	۳/۸۹	۳/۸۲

#### ۵-۴- آماده سازی مدل فیزیکی برای انجام آزمایش

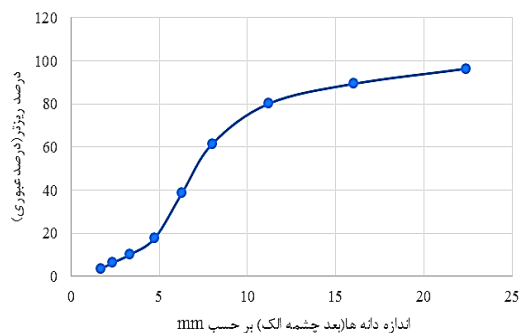
پس از تهیه سازه و مواد مورد نیاز برای آزمایش، مدل فیزیکی به صورتی که در شکل ۱۱ آماده شد. همان طور که مشاهده می شود مدل در ابتدا با استفاده از جداکننده، ماده معدنی و باطله را به صورت دو ستون مجزا در کنار هم قرار داده است. علاوه بر این دهانه بیرون کشی با استفاده از یک سینی متحرک قابل تنظیم است.



شکل ۷- ماده معدنی استفاده شده در مدل فیزیکی

جدول ۷- دانه بندی ذرات ماده معدنی در مدل فیزیکی

ابعاد چشمه (میلی متر)	وزن مانده (گرم)	درصد مانده	درصد تجمعی عبوری
۲۲/۴	۹۰	۳/۵۷	۹۶/۴۳
۱۶	۱۷۸	۷/۰۵	۸۹/۳۸
۱۱/۲	۲۳۲	۹/۱۹	۸۰/۱۹
۸	۴۷۲	۱۸/۷	۶۱/۴۹
۶/۳	۵۷۲	۲۲/۶۶	۳۸/۸۳
۴/۷۵	۵۳۰	۲۱	۱۷/۸۳
۳/۳۵	۱۹۲	۷/۶۱	۱۰/۲۲
۲/۳۶	۹۸	۳/۸۸	۶/۳۴
۱/۷	۷۰	۲/۷۷	۳/۵۷



شکل ۸- منحنی توزیع تجمعی دانه بندی ماده معدنی در مدل فیزیکی

#### ۵-۳-۲- باطله

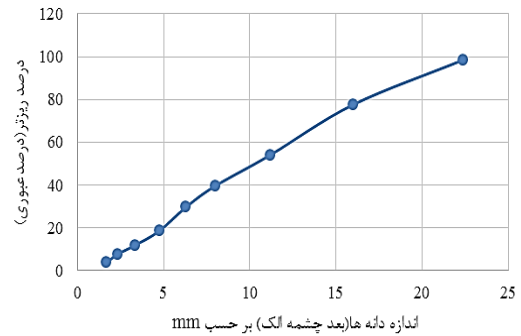
دانه بندی سنگ باطله مورد استفاده در محدوده صفر تا ۲۵ میلی متر (شکل ۹) است، که داده های توزیع تجمعی آن در

در ابتدای امر، با آزادسازی باطله و ماده معدنی، دو پارامتر بسیار مهم در مبحث جریان ثقلی به دست می‌آید. این دو عبارت‌اند از زاویه قرار مواد خرد شده و عمق برداشت که هر دو بر عملیات استخراج و انتخاب تجهیزات استخراجی اثرگذار هستند. مقادیر مربوط به زاویه قرار و عمق برداشت در سه مرحله تکرار در جدول ۹ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۱۲، مشاهده می‌شود، مواد پس از رهاسازی تحت یک زاویه قرار گرفته و جریان متوقف شده است که به آن زاویه قرار گفته می‌شود.

میانگین زاویه قرار به دست آمده برای ماده معدنی و باطله به ترتیب برابر با ۴۳ و ۳۸ درجه و واریانس زاویه قرار برای ماده معدنی و باطله به ترتیب برابر با ۲/۱۶ و ۲/۹۴ درجه است. مقادیر گفته شده در منابع و برای معادن مختلف برای ماده معدنی و باطله به ترتیب در بازه‌های ۳۸ تا ۴۰ و ۴۵ تا ۵۰ درجه است. اندک اختلاف موجود بین مقادیر ثبت شده و مقادیر برجا را می‌توان به دلیل اصطکاک کمتر بین مواد در حالت برجا و آزمایشگاهی نسبت داد.

عمق برداشت نیز در این مرحله محاسبه شده است. با بررسی انجام شده (شکل ۱۳)، ماده معدنی و باطله به ترتیب به صورت میانگین برابر با ۳۷/۳۳ و ۲۶/۶۷ سانتی‌متر و با انحراف معیار به ترتیب ۱/۷ و ۲/۶۲ سانتی‌متر به داخل راهرو وارد شده است. بنابراین برای رسیدن به ادامه جریان ماده معدنی لازم است تا این اختلاف برداشته شود. بنابراین عمق برداشت با محاسبه اختلاف دو مقدار میانگین ماده معدنی و باطله برابر با ۱۰/۶۷ سانتی‌متر (تقریباً ۱۱ سانتی‌متر) به دست می‌آید.

چون برداشت از این نقطه به بعد باعث شروع دوباره جریان سنگ می‌شود. به این مقدار، عمق برداشت گویند. برداشت بیشتر از این مقدار ممکن است برای ماشین‌های بارگیری مشکل آفرین باشد و باید با کنترل برداشت گردد تا مواد تخریب‌شده بار دیگر به داخل تونل وارد و بارگیری انجام شود. برداشت تا زمانی که در بار برداشت شده، اختلاط از حد بحرانی بیشتر شده و صرفه اقتصادی نداشته باشد، ادامه می‌یابد و پس از آن تخریب حلقه بعدی شروع می‌شود. روند تخلیه شدن مواد تخریب‌شده در مدل فیزیکی در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- منحنی توزیع تجمعی دانه‌بندی باطله در مدل فیزیکی



شکل ۱۱- مدل فیزیکی پر شده با ماده معدنی و باطله دانه‌بندی شده

## ۶- انجام آزمایش و نتایج آن

مدل‌سازی جریان ثقلی مواد بر اساس فرایندهای توصیه‌شده در پژوهش‌های گذشته انجام گرفت. با توجه به دشواری‌هایی از جمله حجم بالای مواد، آماده‌سازی مدل، انجام آزمایش استاندارد و اختلاط مواد حین مدل‌سازی که در روند مدل‌سازی وجود دارد، فرایند مدل‌سازی در ۳ مرتبه تکرار شد.

جدول ۹- مقادیر زاویه قرار و عمق برداشت ماده معدنی و باطله

ورود به تونل		زاویه قرار		
باطله	ماده معدنی	باطله	ماده معدنی	
۲۳	۳۵	۴۱	۴۶	۱
۲۹	۳۸	۳۴	۴۲	۲
۲۸	۳۹	۳۹	۴۱	۳
۲۶/۶۷	۳۷/۳۳	۳۸	۴۳	میانگین
۲/۶۲	۱/۷	۲/۹۴	۲/۱۶	انحراف معیار



شکل ۱۳- میزان ورود مواد به تونل و تعیین عمق برداشت

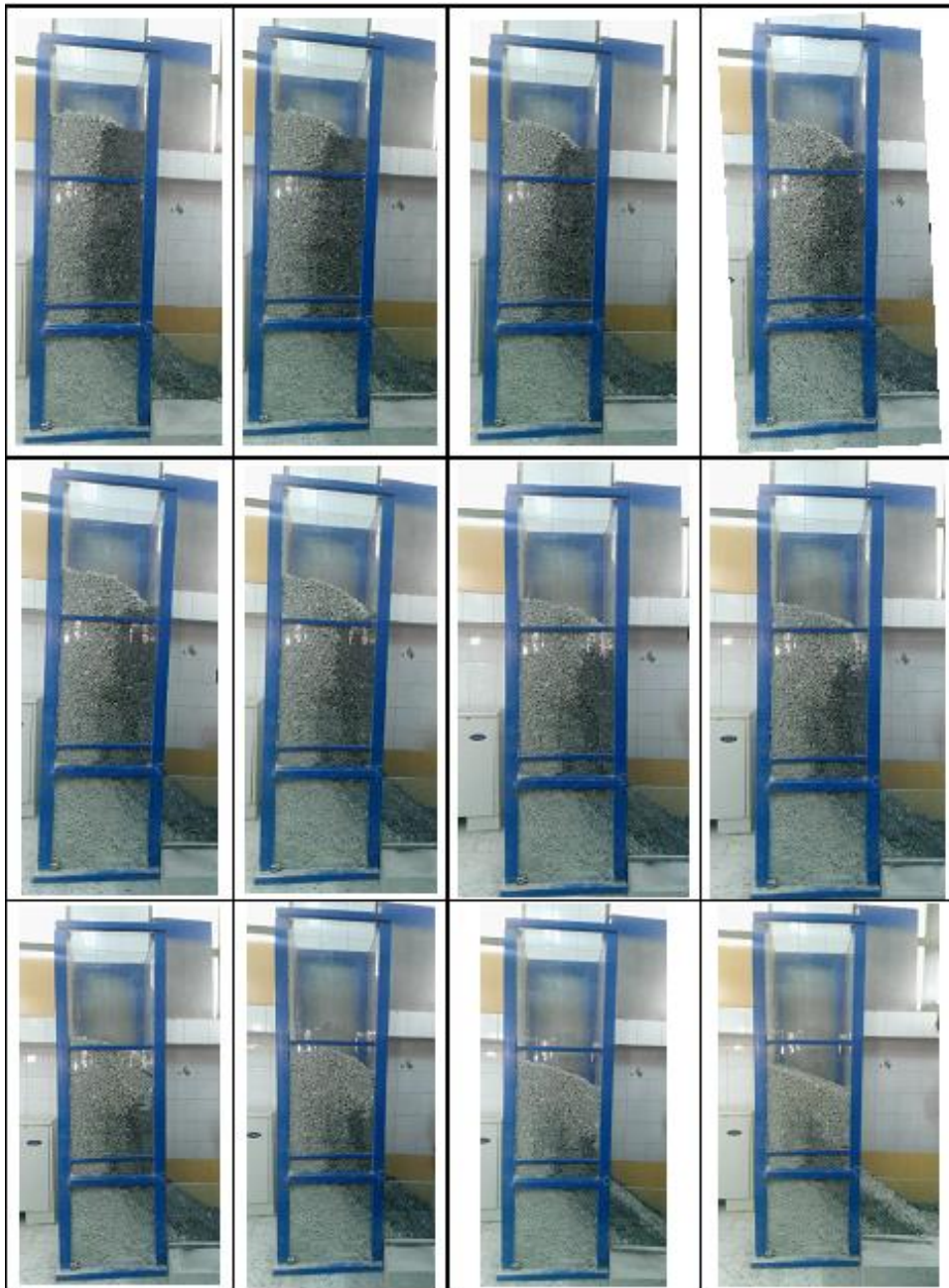


شکل ۱۴- رهاسازی اولیه و محاسبه زاویه قرار مواد

#### ۶-۱- اختلاط و بازیابی

در مدل فیزیکی چون خردشدگی و تورم یکنواخت است، تخلیه نیز بر خلاف واقعیت که به عوامل مختلفی بستگی دارد و جریان غیریکنواخت است، یکنواخت صورت می‌پذیرد. در این مدل فیزیکی ۰/۱۰۵ مترمکعب ماده معدنی خردشده (۲۰۶/۳ کیلوگرم) وجود دارد که با تخلیه و جریان یافتن مواد، ۰/۰۵ مترمکعب (۹۸/۲۵ کیلوگرم) از آن بدون اختلاط، ۰/۰۱ مترمکعب (۱۹/۶۵ کیلوگرم) آن با اختلاط بیش از ۶ درصد و ۰/۰۱ مترمکعب (۱۹/۶۵ کیلوگرم) آن نیز با اختلاط بیش از ۳۵ درصد، برداشت شد.

در این مطالعه از مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج پیشین، به منظور ارزیابی صحت مدل‌سازی فیزیکی استفاده شده است. بر اساس مطالعات پیشین، شکل جریان مطابقت بسیار خوبی با مدل جریان ثقلی ارائه شده در مطالعات کوپیل و پس از او دارد. از طرفی همانطور که گفته شد، زاویه قرار ماده معدنی و باطله نیز در محدوده تعریف شده در واقعیت قرار دارد. در ادامه به بررسی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی پرداخته شده است.



شکل ۱۴- روند تخلیه مواد تخریب شده در مدل فیزیکی

معدنی، اختلاطی ایجاد نشد اما در صورتی که دانه بندی ماده معدنی و باطله متفاوت باشد، باید حلقه انفجاری به صورت شیب دار باشد. موارد ذکر شده با استفاده از نرم افزار *Digimizer* انجام شده است که در شکل ۱۵، نشان داده شده است.

مابقی ماده معدنی یعنی بیش از ۰/۳۷ مترمکعب (۷۶/۸ گیلوگرم) نیز در باطله باقی ماند و تخلیه نشد. بازیابی (مقدار ماده معدنی تخلیه شده به تخریب شده) ۶۳ درصد است. به نظر می رسد دلیل پایین بودن بازیابی، شیب دار نبودن حلقه انفجاری در مدل فیزیکی باشد. علاوه بر این در این مدل به دلیل هم اندازه بودن دانه بندی باطله و ماده

سایر مطالعات از جمله کوپیل است (شکل ۱۷-ب) که مدل بیضی جریان را تصدیق می کند.

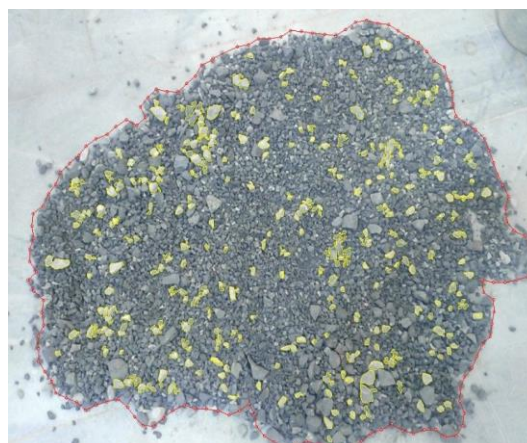


شکل ۱۶- تأثیر عمق برداشت بر تغییر ضخامت دهانه و تأثیر آن بر جریان

### ۷- مدل سازی عددی

به منظور تکمیل مطالعات و بر اساس مشکلاتی که در مدل سازی فیزیکی در زمان اجرا وجود دارد، مدل سازی عددی قابلیت جریان مواد با استفاده از روش المان مجزا و با استفاده از نرم افزار *PFC3D* انجام شد.

در این نرم افزار نیاز است رفتار برخورد و جریان تعدادی ذره شبیه سازی شده با برخورد و جریان مدل سازی فیزیکی انجام شده مطابقت داده شود. این نوع مدل سازی یک فرایند سعی و خطا است، چون هیچ تئوری کاملی که بتواند رفتار ماکروسکوپی را از روی خصوصیات ماکروسکوپی و هندسه پیش بینی کند، وجود ندارد. با این وجود،



شکل ۱۵- به دست آوردن اختلاط با پردازش تصویر و نسبت مساحتها با نرم افزار *Digimizer*

برای ارزیابی شرایط مساعد جریان ثقلی، یک کلاسه بندی توسط کوپیل (*Hartman & Britton, 1992*) انجام شده است که در آن با فرض گرفتن کل مواد استخراجی برابر با ۱۱۰ درصد (باطله و ماده معدنی)، ۴۸ درصد مواد در کلاس خوب و ۲۰ درصد در کلاس قابل قبول قرار گرفته است.

### ۶-۲- عمق و ضخامت برداشت

همانطور که گفته شد، عمق برداشت برابر با ۱۱ سانتی متر به دست آمد. چگونگی جریان ثقلی علاوه بر موارد مختلف گفته شده به عمق و ضخامت جریان وابسته است. بعد از تخریب بارسنگ مورد نظر و جریان یافتن مواد تخریبی به داخل تونل، عمق برداشت، ضخامت دهانه را تعیین کرده، به این صورت که هر چقدر برداشت افزایش یابد ضخامت جریان افزایش می یابد و در نتیجه مواد تخریبی بیشتری در بیضی حرکت قرار می گیرد (شکل ۱۶).

برداشت باید طوری باشد که نه زیاد برداشت شود که از ضخامت بارسنگ تعیین شده بیشتر شود و نه کمتر از آن که باعث گیر افتادن ماده معدنی تخریب شده در باطله شود. همچنین برداشت ماده معدنی غیر یکنواخت از عرض تونل، باعث باقی ماندن ماده معدنی در باطله شد.

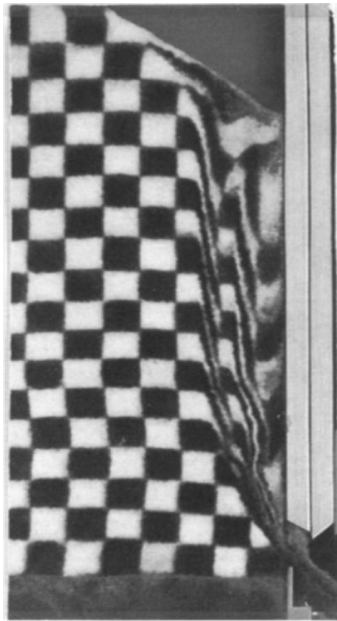
### ۶-۳- شکل جریان ثقلی

شکل مواد جریان یافته در مدل فیزیکی ساخته شده تقریباً یک بیضی به حالت قائم است که از وسط نصف شده باشد (شکل ۱۷-الف). این شکل مشابه با مدل های ساخته شده

وجود دارد، اندازه ذرات، چگالی دانه‌ها و هندسه مدل است و همان‌طور که گفته شد می‌توان با تغییر اطلاعات میکروسکوپی مانند اصطکاک دانه‌ها با یکدیگر و اصطکاک دیوارهای مدل با دانه‌ها و سختی برشی و نرمال دانه‌ها و دیوارها، به جریانی مشابه جریان مدل فیزیکی ساخته شده رسید.

دستورالعمل‌های داده‌شده به فرایند تطبیق کمک کرد. باید با تغییر پارامترهای میکروسکوپی در مدل‌سازی عددی به رفتاری مشابه با رفتار مدل فیزیکی رسید.

عواملی ماکروسکوپی که در مدل‌سازی فیزیکی اعمال شده است را باید دقیقاً در مدل‌سازی عددی به کار گرفت. از جمله این عوامل که قابلیت استفاده در نرم‌افزار برای آن



ب) شکل مدل جریان در نتایج کوپیل



الف) شکل مدل جریان در مدل‌سازی فیزیکی

شکل ۱۷- مقایسه مدل استاندارد کوپیل و مدل فیزیکی اجرا شده

جدول ۱۰- هندسه مدل عددی

مقدار	پارامتر
۴۱	عرض راهرو (سانتی‌متر)
۱۱۳/۵	ارتفاع حلقه انفجاری (سانتی‌متر)
۲۰	ضخامت بارسنگ (سانتی‌متر)
۳۵	ارتفاع راهرو (سانتی‌متر)

سایر ویژگی‌های مربوط به دانه‌های مدل به تفکیک ماده معدنی و باطله به ترتیب در جدول ۱۱ و جدول ۱۲ ارائه شده است.

#### ۷-۱- هندسه و ویژگی‌های میکروسکوپی مدل

همان‌طور که در بالا اشاره شد، مدل‌سازی عددی بر اساس مدل‌سازی فیزیکی انجام گرفت. به این منظور هندسه مدل عددی مشابه با مدل فیزیکی ایجاد شد. ابعاد هندسه مدل در جدول ۱۰ ارائه شده است (شکل ۱۸).

مطابق با شکل ۱۸، ابتدا مدل با ۱۲ دهانه و مشابه ابعاد مدل فیزیکی ساخته شده است. پس از آن در ناحیه بالای دهانه شماره ۱، ماده معدنی با دانه‌بندی مشابه مدل فیزیکی (صفر تا ۲۵ میلی‌متر)، چگالی ۳۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سمت چپ دهانه شماره ۱ با سنگ باطله، با دانه‌بندی مشابه مدل فیزیکی و چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب پر شده است (شکل ۱۹).



جدول ۱۱- ویژگی‌های دانه‌های ماده معدنی در مدل‌سازی

مقدار	پارامتر عددی
۰/۳	اصطکاک بین دانه‌ها و بین دیوارها و دانه‌ها (friction)
۳۷۰۰	چگالی دانه‌ها (Density) (کیلوگرم بر مترمکعب)
۱۵۸	سختی نرمال (Kn) و سختی برشی (Ks) بین دانه‌ها
۱۵۸	سختی نرمال (Kn) و سختی برشی (Ks) بین دانه‌ها و دیوارها
۲۷۰۰	تعداد دانه‌ها
۱/۲۸	افزایش شعاع دانه‌ها

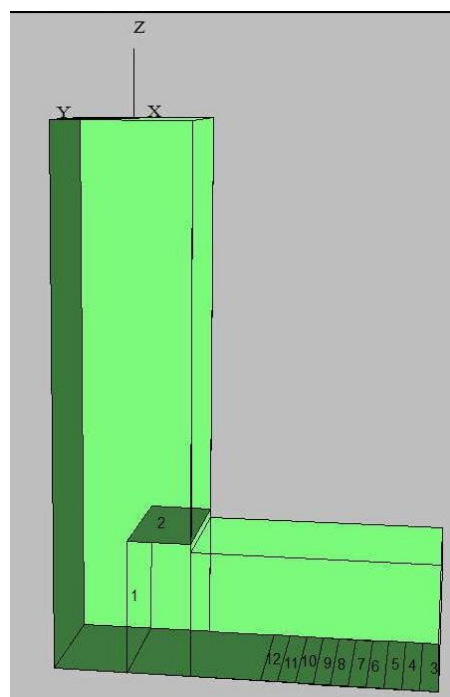
جدول ۱۲- ویژگی‌های دانه‌های باطله در مدل‌سازی عددی

مقدار	پارامتر
۰/۲۶	اصطکاک بین دانه‌ها و بین دیوارها و دانه‌ها (friction)
۲۷۰۰	چگالی دانه‌ها (Density) (کیلوگرم بر مترمکعب)
۱۵۸	سختی نرمال (Kn) و سختی برشی (Ks) بین دانه‌ها
۱۵۸	سختی نرمال (Kn) و سختی برشی (Ks) بین دانه‌ها و دیوارها
۳۴۰۰	تعداد دانه‌ها
۱/۲۸	افزایش شعاع دانه‌ها

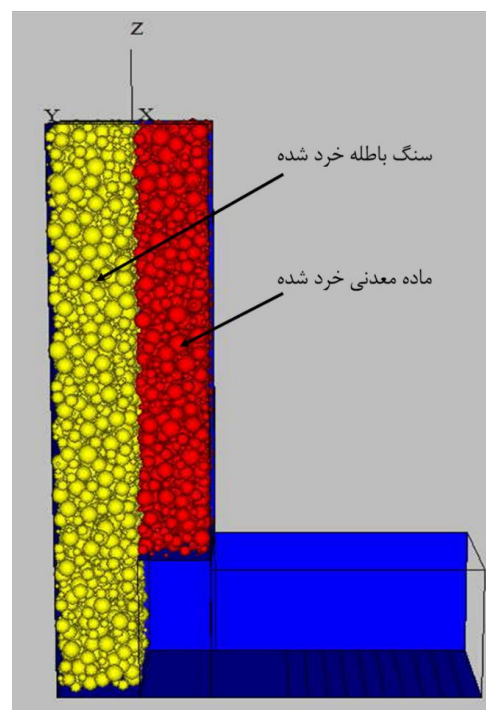
### ۷-۲- اجرای مدل عددی

پس از ساخت مدل و اعمال خواص میکروسکوپی، به مدل اجازه داده شد چند سیکل را بگذراند تا ذرات بر روی هم نشسته و مدل به تعادل برسد و همچنین نیروی گرانش به درستی بر هر ذره وارد شود. به دلیل اینکه در روش تخریب در طبقات فرعی، باطله قبل از اینکه ماده معدنی آتشفشانی شود، تخریب شده و به داخل راهرو جریان یافته است پس در اینجا نیز باید ابتدا دهانه شماره ۱ باز شده تا باطله به داخل راهرو وارد شود (شکل ۲۰).

برای تطبیق و کالیبره کردن مدل عددی با مدل فیزیکی باید با سعی و خطا اطلاعات میکروسکوپی باطله را تغییر داد تا زاویه قرار باطله در مدل عددی مانند زاویه قرار مدل فیزیکی در آزمایشگاه شود. بعد از اینکه باطله به راهرو وارد شد، نوبت جریان ماده معدنی آتشفشانی شده به اندازه یک حلقه است. پس دهانه شماره ۲ باز می‌شود تا ماده



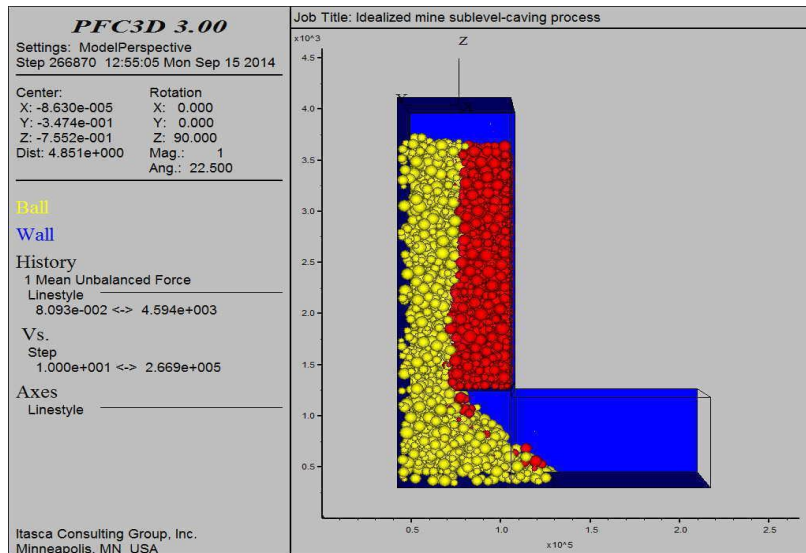
شکل ۱۸- هندسه مدل‌سازی عددی در روش تخریب طبقات فرعی



شکل ۱۹- جایگاه ماده معدنی و باطله در مدل‌سازی عددی

دانه‌های باطله نیز شروع به حرکت افقی کرده و بیش از اندازه به داخل راهرو وارد می‌شوند. برای حل این مشکل، سختی برشی و نرمال دانه‌ها افزایش داده شد تا دانه‌ها با مقاومت بیشتری در کنار یکدیگر قرار گرفته و شروع لغزش آن‌ها مستلزم نیروی بیشتر و صرف زمان طولانی‌تر باشد.

معدنی خردشده نیز جریان یافته و وارد راهرو شود. به دلیل اینکه در مدل‌سازی عددی تنها دانه‌ها به صورت کروی ایجاد می‌شود، بر خلاف دانه‌های زاویه دار که در زیر بار در هم قفل می‌شوند، دانه‌های کروی به یکدیگر نیروی افقی نیز وارد می‌کنند و وقتی ماده معدنی شروع بر حرکت می‌کند



شکل ۲۰- ورود باطله به راهرو قبل از تخریب ماده معدنی

- عمق برداشت ماده معدنی برابر با ۱۱ سانتی متر به دست آمد.
- بازیابی ماده معدنی برابر با ۶۳ درصد محاسبه شد.
- به صورت کلی و بر اساس طبقه‌بندی کوپیل، ۴۸ درصد مواد در کلاس خوب و ۲۰ درصد در کلاس قابل قبول قرار دارد.
- شکل جریان ثقلی به دست آمده مطابقت و مشابهت بسیار خوبی با مدل‌های مرسوم جریان ثقلی دارد. با توجه به نتایج به دست آمده، مدل فیزیکی طراحی شده این امکان را می‌دهد که بتوان به صورت تجربی شرایط جریان ثقلی را مورد بررسی قرار داد. همچنین با توجه به مشکلاتی که در مدل‌سازی فیزیکی وجود دارد، مدل عددی آن با روش المان مجزا انجام گرفت که با اعتبارسنجی انجام شده می‌توان فارغ از مشکلات اجرایی مدل فیزیکی، مدل‌سازی را برای هر مورد مطالعاتی دیگر به کار بست.

## ۸- نتیجه‌گیری

به کارگیری روش‌های تخریبی زیرزمینی مستلزم بررسی قابلیت‌های مختلف توده‌سنگ همچون قابلیت جریان است. این قابلیت می‌تواند میزان اختلاط و بازیابی و در نتیجه تولید ماده معدنی را تحت تأثیر قرار دهد. از این رو مبحث جریان ثقلی توسط پژوهشگران مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعات به روش‌های مختلف از جمله مدل‌سازی ریاضی، عددی و فیزیکی انجام شده است. در این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی قابلیت جریان مواد در آنومالی شماره ۱۲ سه چاهون بررسی شد. با بررسی ابعاد معادن مختلف و استفاده از نسبت ۱۰:۱، مدل فیزیکی با مشخصات جدول ۶ تعیین و ساخته شد. در این مدل از سنگ آهن و باطله دانه‌بندی شده برای تعیین قابلیت جریان استفاده شد. نتایج مدل‌سازی فیزیکی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- زاویه قرار ماده معدنی و باطله به ترتیب برابر با ۴۳ و ۳۸ درجه به دست آمد.

## ۹- مراجع

- Alfaro, M., & Saavedra, J. (2004). *Predictive models for gravitational flow. Paper presented at the 4th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Santiago, Chile: Instituto de Ingenieros de Chile.*
- Alford, C. G. (1978). *Computer simulation models for the gravity flow of ore in sublevel caving.*
- Baiden, G. R., Bissiri, Y., & Saari, A. V. (2008). *Real time sensing of rock flow in a block cave mine. Paper presented at the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Luleå, Sweden: Luleå University of Technology.*
- Baxter, G. W., & Behringer, R. P. (1990). *Cellular automata models of granular flow. Physical Review A, 42 (2), 1017-1020. doi: 10.1103/PhysRevA.42.1017*
- Brunton, I. (2009). *The impact of blasting on sublevel caving flow behaviour and recovery. Ph. D. Thesis, University of Queensland, Brisbane, Australia.*
- Brunton, I., Fraser, S., Hodgkinson, J., & Stewart, P. (2010). *Parameters influencing full scale sublevel caving material recovery at the Ridgeway gold mine. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47 (4), 647-656.*
- Castro, R., Arancibia, L., Guzman, D., & Henriquez, J. P. (2018). *Experiments and simulation of gravity flow in block caving through FlowSim. Paper presented at the Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Vancouver. [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815\\_21\\_Castro/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815_21_Castro/)*
- Castro, R., Gonzalez, F., & Arancibia, E. (2009). *Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 109 (7), 393-400.*
- Castro, R., Tamburrino, A., & Fernandez, F. (2010). *Development of the kinematic model to rapidly simulate the flow of caved rock for block caving. Paper presented at the Proceedings of the Second International Symposium on Block and Sublevel Caving, Perth. [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1002\\_40\\_Castro/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1002_40_Castro/)*
- Castro, R., Trueman, R., & Halim, A. (2007). *A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44 (6), 860-870.*
- Castro, R., & Whiten, W. (2007). *A new cellular automaton to model gravity flow in block caving based on physical modelling observations.*
- Castro, R. L., Gonzalez, F., & Arancibia, E. (2009). *Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 109, 393-400.*
- Castro, R. L., Vargas, R., & de la Huerta, F. (2012). *Determination of drawpoint spacing in panel caving: a case study at the El Teniente Mine. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 112, 871-876.*
- Chen, G. (1997). *Stochastic modeling of rock fragment flow under gravity. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34 (2), 323-331.*

- Chen, Q., Qin, S., & Chen, Q. (2019). Numerical Simulation of Ore Particle Flow Behaviour through a Single Drawpoint under the Influence of a Flexible Barrier. *Geofluids*, 2019, 11. doi: 10.1155/2019/6127174
- Cullum, A. (1974). *The Effects of Confined Blasting on Rock Fragmentation and Flow Characteristics in Sub Level Caving*. University of Queensland.
- Darling, P. (2011). *SME mining engineering handbook (Vol. 1): SME*.
- DeGagne, D. (2005). *The Influence of Blasting Fragmentation on Ore Recovery in Sublevel Cave Mines. Paper presented at the Alaska Rocks 2005, The 40th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*.
- Free, G. D. (1970). *Mathematical and model studies of the flow of material in the sublevel caving mining method: University of Queensland*.
- Gibson, W. (2014). *Stochastic Models for Gravity Flow: Numerical Considerations. Paper presented at the Caving 2014, Santiago, Chile*.
- Gustafsson, P. (1998). *Waste rock content variations during gravity flow in sublevel caving: Analysis of full-scale experiments and numerical simulations. Luleå tekniska universitet*.
- Halim, A., Trueman, R., & Castro, R. (2008). Quantifying effect of concurrent draw on extraction zones in block caving mines using large scale 3D physical model. *Mining Technology*, 117 (3), 128-135. doi: 10.1179/037178409X405723
- Hancock, W. R., Weatherley, D. K., & Chitombo, G. P. (2010). Large-scale simulations of gravity flow in block caving. Paper presented at the Proceedings of the Second International Symposium on Block and Sublevel Caving, Perth. [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1002\\_38\\_Hancock/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1002_38_Hancock/)
- Hartman, H. L., & Britton, S. G. (1992). *SME mining engineering handbook (Vol. 2): Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Denver*.
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introductory mining engineering: John Wiley & Sons*.
- Hustrulid, A. I. (1998). *A computational methodology for modeling large scale sublevel caving with a three-dimensional discrete element method*.
- Hustrulid, W., & Kvapil, R. (2008). *Sublevel caving—past and future. Paper presented at the Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining*.
- Itasca, P. D. (2008). *Particle Flow Code in 3 Dimensions, User's Guide*.
- Jabinpour, A., Yarahmadi Bafghi, A., & Gholamnejad, J. (2018). Geostatistical modelling of rock mass cavability based on laubscher approach in Sechahoon Mine. *Journal of Research-Papers Mineral Resources Engineering*, 3 (2), 53-69. doi: 10.30479/jmre.2018.1447
- Janelid, I. (1972). *Study of the gravity flow process in sublevel caving. Paper presented at the Proceedings of the International Sublevel Caving Symposium, Stockholm, Sweden*.
- Jolley, D. (1968). *Computer simulation of movement of ore and waste in an underground mining pillar. Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 61 (675), 854-&

- Just, G. (1981). *The significance of material flow in mine design and production. Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines*, 715-728.
- Just, G., & Free, G. (1971). *The gravity flow of material in the sublevel caving mining system. Paper presented at the Proceedings 1st Australia–New Zealand conference on geomechanics, Melbourne.*
- Kasmaee, S., & Torab, F. (2014). *Risk reduction in Sechahun iron ore deposit by geological boundary modification using multiple indicator Kriging. Journal of Central South University*, 21 (5), 2011-2017.
- Khodayari, F., Pourrahimian, Y., & Ben-Awuah, E. (2018). *Application of mathematical modelling for draw control under material flow uncertainty. Paper presented at the Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Vancouver.* [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815\\_64\\_Khodayari/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815_64_Khodayari/)
- Kuchta, M. E. (2002). *A revised form of the Bergmark-Roos equation for describing the gravity flow of broken rock. Mineral Resources Engineering*, 11 (04), 349-360.
- Kvapil, R. (1965a). *Gravity flow of granular materials in hoppers and bins. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 2 (1), 25-41. doi: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(65\)90020-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(65)90020-3)
- Kvapil, R. (1965b). *Gravity flow of granular materials in Hoppers and bins in mines—II. Coarse material. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 2 (3), 277-292. doi: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(65\)90029-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(65)90029-X)
- Kvapil, R. (2008). *Gravity flow in sublevel and panel caving: a common sense approach: Luleå University of Technology.*
- Lapčević, V., & Torbica, S. (2017). *Numerical Investigation of Caved Rock Mass Friction and Fragmentation Change Influence on Gravity Flow Formation in Sublevel Caving. Minerals*, 7 (4), 56.
- Madankav. (2008). *Report of exproation of Sechahoon Anomaly XII iron ore deposit IMPASCO.*
- McCormick, R. (1968). *How wide does a drawpoint draw. Engineering and mining journal*, 169 (6), 106-116.
- Minchinton, A., & Dare-Bryan, P. (2005). *The application of computer modelling for blasting and flow in sublevel caving operations. Paper presented at the Proceedings of the 9th AusIMM Underground Operators' Conference, Perth, Australia.*
- Mullins, W. (1972). *Stochastic theory of particle flow under gravity. Journal of Applied Physics*, 43 (2), 665-678.
- Panczakiewicz, T. (1977). *Optimization of the sublevel caving mining method investigated by physical models: University of Melbourne, Department of Mining.*
- Peters, D. C. (1984). *Physical modelling of the draw behaviour of broken rock in caving. Colorado School of Mines Quarterly*, 79 (1), 1-60.

- Pierce, M., Cundall, P., Van Hout, G., & Lorig, L. (2002). *PFC 3D modeling of caved rock under draw. Paper presented at the Proceedings of the 1st International PFC Symposium on Block and Sublevel Caving. Gelsenkirchen.*
- Power, G. R. (2004). *Modelling granular flow in caving mines: large scale physical modelling and full scale experiments.*
- Rustan, A. (2000). *Gravity flow of broken rock: What is known and unknown. Paper presented at the International Conference & Exhibition on Mass Mining: 29/10/2000-02/11/2000.*
- Saadat, H. (2014). *Analysis of gravity flowability of caved material in sublevel caving method. (Master Thesis), Yazd University.*
- Sánchez, V., Castro, R. L., & Palma, S. (2019). *Gravity flow characterization of fine granular material for Block Caving. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 114, 24-32.*
- Selldén, H., & Pierce, M. (2004). *PFC3D modelling of flow behaviour in sublevel caving. MassMin 2004—Proceedings, 22-25.*
- Sharrock, G., Beck, D., Booth, G., & Sandy, M. (2004). *Simulating gravity flow in sub-level caving with cellular automata. Proceedings of MassMin, 189.*
- Stazhevskii, S. (1996). *Features of flow of broken rock in extraction of ores with sublevel caving. Journal of mining science, 32 (5), 403-416.*
- Sun, H., Jin, A., Gao, Y., Zhou, Y., & Yang, Z. (2015). *Flow characteristics of caved ore and rock under complex boundary conditions. J Cent South Univ (Sci Technol), 46 (10), 3782-3788.*
- Talu, S., van As, A., Henry, R., Hilton, J., & Whiteman, D. S. (2010). *Installing Smart Markers to monitor Lift 2 North extension ore flow behaviour. Paper presented at the Proceedings of the Second International Symposium on Block and Sublevel Caving, Perth. [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1002\\_43\\_Talu2/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1002_43_Talu2/)*
- Trueman, R., Castro, R., & Halim, A. (2008). *Study of multiple draw-zone interaction in block caving mines by means of a large 3D physical model. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45 (7), 1044-1051.*
- Verdugo, R., & Ubilla, J. (2004). *Geotechnical analysis of gravity flow during block caving. Proceedings of MassMin, 195.*
- Whiteman, D. S. (2010). *The Smart Marker System — a new tool for measuring underground orebody flow in block and sublevel mines. Paper presented at the Proceedings of the Second International Symposium on Block and Sublevel Caving, Perth. [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1002\\_42\\_Whiteman/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1002_42_Whiteman/)*
- Wimmer, M. (2010). *Gravity Flow of Broken Rock in Sublevel Caving (SLC): State-of-the-art: Swedish Blasting Research Centre (Swebrec).*
- Yarahmadi Bafghi, A., & Jabinpour, A. (2018). *Investigation of cavability of rock mass and method selection in Sechahoon Anomaly No. XII: Iran Central Iron Ore Co.*
- Yenge, L. I. (1980). *Analysis of bulk flow of materials under gravity caving process – Part 1: Sublevel*

*caving in relation to flow in bins and bunkers. Colorado School of Mines Quarterly, 75 (4), 1-45.*

*Yenge, L. I. (1981). Analysis of bulk flow of materials under gravity caving process – Part 2: Theoretical and physical modelling of gravity flow of broken rock. Colorado School of Mines Quarterly, 76 (3), 1-67.*

## *Estimation of Gravity Flowability of Ore and Waste in Caved Zone of Anomaly No. XII of Sechahoon Underground Mine*

**A. Jabinpour<sup>1</sup>; S. H. Saadat Mirghadim<sup>2</sup>; A. Yarahmadi Bafghi<sup>3</sup>**

1- PhD Student in Mining Exploitation; Department of Mining and Metallurgy, Yazd University, alireza.jabin@yahoo.com

2- M.Sc. Student in Rock Mechanics; Department of Mining and Metallurgy, Yazd University, h.saadat313@yahoo.com

3- Associate Professor; Department of Mining and Metallurgy, Yazd University, ayarahmadi@yazd.ac.ir

Received: 19 Jun 2019; Accepted: 18 Oct 2019

DOI: 10.22044/tuse.2019.8575.1370

---

### **Keywords**

*Gravity flowability  
Physical modeling  
3D model  
Sublevel caving  
Anomaly No. XII of Sechahoon Mine*

---

### **Extended Abstract**

#### **Summary**

Gravity flow in caving underground mining is a key parameter that affects dilution and ore recovery. In order to have a successful operation in caving mining, it is necessary to evaluate and estimate the gravity flowability of ore and waste. From past to now, several researchers have focused on study of gravity flow by different methods like mathematical, physical and numerical methods. In this study, the gravity flowability of ore and waste in caved zone of Anomaly No. XII of Sechahoon Mine has been estimated by physical modeling. Then, using DEM modeling, a model based on the physical model has been created for use in future studies.

### **Introduction**

In recent studies, sublevel caving method has been selected for mining in Anomaly No. XII of Sechahoon Mine. In sublevel caving method, we encounter with key parameters like cavability, gravity flow, blastability and subsidence. Therefore, gravity flow study is important. Gravity flow has been studied by several researchers from past to now. These studies have been carried out using different methods like mathematical, physical and numerical methods.

### **Methodology and Approaches**

In this study, the physical method was selected for gravity flow modeling. Therefore, a model was designed with a 1:10 scale. In this model, the tunnel width, ring height, burden and tunnel height were considered equal to 50, 150, 20 and 40 cm, respectively. The model was filled by iron ore and waste that have a size distribution between 0 to 25 mm.

### **Results and Conclusions**

The physical modeling results shows that:

- Recovery of iron ore is equal to 63 percent.
- The angle of repose of iron ore and waste are 43 and 38 degrees, respectively.
- The shape of gravity flow is similar to the model that presents the validity of model.
- Digging depth is equal to 11 cm.
- Based on Kvapil suggestion, 48 percent of ore was classified as class A and 20 percent as class B.

By using the results of physical modeling, a numerical model has been created and validated by physical modeling results. This model is used for future gravity flow studies.

---