

## اثر خصوصیات توده سنگ بر خردایش ناشی از آتشفباری معادن سنگ آهن ایران مرکزی

مجید اکبری<sup>۱</sup>، غلامرضا لشکری پور<sup>۲\*</sup>، علیرضا یاراحمدی بافقی<sup>۳</sup>، محمد غفوری<sup>۲</sup>

پذیرش مقاله: ۹۳/۵/۲۹

دریافت مقاله: ۹۲/۶/۶

### چکیده

خصوصیات توده سنگ یکی از فاکتورهای مهم و مؤثر بر نتایج حاصل از آتشفباری می باشد. در این پژوهش با توجه به اهمیت خردایش بهینه در معدن کاری سعی بر این است تا اثر این خصوصیات بر توزیع اندازه سنگ های خرد شده در معادن مورد مطالعه شامل معادن سنگ آهن چغارت، چادرملو و سه چاهون مورد بررسی قرار گیرد. جهت رسیدن به این هدف خصوصیات توده سنگ در طول حدود ۱۹۶۱ متر خط پیمایش و ۱۷۷۱ متر پروفیل لرزه ای در غالب ۵۱ بلوک انفجاری مورد ارزیابی قرار گرفت. از طرفی جهت اندازه گیری خردایش حاصل از آتشفباری از روش پردازش تصاویر رقومی استفاده شد. بدین منظور با پردازش ۱۵۰۰ تصویر گرفته شده از سطح کپه های انفجاری، توزیع اندازه سنگ های خرد شده بدست آمد. بررسی تغییرات خردایش با توجه به تغییرات خصوصیات توده سنگ نشان داد که با افزایش فاصله داری ناپیوستگی ها، تداوم ناپیوستگی ها، بازشدگی ناپیوستگی ها، افزایش سرعت موج طولی در سنگ بکر، افزایش زبری و مواجی بودن سطح ناپیوستگی ها، افزایش مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر و افزایش عمود بودن ناپیوستگی ها بر سطح آزاد بلوک انفجاری اندازه مصالح حاصل از آتشفباری نیز افزایش می یابد. نتایج این پژوهش بیانگر تأثیر خصوصیات توده سنگ به اندازه مصالح حاصل از آتشفباری می باشد.

کلید واژه ها: توده سنگ، خردایش بهینه، آتشفباری، ناپیوستگی

۱. دانشجوی دکترای دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استاد گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد [lashkaripour@um.ac.ir](mailto:lashkaripour@um.ac.ir)

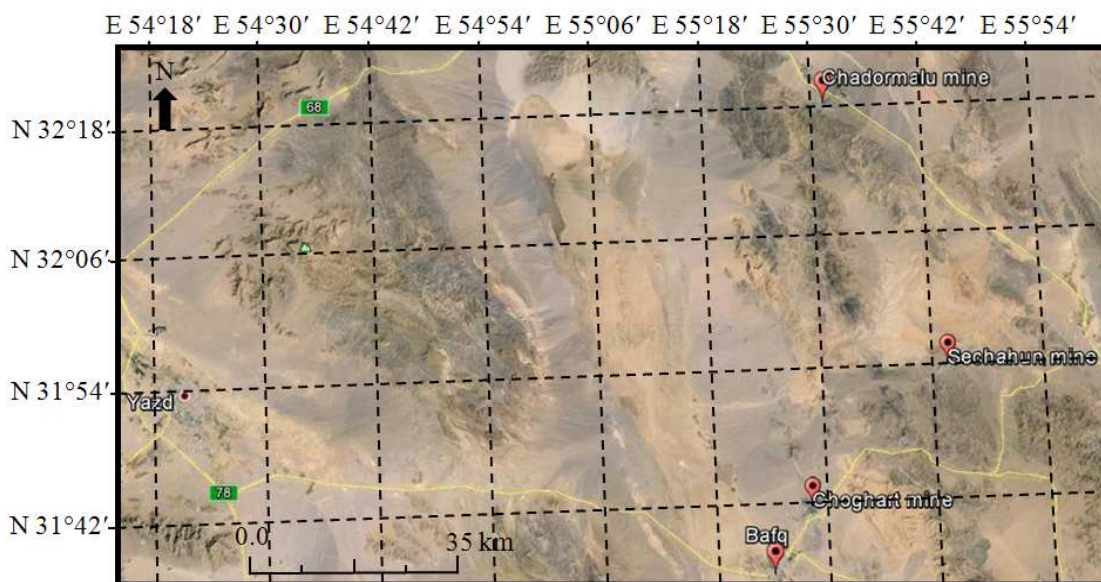
۳. عضو هیأت علمی دانشگاه یزد

\* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

آتشباری یکی از کاربردی‌ترین تکنیک‌های حفاری سنگ در معدن‌کاری می‌باشد. پارامترهای مختلفی بر نتایج عملیات آتشباری تأثیر گذارند که به طور کلی آنها را می‌توان به سه گروه خصوصیات توده‌سنگ، پارامترهای طراحی آتشباری و خصوصیات مواد منفجره تقسیم‌بندی کرد. از این میان خصوصیات توده‌سنگ غیر قابل کنترل بوده و از جمله مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر نتایج آتشباری بشمار می‌آیند. تجربه ثابت کرده است که آتشباری در توده‌سنگ‌هایی با خصوصیات متفاوت در شرایط یکسان بودن طرح آتشباری و مواد منفجره استفاده شده، نتایج متفاوتی را در پی خواهد داشت. برای دست یافتن به خردایش مورد علاقه، خصوصیات توده‌سنگ فاکتور مهمی برای ارزیابی است. ارزیابی این خصوصیات در معادن به دلیل پیچیدگی زیاد شرایط زمین‌شناسی محلی بسیار مشکل می‌باشد (Konya and Walter, 1991; Bhandari, 1997; Latham and Lu, 1999; Azimi et al., 2010). بطور کلی به قابلیت انفجار توده‌سنگ که تحت تأثیر خصوصیات ذاتی ماده سنگ و سیستم

ناپیوستگی‌های آن می‌باشد، قابلیت آتشباری توده‌سنگ می‌گویند (Latham and Lu, 1999). پارامترهای مربوط به طبیعت توده‌سنگ شامل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها هستند. از خصوصیات سنگ بکر می‌توان به مقاومت فشاری و کششی، وزن مخصوص، سختی، الاستیسیته، تغییرشکل‌پذیری، دوام و اندازه دانه‌ها اشاره کرد. این خصوصیات مرتبط با بافت سنگ، پیوندهای داخلی، ترکیب و توزیع کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ هستند. از خصوصیات ناپیوستگی‌ها نیز می‌توان به جهت‌یابی، فاصله‌داری، تداوم، بازشدگی، زبری، خصوصیات مواد پرکننده اشاره کرد. با توجه به مطالعات زیادی که توسط محققان مختلف درباره تأثیر خصوصیات توده‌سنگ و سنگ بکر بر روی عملیات آتشباری انجام شده است، بدیهی است که خصوصیات توده‌سنگی که آتشباری می‌شود تأثیر بسزایی بر عملکرد آتشباری می‌گذارد (Hagan, 1995; Aler et al., 1996; Latham and Lu, 1999; Han et al., 2000; Thornton et al., 2002; Kacar et al., 2003; Kaushik and Phalguni, 2003; Kilic et al., 2009; Azimi et al., 2010).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی معادن مورد مطالعه

کانسار سه چاهون مجموعه سنگ‌های سری مراد است. در محدوده کانسار، سنگ‌های نفوذی عمدتاً شامل دیوریت، گرانیت، گرانوفیر و سینیت هستند. هم‌چنین دایک‌ها با ترکیبات مختلف دارای روندی تقریباً شرقی-غربی و دارای شیب زیاد ( $80^{\circ}$  -  $75^{\circ}$ ) می‌باشند (نقل از شرکت مهندسی کاوشگران، ۱۳۷۸).

کانسار سنگ آهن چادرملو که شامل دو آنومالی شمالی و جنوبی می‌باشد، در اثر وجود شرایط ماگمایی و متاسوماتیکی و فعالیت زیاد تکتونیکی دارای وضعیت زمین‌شناسی پیچیده‌ای است. شکستگی‌های موجود در کانسار اغلب دارای امتداد شمال غربی- جنوب شرقی و شیب بین  $70^{\circ}$  تا  $80^{\circ}$  درجه به طرف شمال شرق هستند. توده معدنی به وسیله دایک‌های گرانیتی و دیوریتی دارای شیبی معادل  $15^{\circ}$  تا  $45^{\circ}$  درجه و ضخامت بین  $1$  تا  $20$  متر متحمل شکستگی شده است. حوزه کانسار در دوره کامبرین شامل سنگ‌های گرانیت گنیس تا بیوتیت گنیس و قسمتی از نوع رخساره‌های آمفیولیتی است و سنگ‌های آن شامل شیست‌ها، کوارتزیت‌ها، آمفیولیت و مرمرها و در دوره اینفراکامبرین شامل سنگ‌های آتشفشانی، دولومیت‌ها و ماسه‌سنگ‌ها می‌باشد.

### ۳. عملیات استخراج در معادن مطالعاتی

عملیات استخراج کانسنگ آهن در معادن مورد مطالعه به روش روباز و پلکانی صورت می‌گیرد (شکل ۲). مراحل استخراج شامل حفاری و آتشیاری می‌باشد. حفاری چال‌ها با دستگاه‌های دورانی و ضربه‌ای در قطرهای مختلف  $165$ ،  $200$  و  $251$  میلی متر انجام می‌شود. عملیات آتشیاری به دو روش استفاده از فتیله انفجاری و سیستم نائل و با استفاده از مواد منفجره آنفو، امولایت و پودر آذر صورت می‌گیرد. در جدول ۱ به برخی از مشخصات مربوط به استخراج در معادن مورد مطالعه اشاره شده است.

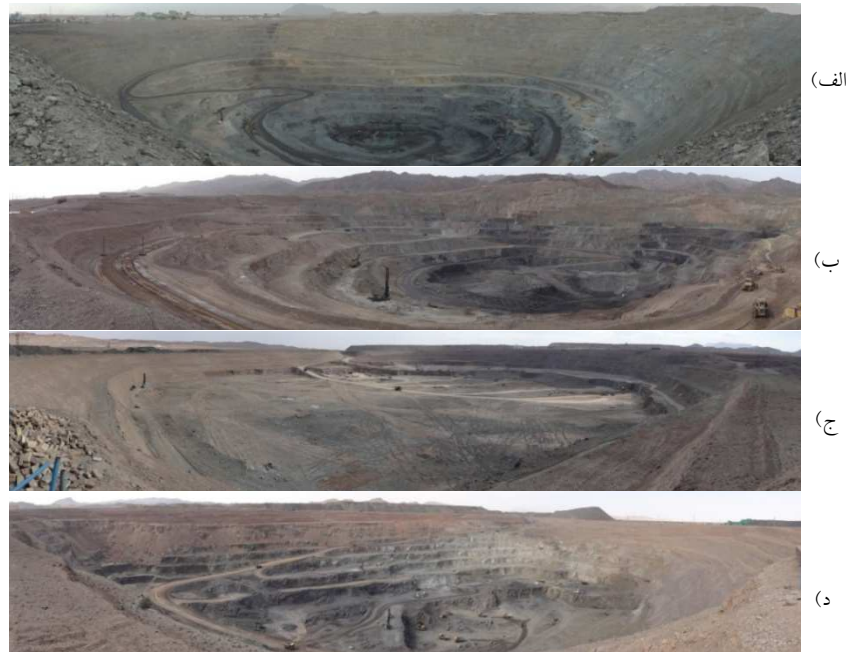
هدف این پژوهش بررسی میزان تأثیر خصوصیات توده‌سنگ بر خردایش حاصل از آتشیاری در معادن سنگ آهن ایران مرکزی می‌باشد. زیرا تاکنون در این معادن مطالعه جامعی در این خصوص انجام نشده است. این مطالعات می‌تواند کمک شایانی به بهینه‌سازی عملیات آتشیاری کند تا با حداقل صرف هزینه بتوان به میزان خردایش مورد علاقه دست یافت. بدین منظور خصوصیات توده‌سنگ با اندازه‌گیری ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها در طول حدود  $1961$  متر خطوط پیمایش و آزمایش نمونه‌های سنگ بکر و اندازه‌گیری سرعت موج طولی در طول  $1771$  متر پروفیل لرزه‌ای برای  $51$  بلوک انفجاری در معادن مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. مناطق مورد مطالعه شامل معادن سنگ آهن چغارت، سه‌چاهونو چادرملو می‌باشد. این معادن در بلوک بافق واقع در کمربند آهن‌خیز انارک - بافق - کرمان قرار دارند. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی مناطق مطالعاتی را نشان داده است.

### ۲. زمین‌شناسی مناطق مطالعاتی

از نقطه نظر زمین‌شناسی کانسار چغارت در سازندهای پرکامبرین ایران مرکزی قرار دارد. این مجموعه تحت تأثیر تغییرات مختلفی نظیر دگرگونی و دگرنهادی قرار گرفته است. سنگ‌های محدوده کانسار عمدتاً شامل گرانیت و کوارتز آلبتوفیر و متاسوماتیت‌ها است. از نقطه نظر زمین‌ساختی در کانسار چغارت سه تیپ عمده از عوامل ساختمانی و گسله شدن عمل نموده که به طور بارز معرف رخداد‌های پان آفریقایی، کیمری و آلپی است. ساختارهای پان آفریقایی را می‌توان عامل اصلی تمرکز کانسنگ و تغییرات حادث در ناحیه دانست که از نوع گسله‌های عمیق بوده و امروزه به صورت روندهای شمالی- جنوبی و شرقی - غربی در تقاطع با یکدیگر و در مقیاس ناحیه‌ای قابل تشخیص است (نقل از شرکت مهندسی کاوشگران، ۱۳۷۰). سنگ‌های دربرگیرنده

جدول ۱. مشخصات معادن مورد مطالعه

نام معدن	ذخیره قابل استخراج (میلیون تن)	ارتفاع پله‌های استخراج (متر)	عرض پله ایمنی (متر)	شیب پله نهایی (درجه)	شیب کلی دیواره (درجه)
چغارت	۱۷۷/۲	۱۰-۱۲/۵	۸-۱۰	۷۰	۳۸-۵۰
چادرملو	۳۲۰	۱۵	۱۰	۶۹/۵	۵۰-۵۵
سه‌چاهون	۱۳۲	۱۰	۱۰	۶۹/۵	۵۵/۱



شکل ۲. نمایی از گودال استخراج معادن الف (چغارت، ب) چادرملو، ج) سه‌چاهون(شمالی)، د) سه‌چاهون(جنوبی)

#### ۴. خصوصیات توده‌سنگ

توده‌سنگ مصالحی کاملاً متفاوت از دیگر مصالح مهندسی می‌باشد که بطور کلی از دو بخش سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها تشکیل یافته است. ناپیوستگی‌ها ساختارهایی نظیر درزه‌ها، گسل‌ها، شکستگی‌ها، صفحات لایه‌بندی و دیگر سطوح ضعف موجود در توده‌سنگ می‌باشند که بر خصوصیات مکانیکی و مهندسی توده‌سنگ مانند تغییرشکل‌پذیری، مقاومت، پایداری، نفوذپذیری تأثیر عمده‌ای می‌گذارند (ISRM, 1978). وجود یک یا چند دسته ناپیوستگی در یک توده‌سنگ در پاسخ به بارگذاری و باربرداری ایجاد ناهمسانگردی می‌کند. همچنین در مقایسه با سنگ بکر، سنگ درزه‌دار نفوذپذیری بالاتر، مقاومت برشی کمتر در طول

صفحات ناپیوستگی، تغییرشکل‌پذیری بیشتر و مقاومت کششی ناچیزی در جهت عمود بر صفحه‌اش دارد. از طرفی ناپیوستگی‌ها ایجاد اثرات مقیاس می‌کنند و در نهایت در اثر تقاطع آنها بلوک‌ها تشکیل می‌شوند که می‌توانند منجر به ایجاد مسائل ناپایداری گردند. بنابراین در مطالعات مهندسی مرتبط با توده‌سنگ بایستی هر دوی خصوصیات مهندسی سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها مورد توجه باشند.

وجود روش‌های توصیف صحرائی قابل اطمینان و تفسیر اطلاعات، نیاز اولیه تحقیق در رابطه با همه اشکال مهندسی سنگ می‌باشد. انجام اندازه‌گیری‌های دقیق خصوصیات مهندسی توده‌سنگ کیفیت توصیف‌ها، اندازه‌گیری‌ها و مدل‌سازی‌های بعدی را کنترل می‌کند. بطور کلی روش‌های

بیشترین برداشت‌ها با برداشت ۳۸۳۸ ناپیوستگی در طول ۱۰۶۲/۵ متر خط پیمایش مربوط به معدن چغارت است. پس از آن در معدن چادرملو ۲۱۲۵ ناپیوستگی در طول ۵۶۵ متر خط پیمایش و در معدن سه‌چاهون ۱۲۱۳ ناپیوستگی در طول ۳۳۳/۸ متر خط پیمایش برداشت شده است.



شکل ۳. نمایی از خط پیمایش پیاده شده بر روی توده‌سنگ‌های معدن چغارت، راست) ماده معدنی، چپ) باطله

جهت انجام بررسی‌های آماری از نرم‌افزار PASW statistics 18 استفاده شد. تحلیل آماری داده‌های شیب و جهت شیب و فاصله‌داری در معادن مورد مطالعه نشانگر نرمال بودن توزیع شیب و جهت شیب و توزیع نمایی فاصله‌داری می‌باشد (شکل ۴). جدول ۲ درصد فراوانی خصوصیات ناپیوستگی‌ها و جدول ۳ متوسط شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها را در معادن مورد مطالعه نشان می‌دهد.

متداول ارزیابی خصوصیات مهندسی سنگ را می‌توان به سه دسته اندازه‌گیری و مشاهدات در سطح رخنمون‌های سنگی، اندازه‌گیری و لاگ کردن مغزه‌های حفاری و ارزیابی به وسیله روش‌های ژئوفیزیکی تقسیم‌بندی کرد. از میان این سه روش، روش اندازه‌گیری و مشاهدات در سطوح سنگی متداول‌ترین روش می‌باشد. این روش نیاز به حفاری و تجهیزات گران قیمت ندارد.

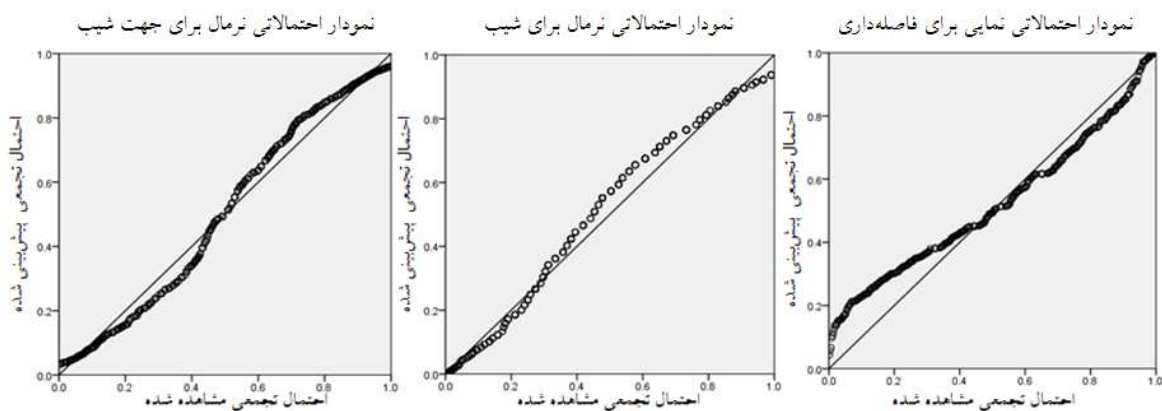
#### ۴-۱. اندازه‌گیری خصوصیات توده‌سنگ

جهت اندازه‌گیری خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی توده‌سنگ در سطح رخنمون‌های سنگی، روش نقشه‌برداری خطی مورد استفاده قرار گرفت. در این روش خصوصیات مهندسی مدنظر در طول یک خط پیمایش بر روی رخنمون سنگی برداشت می‌گردند. در برداشت خطی معمولاً طول خط پیمایش از ۱۰۰-۱۰ متر متغیر است.

(Priest and Hudson (1976) پیشنهاد کرده‌اند که طول خط پیمایش حداقل بایستی ۵۰ برابر فاصله‌داری متوسط ناپیوستگی‌ها باشد (نقل از Wines and Lilly, 2002). در حالیکه طبق توصیه انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ طول خط پیمایش معمولاً ۱۰۰-۵۰ متر است (ISRM, 1978). در این روش بسته به تغییرات عمده خصوصیات توده‌سنگ از قبیل تغییرات سنگ‌شناسی، ساختاری، و یا حتی وجود یک گسل یا پهنه گسلی و یا تغییرات زیاد در میزان هوازدگی توده‌سنگ می‌توان طول خطوط پیمایش را انتخاب کرد و با مشاهده این تغییرات جهت برداشت خصوصیات توده‌سنگ می‌توان از خط پیمایش جدیدی بهره گرفت. در این پژوهش طول انتخاب شده برای خطوط پیمایش با در نظر گرفتن ملاحظات فوق بین ۸۰-۱۰ متر و بطور متوسط ۳۵ متر بوده است (شکل ۳).

در این مطالعه در طولی حدود ۱۹۶۱ متر خط پیمایش، خصوصیات ناپیوستگی‌ها در ۵۱ بلوک انفجاری مورد مطالعه اندازه‌گیری شد. بطوریکه در طول این خطوط پیمایش خصوصیات ۷۱۷۶ ناپیوستگی مورد ارزیابی قرار گرفت.





شکل ۴. نمودارهای احتمالاتی داده‌های مربوط به شیب، جهت شیب و فاصله‌داری معدن چغارت

جدول ۲. درصد فراوانی خصوصیات ناپیوستگی‌ها در معادن مطالعاتی

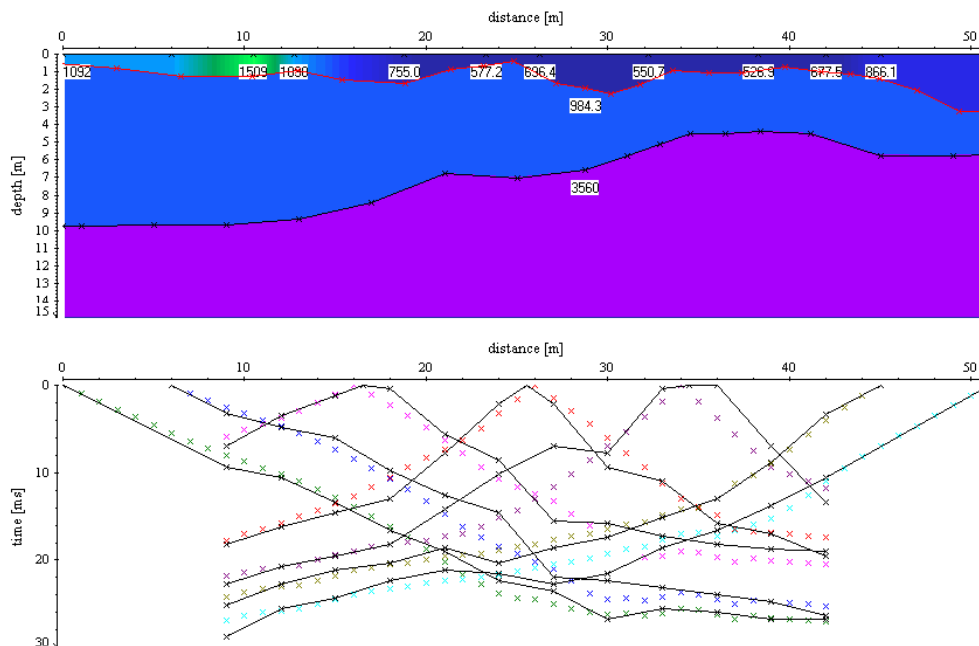
درصد فراوانی			خصوصیات ناپیوستگی‌ها	
معدن چغارت معدن چادرملو معدن سه‌چاهون			نوع	
۸/۷	۳/۵	۴/۳	گسل	
۹۱/۳	۹۶/۵	۹۵/۶	درزه	
-	-	۰/۱	کنتاکت	
۲/۶	-	۱/۴	بسیار کم < ۱	تداوم (متر)
۵۶	۶۰/۴	۴۶	کم ۱-۳	
۳۷/۳	۳۱/۲	۳۵	متوسط ۳-۱۰	
۳/۹	۸/۳	۱۵/۵	زیاد ۱۰-۲۰	
۰/۲	۰/۱	۲/۱	بسیار زیاد > ۲۰	
-	-	۱	بسیار بسته < ۰/۱	بازشدگی (میلی‌متر)
۳	۲/۵	۲	بسته ۰/۱-۰/۲۵	
۳۱/۲	۲۸/۶	۱۶/۶	نسبتاً باز ۰/۲۵-۰/۵	
۵۵/۸	۴۷/۲	۵۸/۹	باز ۰/۵-۲/۵	
۴/۷	۱۳/۱	۱۴/۳	بظور متوسط عریض ۲/۵-۱۰	
۵/۱	۸/۱	۶/۷	بسیار عریض ۱۰-۱۰۰	فاصله‌داری (سانتی‌متر)
۰/۲	۰/۵	۰/۵	بشدت عریض ۱۰۰-۱۰۰۰	
-	-	۶/۹	بشدت نزدیک < ۲	
۰/۴	۵/۳	۲/۹	بسیار نزدیک ۲-۶	
۲۲/۶	۳۵/۷	۳۰/۸	نزدیک ۶-۲۰	
۷۲/۸	۵۲	۵۰/۳	متوسط ۲۰-۶۰	نوع پرکننده
۴/۲	۶/۸	۸/۷	زیاد ۶۰-۲۰۰	
-	۰/۲	۰/۴	بسیار زیاد ۲۰۰-۶۰۰	
۰/۱	۰/۱	۲/۲	تمیز	
۱۶/۳	۱۶/۳	۲۱/۳	آغشتگی سطحی	
۷۳/۷	۷۳/۷	۶۰/۶	رس	مواجی بودن سطح
۲/۴	۲/۴	۵/۲	اکسید آهن	
۷/۵	۷/۵	۱۰/۷	انواع دیگر	
۶/۲	۵۲/۵	۱۵/۵	صفحه‌ای	
۹۳/۸	۴۷/۵	۸۴/۱	مواج	
-	-	۰/۴	پلکانی	زبری سطح
۱۶/۴	۴۷/۶	۳۲/۲	زبر	
۷۵/۳	۴۹/۷	۶۰/۲	هموار	
۸/۳	۲/۷	۷/۵	خش لغزدار	

## ۴-۲. اندازه‌گیری خصوصیات لرزه‌ای توده‌سنگ

در این تحقیق روش لرزه‌نگاری انکساری برای بدست آوردن میزان سرعت امواج طولی در توده‌سنگ استفاده شد. تجهیزات مورد استفاده جهت جمع‌آوری داده‌های لرزه‌ای شامل منبع ایجاد امواج لرزه‌ای، لرزه‌سنج، باتری، کابل‌های رابط و دستگاه ثبت اطلاعات داده‌های لرزه‌ای بود. امواج لرزه‌ای در اثر وارد آمدن انرژی بر زمین ایجاد می‌شوند. برداشت‌های صحرایی لرزه‌نگاری، می‌توان امواج لرزه‌ای را به صورت دستی یا ماشین‌آلات سنگین و یا به کمک مواد ناریه ایجاد کرد. در این مطالعه از یک پتک دستی با وزن تقریبی ۱۸ کیلوگرم به عنوان منبع لرزه‌زا استفاده گردید. پتک دستی می‌تواند یک شوک با انرژی و بسامد مناسب ایجاد کند که تا اعماق ۱۰ تا ۵۰ متر قابل کاربرد است. لرزه‌سنج‌های مورد استفاده در این پروژه، ژئوفون‌های الکترومغناطیسی PE-3 ساخت شرکت سنسور هلند با بسامد ذاتی ۱۰ هرتز و ثبات مورد استفاده، دستگاه لرزه‌نگار 8 TERRALOC ساخت شرکت ABEM سوئد بود. این دستگاه لرزه‌نگار ۱۲ کاناله بوده و برای برداشت‌های انکساری، انعکاسی، توموگرافی و

اندازه‌گیری ارتعاشات در کلیه شرایط آب و هوایی مناسب می‌باشد. این دستگاه با حافظه داخلی ۸۰ گیگابایت دارای بازه فرکانسی ۲-۴۰۰۰ هرتز می‌باشد ( ABEM Instrument, 2009). برای انجام تنظیمات دستگاه، بررسی اولیه و مشاهده داده‌های ثبت شده در صحرا از نرم‌افزار SeisTW نصب شده بر روی لرزه‌نگار و برای پردازش نهایی داده‌ها و بدست آوردن سرعت امواج طولی از نرم‌افزار Reflex-Win 5.0.5 استفاده شد (شکل ۵).

بسته به طول و موقعیت بلوک‌های انفجاری، چیدمان مناسب لرزه‌سنج‌ها با فاصله‌داری ۲، ۳ یا ۵ متری استفاده شد. در کلیه برداشت از ۷ ضربه‌گاه در طول پروفیل استفاده شد. بطوریکه ۵ ضربه‌گاه در میان پروفیل و ۴ ضربه‌گاه در خارج پروفیل قرار داشت. در این مطالعه خصوصیات لرزه‌ای توده‌سنگ در طول ۷۱ پروفیل لرزه‌ای برداشت شده است (شکل ۶). با توجه به فاصله‌داری متفاوت بکار رفته برای لرزه‌سنج‌ها در این پروفیل‌ها، طول کل پروفیل‌های برداشتی ۱۷۷۱ متر می‌باشد. نتایج لرزه‌نگاری انکساری انجام شده در معادن مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۵. مدل دوبعدی تغییرات سرعت لرزه‌ای مربوط به بلوک انفجاری E2964-1 معدن چادرملو



شکل ۶. نمایی از پروفیل لرزه‌ای اجرا شده جهت ایجاد و ثبت امواج طولی در معدن چغارت

جدول ۵. نتایج لرزه‌نگاری انکساری انجام شده در مناطق مطالعاتی

معدن	تعداد پروفیل‌ها	طول پروفیل‌ها (متر)	سرعت میانگین (متر بر ثانیه)	انحراف معیار	حداکثر سرعت (متر بر ثانیه)	حداقل سرعت (متر بر ثانیه)
چغارت	۳۶	۸۶۹	۱۲۶۵	۱۸۰/۲	۱۶۵۲	۹۶۷/۳
چادرملو	۲۷	۶۸۲	۱۳۴۲/۹	۳۰۴/۵	۲۱۴۶/۸	۸۶۸/۲
سه‌چاهون	۸	۲۲۰	۲۱۳۴	۳۶۰/۳	۲۹۱۹/۲	۱۶۶۸/۳

#### ۵. تعیین توزیع اندازه مصالح ناشی از آتشیاری

به منظور تعیین توزیع اندازه مصالح از روش پردازش تصاویر رقومی با کمک از نرم‌افزار Splite-Desktop2 استفاده شد. این نرم‌افزار پردازش تصویر اولین بار توسط دانشگاه آریزونا توسعه یافت. این نرم‌افزار با تصاویر مقیاس خاکستری سنگ‌های خرد شده کار می‌کند (Split Engineering). این تصاویر را می‌توان به وسیله عکس‌برداری از مصالح خردشده در یک کپه آتشیاری، روی کامیون باربری یا از خوراک و یا محصول سنگ‌شکن اولیه بدست آورد (Sanchidrian et al., 2006). بطور کلی گام‌های تعیین خردایش با استفاده از این نرم‌افزار شامل بدست آوردن تصویر رقومی به صورت دستی یا خودکار، پیش پردازش تصاویر برای اصلاح مشکلات ناشی از روشنایی و غربال کردن تصاویر نامناسب، تعیین مقیاس برای هر تصویر، ترسیم ابعاد سطحی هر خرده سنگ در تصویر بصورت خودکار یا دستی، ویرایش ترسیم‌ها، محاسبه توزیع اندازه بر اساس خرده سنگ‌های ترسیم شده و در

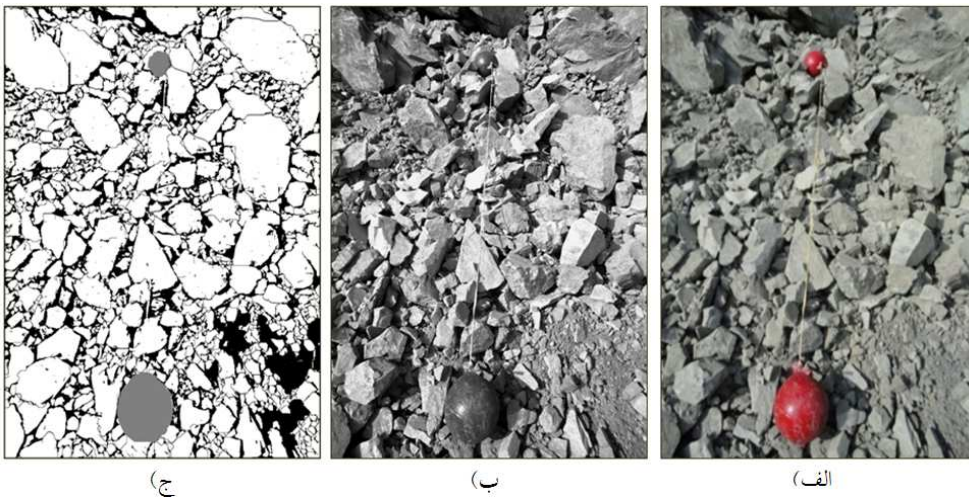
نهایت نمایش نتایج بصورت نمودار و متن می‌باشد (Kemeny et al., 2001).

کلیه عکس‌ها با استفاده از یک دوربین رقومی با قدرت تفکیک ۱۰ مگاپیکسل در مقیاس متوسط گرفته شد. در این مقیاس طول افقی تصویر بایستی حدود ۳ متر باشد (Split Engineering). در عکس‌برداری‌های انجام شده سعی شده محور لنز دوربین عمود بر سطح کپه انفجاری باشد، همه عکس‌ها عمود بر خط پاشنه شیب گرفته شوند، عکس‌ها دارای حداقل همپوشانی باشند و تمامی سطح کپه انفجاری را پوشش دهند و در شرایطی عکس‌برداری صورت گیرد که توزیع نور در سطح کپه یکسان باشد. اگر سطح کپه انفجاری عمود بر محور دوربین نباشد باعث تغییر مقیاس در تصویر از پایین شیب به سمت بالای شیب می‌شود. چندین روش برای اصلاح مقیاس در تصاویر اخذ شده از کپه انفجاری وجود دارد (Esen and Bilgin, 2001). ساده‌ترین راه قرار دادن دو شیء با اندازه مشخص در تصویر است. بطوریکه یکی نزدیک به پایین و دیگری نزدیک به بالای شیب گذاشته می‌شود.

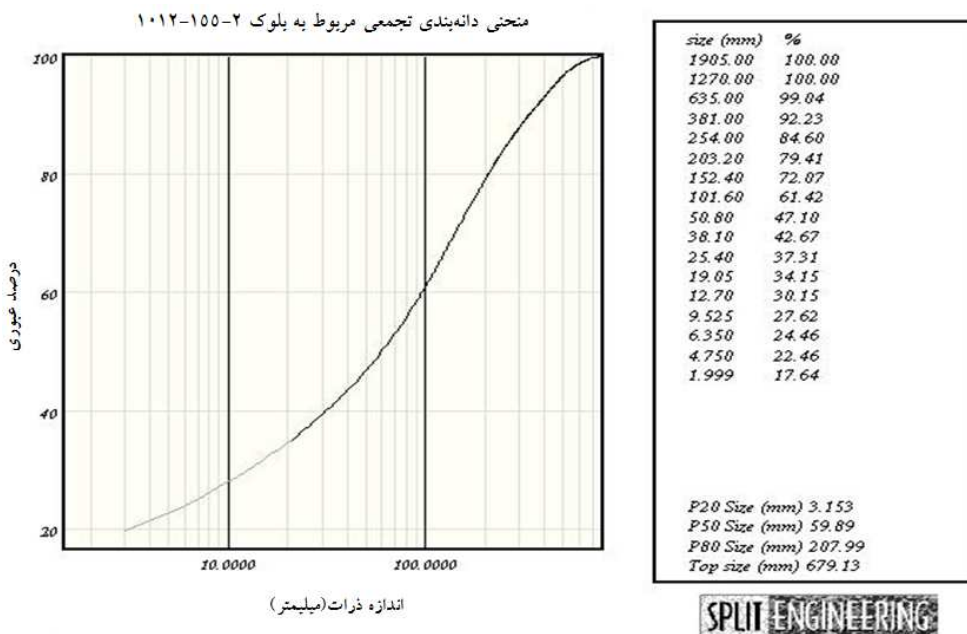


(شکل ۷). بطور کلی پس از حذف تصاویر ناخواسته حدود ۱۵۰۰ تصویر و بطور میانگین ۲۹ تصویر برای هر بلوک آتشفباری مورد پردازش قرار گرفت و منحنی توزیع دانه‌بندی کپه انفجاری برای هر بلوک انفجاری بدست آمد (شکل ۸). در جدول ۶ خصوصیات آماری توزیع اندازه مصالح حاصل از انفجار برای کلیه ۵۱ بلوک آتشفباری مورد مطالعه ارائه شده است.

بدین منظور در این تحقیق از دو توپ با قطر مشخص استفاده شد. اندازه تصاویر کپه‌های انفجاری پس از حذف تصاویر نامناسب با توجه به حداکثر اندازه قابل پردازش توسط نرم افزار (۱۶۸۰×۱۴۰۰ پیکسل) اصلاح شد. سپس ابعاد سطحی خرده‌سنگ‌ها بعد از مقیاس دهی تصاویر بطور خودکار توسط نرم‌افزار ترسیم گردید. بعد از ویرایش دستی این ترسیم‌ها، توزیع اندازه مصالح خرد شده توسط نرم‌افزار محاسبه شد.



شکل ۷. الف) تصویر اولیه کپه انفجاری ب) تصویر مقیاس خاکستری ج) تصویر دودویی پس از ترسیم و ویرایش



شکل ۸. منحنی توزیع دانه‌بندی بدست آمده برای یک کپه انفجاری

**جدول ۶. نتایج آمار توصیفی درصد‌های عبوری محاسبه‌شده در بلوک‌های انفجاری مورد مطالعه**

اندازه درصد‌های عبوری (میلی‌متر)				
بزرگترین اندازه	%۸۰	%۵۰	%۳۰	تعداد نمونه
۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱
۷۰۶/۸	۳۰۸/۱	۱۲۸/۴	۵۶/۵	میانگین
۲۳۳/۶	۱۴۲/۲	۶۹/۸	۳۶/۴	انحراف معیار
۲۶۹/۶	۱۱۶/۲	۳۵/۵	۹/۴	حداقل
۱۳۴۲/۹	۷۵۳/۶	۲۶۸/۳	۲۳۷	حداکثر

### ۶. رابطه خردایش با خصوصیات توده‌سنگ

از آنجایی که یکی از پارامترهای مهم و مؤثر بر نتایج حاصل از آتشباری خصوصیات توده‌سنگ می‌باشد، در این پژوهش این خصوصیات در طول حدود ۱۹۶۱ متر خط پیمایش و ۱۷۷۱ متر پروفیل لرزه‌ای برای ۵۱ بلوک انفجاری مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس اثر خصوصیات توده‌سنگ بر روی خردایش حاصل از آتشباری همان توده‌سنگ برای مقادیر اندازه درصد‌های عبوری ۳۰٪، ۵۰٪ و ۸۰٪ مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت.

همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود نتایج بررسی‌ها مؤید وجود رابطه میان ویژگی‌های توده‌سنگ با خردایش حاصله می‌باشد. بطوریکه با افزایش فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ اندازه مصالح حاصل از آتشباری افزایش می‌یابد. همچنین اندازه‌سنگ‌های آتشباری شده با افزایش تداوم ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ افزایش می‌یابد. بررسی اثر میزان بازشدگی ناپیوستگی‌ها بر روی خردایش حاصل از انفجار توده‌سنگ نیز نشان دهنده روند افزایشی اندازه مصالح خرد شده با افزایش بازشدگی ناپیوستگی‌های توده‌سنگ می‌باشد. بررسی سرعت‌های موج طولی بدست آمده برای سنگ بکر نیز نشان می‌دهد که با افزایش این سرعت روند افزایشی در اندازه مصالح حاصل از آتشباری دیده می‌شود. بررسی اثر شرایط سطح ناپیوستگی‌ها نیز مؤید این مسئله است که با افزایش زبری و مواجی بودن سطح ناپیوستگی‌ها اندازه مصالح حاصل از انفجار نیز افزایش می‌یابد. جهت بررسی اثر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها بر روی خردایش حاصله

زاویه حاده بین جهت شیب دسته ناپیوستگی‌های اصلی و سطح آزاد(سطح دامنه) هر بلوک آتشباری محاسبه شد. سپس این زاویه با خردایش حاصل از آتشباری برای هر بلوک انفجاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با نزدیک شدن این زاویه به ۹۰ درجه و عمود شدن ناپیوستگی‌ها بر سطح آزاد هر بلوک انفجاری، اندازه مصالح حاصل از انفجار افزایش می‌یابد. یکی از پارامترهای مؤثر بر نتایج حاصل از آتشباری مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر می‌باشد. بطوریکه با افزایش مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر بطور کلی اندازه مصالح حاصل از انفجار نیز افزایش می‌یابد و برای خردایش بیشتر سنگ نیاز به اعمال انرژی بیشتری به توده‌سنگ می‌باشیم (شکل ۹).

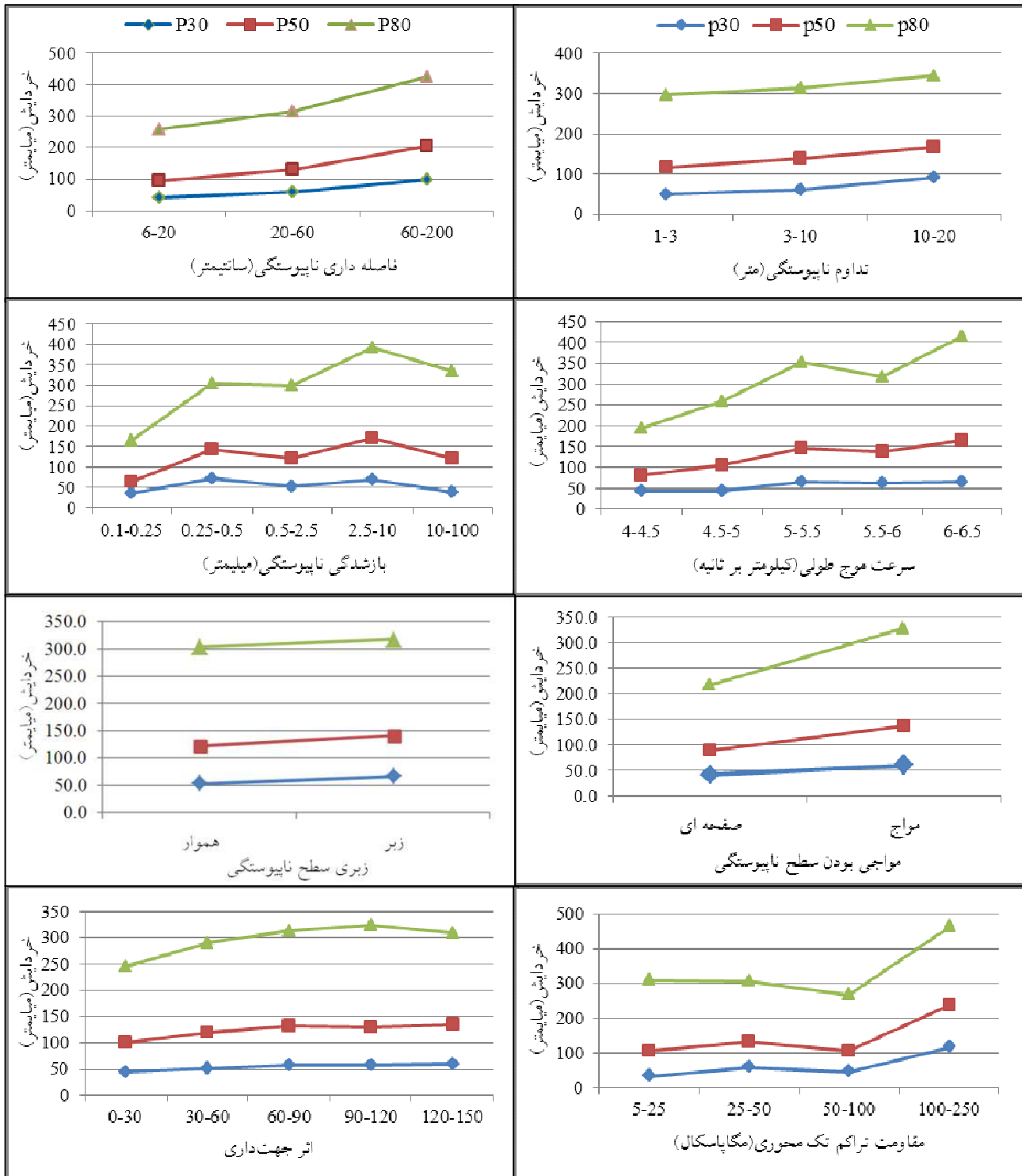
برای برآزش مدل‌های مختلف میان خصوصیات توده‌سنگ با خردایش حاصله از نرم افزار PASW statistics 18 استفاده شد. در جدول ۷ بهترین مدل برآزش یافته میان هر یک از خصوصیات توده‌سنگ با مقادیر اندازه ۳۰٪ عبوری، ۵۰٪ عبوری و ۸۰٪ عبوری به همراه ضریب تعیین ارائه شده است. با توجه به تأثیر خردایش ناشی از آتشباری بر فرآیندهای پایین دستی معدن‌کاری، در این پژوهش با انجام رگرسیون خطی مدل‌های خطی مختلفی بر روی داده‌های خصوصیات توده‌سنگو خردایش برآزش داده شد. در نهایت بهترین رابطه خطی میان خصوصیات توده‌سنگ و مقدار اندازه ۸۰٪ عبوری داده‌های خردایش با ضریب تعیین ۰/۹۲۷ بدست آمد.

رابطه (۱):

$$P80 = -9.187x_1 + 7.031x_2 + 117.327x_3 + 3.894x_4 - 0.665x_5 - 382.847x_6 + 0.979x_7$$

تخصیص کیفیت توده سنگ، مقاومت تراکمی تکمحوری سنگ بکر، شاخص سرعت امواج لرزه‌ای و تأثیر جهت داری می‌باشد.

در رابطه فوق  $x_1$  تا  $x_7$  به ترتیب تداوم ناپیوستگی‌ها، بازشدگی ناپیوستگی‌ها، فاصله داری ناپیوستگی‌ها، شاخص



شکل ۹. اثر خصوصیات توده سنگ بر اندازه خردایش حاصله

جدول ۷. بهترین مدل برازش یافته میان خصوصیات توده سنگ و خردایش

Y=P30		Y=P50		Y=P80		X
	R <sup>2</sup>		R <sup>2</sup>		R <sup>2</sup>	
$y=x^{2.34}$	۰/۹۰۱	$y=x^{2.843}$	۰/۹۰۰	$y=x^{3.371}$	۰/۸۹۶	تداوم ناپیوستگی‌ها(متر)
$y=4.008/x$	۰/۶۵۲	$y=4.901/x$	۰/۶۶۰	$y=5.854/x$	۰/۶۶۶	بازشدگی ناپیوستگی‌ها(میلی‌متر)
$y=x^{-2.297}$	۰/۷۱۷	$y=x^{-2.847}$	۰/۷۴۵	$y=x^{-3.428}$	۰/۷۶۴	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها(متر)
$y=e^{1.043x}$	۰/۹۸۱	$y=x^{1.047}$	۰/۹۸۹	$y=x^{1.247}$	۰/۹۹۴	شاخص تخصیص کیفیت توده سنگ
$y=x^{0.964}$	۰/۹۷۳	$y=x^{1.176}$	۰/۹۸۰	$y=x^{1.4}$	۰/۹۸۳	مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر(مگا پاسکال)
$y=x^{0.451}$	۰/۹۷۷	$y=x^{0.552}$	۰/۹۸۹	$y=x^{0.658}$	۰/۹۹۴	سرعت موج طولی سنگ بکر(متر بر ثانیه)
$y=x^{0.532}$	۰/۹۷۵	$y=x^{0.651}$	۰/۹۸۵	$y=x^{0.776}$	۰/۹۹۳	سرعت موج طولی توده سنگ (متر بر ثانیه)
$y=x^{-2.812}$	۰/۹۳۸	$y=x^{-3.439}$	۰/۹۵۰	$y=x^{-4.096}$	۰/۹۵۳	شاخص سرعت
$y=x^{0.902}$	۰/۹۶۲	$y=x^{1.013}$	۰/۹۷۴	$y=x^{1.315}$	۰/۹۸۰	تأثیر جهت داری

### ۷. نتیجه‌گیری

با توجه به تأثیر خصوصیات توده سنگ بر نتایج حاصل از آتشباری، در این مطالعه اثر این خصوصیات بر توزیع اندازه سنگ‌های خردشده در ساختگاه‌های مورد مطالعه مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. جهت رسیدن به این هدف خصوصیات توده سنگ در ۵۱ بلوک انفجاری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که در کلیه معادن مطالعاتی ناپیوستگی‌ها عمدتاً دارای تداوم کم، بازشدگی باز، پرکننده رس و فاصله‌داری متوسط می‌باشند. ناپیوستگی‌ها در معدن چغارت به طور عمده دارای سطحی مواج و هموار، در معدن چادرملو دارای سطحی صفحه‌ای و هموار و در معدن سه‌چاهون دارای سطحی مواج و هموار هستند.

با توجه با انجام آزمایشات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگ بکر اخذ شده از هر بلوک انفجاری در معادن مورد مطالعه برای سنگ‌های باطله بطور متوسط مقاومت تراکمی تک محوری ۵۹/۸ مگاپاسکال، مقاومت کششی برزیلی ۶/۵۹ مگاپاسکال، سرعت موج طولی ۵۲۹۴/۷ متربرثانیه و چگالی ۲/۷۵ تن بر مترمکعب می‌باشد. در حالیکه برای ماده معدنی بطور متوسط مقاومت تراکمی تک محوری ۲۵/۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی برزیلی ۳/۷ مگاپاسکال، سرعت موج طولی ۴۶۹۳/۲ متر بر ثانیه و چگالی ۳/۲۵ تن بر متر مکعب می‌باشد.

انجام لرزه‌نگاری انکساری در مناطق مورد مطالعه نیز نشان داد که سرعت میانگین موج طولی در معدن چغارت ۱۲۶۵ متر بر ثانیه، در معدن چادرملو ۱۳۴۲/۹ متربرثانیه و در معدن سه‌چاهون ۲۱۳۴ متر برثانیه می‌باشد. از طرفی جهت اندازه‌گیری خردایش حاصل از آتشباری از روش پردازش تصاویر رقومی استفاده شد. بدین منظور پس از پردازش ۱۵۰۰ تصویر گرفته شده از سطح کپه‌های انفجاری، مقادیر میانگین اندازه درصدهای عبوری ۰/۳۰، ۰/۵۰، ۰/۸۰ و بزرگترین اندازه به ترتیب ۵۶/۵، ۱۲۸/۴، ۳۰۸/۱ و ۷۰۶/۸ میلی‌متر بدست آمد.

بررسی تغییرات خردایش با توجه به تغییرات خصوصیات توده سنگ نشان داد که با افزایش فاصله‌داری، تداوم و بازشدگی ناپیوستگی‌ها، افزایش سرعت موج طولی در سنگ بکر، افزایش زبری و مواجی بودن سطح ناپیوستگی‌ها، افزایش مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر و افزایش عمود بودن ناپیوستگی‌ها بر سطح آزاد بلوک انفجاری اندازه مصالح حاصل از آتشباری نیز افزایش می‌یابد. همچنین با برازش مدل‌های مختلف بر روی داده‌ها بهترین روابط موجود بین خردایش و خصوصیات توده سنگ بدست آمد و رابطه‌ای جهت پیش‌بینی خردایش با توجه به خصوصیات توده سنگ ارائه شد.

## ۷. تشکر و قدردانی

در پایان نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از شرکت سنگ آهن مرکزی ایران به خاطر حمایت مالی این پروژه صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

## منابع

- شرکت کانی‌کاوان شرق، ۱۳۹۲. گزارش فنی تعیین پارامترهای فیزیکی و مقاومتی سنگ بکر پیت شمالی معدن چادرملو.
- شرکت مهندسی کاوشگران، ۱۳۷۰. گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیکی و زمین‌ساختاری محدوده معدن چغارت.
- شرکت مهندسی کاوشگران، ۱۳۷۸. گزارش نهایی مدل زمین‌شناسی و ارزیابی ذخیره کانسار سه چاهون توده شمالی-آنومالی XI بر اساس اکتشافات تکمیلی.
- ABEM Instrument AB. , 2009. Reference manual for ABEM Terraloc 'Mk6 v2 and Mk8 with ABEM SeisTW for windows XP. 75p.
- Aler, J. , Du Mouza, J. , Arnould, M. , 1996. Measurement of the fragmentation efficiency of rock mass blasting and its mining applications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 33(2):125-139.
- Azimi, Y. , Osanloo, M. , Aakbarpour-Shirazi, M. , Aghajani Bazzazi, A. ,2010. Prediction of the blastability designation of rock masses using fuzzy sets. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(7): 1126-1140.
- Bhandari, S. ,1997. Engineering rock blasting operations. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 375p.
- Esen, S. , Bilgin, H. A. ,2001. Effect of explosive on fragmentation. *The 7th International Conference on Mining, Petroleum and Metallurgical Engineering*, Assiut, Egypt, 12p.
- Hagan, T. N. , 1995. The effect of rock properties on the design and results of tunnel blasts. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, 1(1): 25-39.
- Han, J. , Weiya, X. , Shouyi, X. , 2000. Artificial neural network method of rock mass blastability classification. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Geo Computation*, London, UK: 23-28.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on standardization of laboratory and field tests,1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 15(6): 319-368.
- Kacar, G. , Ozgenoglu, A. , Bilgin, H. A. ,2003. Effect of discontinuity orientation and spacing on the blasting performance in some open cast mines of TKI-Turkey. *ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy: 595-601.
- Kaushik, D. , Phalguni, S. , 2003. Concept of blastability – an update. *Indian Mining and Engineering Journal*, 42(8&9): 24-31.
- Kemeny, J. , Mofya, E. , Kaunda, R. , Perry, G. , Morin, B. , 2001. Improvements in blast fragmentation models using digital image processing. *Proceedings of the 38th Rock Mechanics Symposium*, Washington, D. C. , USA.
- Kilic, A. M. , Yasar, E. , Erdogan, Y. , Ranjith, P. G. ,2009. Influence of rock mass properties on blasting efficiency. *Scientific Research and Essay*, 4(11):1213-1224.
- Konya, C. J. , Walter, E. J. ,1991. Rock blasting and overbreak control. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, No. FHWA-HI-92-001, 435p.
- Latham, J. P. , Lu, P. , 1999. Development of an assessment system for the blastability of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36: 41-55.
- Split Engineering, Split-Desktop Software Manual. LLC, Tucson, Arizona, USA.

- 
- Sanchidrian, J. A., Segarra, P., Lopez, L. M., 2006. A practical procedure for the measurement of fragmentation by blasting by image analysis. *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39(4): 359-382.
- Thornton, D. , Kanchibolta, S. S. , Brunton, I. , 2002. Modeling the impact and blast design variation on blast fragmentation. *International Journal for Blasting and Fragmentation*, Swets and Zeitlinger, the Netherlands, 6(2): 171-172.
- Wines, D. R. , Lilly, P. A. , 2002. Measurement and analysis of rock mass discontinuity spacing and frequency in part of the Fimiston open pit operation in Kalgoorlie, Western Australia: a case study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39:589-602