



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

مجید اکبری<sup>1</sup>، غلامرضا لشکری پور<sup>2\*</sup>، علیرضا یاراحمدی بافقی<sup>3</sup>، محمد غفوری<sup>2</sup>

پذیرش مقاله: 93/5/29

دریافت مقاله: 92/6/6

### چکیده

خصوصیات توده سنگ یکی از فاکتورهای مهم و مؤثر بر نتایج حاصل از آتشیاری 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 1961 متر خط پیمایش و 1771 متر پروفیل لرزه ای در غالب 51 بلوک انفجاری مورد ارزیابی قرار گرفت. از طرفی جهت اندازه گیری خردایش حاصل از آتشیاری از روش پردازش تصاویر رقومی استفاده شد. بدین منظور با پردازش 1500 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 موجی 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 آتشیاری نیز افزایش می یابد. نتایج این پژوهش بیانگر تأثیر خصوصیات توده سنگ به اندازه مصالح حاصل از آتشیاری می باشد.

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

1. دانشجوی دکترای دانشگاه فردوسی مشهد

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

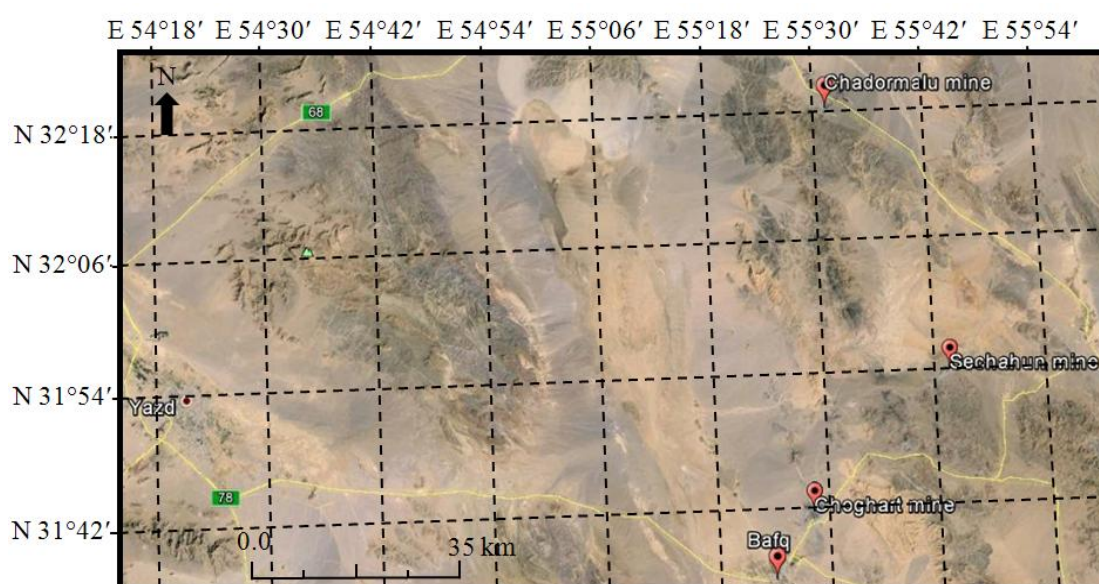
3. عضو هیأت علمی دانشگاه یزد

\* مسئول مکاتبات

## 1. مقدمه

نایبوستگی‌های آن می‌باشد، قابلیت آتشیاری توده‌سنگ می‌گویند (Latham and Lu, 1999). پارامترهای مربوط به طبیعت توده‌سنگ شامل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر و نایبوستگی‌ها 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 نایبوستگی‌ها 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 آتشیاری انجام شده است، بدیهی است که خصوصیات توده‌سنگی که آتشیاری می‌شود تأثیر بسزایی بر عملکرد آتشیاری 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).

آتشیاری یکی از کاربردی‌ترین تکنیک‌های حفاری سنگ در معدن‌کاری می‌باشد. پارامترهای مختلفی بر نتایج عملیات آتشیاری تأثیر گذارند که به طور کلی آنها را می‌توان به سه گروه خصوصیات توده‌سنگ، پارامترهای طراحی آتشیاری و خصوصیات مواد منفجره تقسیم‌بندی کرد. از این میان خصوصیات توده‌سنگ غیر قابل کنترل بوده و از جمله مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر نتایج آتشیاری بشمار می‌آیند. تجربه ثابت کرده است که آتشیاری در توده‌سنگ‌هایی با خصوصیات متفاوت در شرایط یکسان بودن طرح آتشیاری 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



شکل 1. 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، 1378).

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 تا 80 درجه به طرف شمال شرق هستند. توده معدنی به وسیله دایک‌های گرانیتی و دیوریتی دارای شیبی معادل 15 تا 45 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 آمفیبولیتی است و سنگ‌های آن شامل شیست‌ها، کوارتزیت‌ها، آمفیبولیت و مرمرها و در دوره اینفراکامبرین شامل سنگ‌های آتشفشانی، دولومیت‌ها و ماسه‌سنگ‌ها می‌باشد.

### 3. عملیات استخراج در معادن مطالعاتی

عملیات استخراج کانسنگ آهن در معادن مورد مطالعه به روش روباز و پلکانی صورت می‌گیرد (شکل 2). 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 نازل و با استفاده از مواد منفجره آنفو، امولایت و پودر آذر صورت می‌گیرد. در جدول 1 به برخی از مشخصات مربوط به استخراج در معادن مورد مطالعه اشاره شده است.

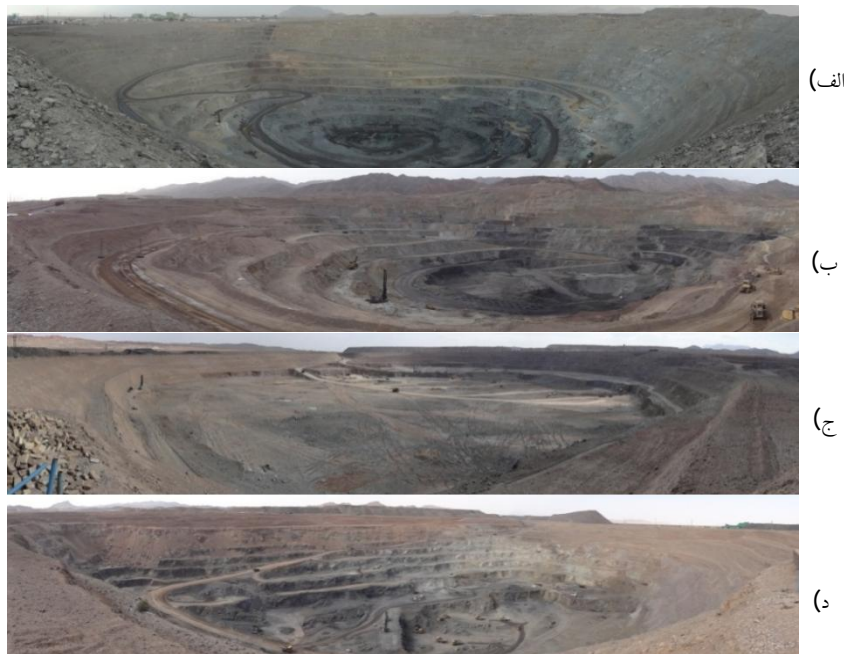
هدف این پژوهش بررسی میزان تأثیر خصوصیات توده‌سنگ بر خردایش حاصل از آتشیاری در معادن سنگ آهن ایران مرکزی می‌باشد. زیرا تاکنون در این معادن مطالعه جامعی در این خصوص انجام نشده است. این مطالعات می‌تواند کمک شایانی به بهینه‌سازی عملیات آتشیاری کند تا با حداقل صرف هزینه بتوان به میزان خردایش مورد علاقه دست 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 (1) موقعیت جغرافیایی مناطق مطالعاتی را نشان داده است.

### 2. 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 آلپیتوفیر 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، 1370). سنگ‌های دربرگیرنده

جدول 1. 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	177/2	10-12/5	8-10	70	38-50
چادرملو	320	15	10	69/5	50-55
سه‌چاهون	132	10	10	69/5	55/1



شکل 2. نمایی از گودال استخراج معادن الف (چغارت، ب) چادرملو، ج) سه‌چاهون (شمالی)، د) سه‌چاهون (جنوبی)

#### 4. 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 3838 ناپیوستگی در طول 1062/5 متر خط پیمایش مربوط به معدن چغارت است. پس از آن در معدن چادرملو 2125 ناپیوستگی در طول 565 متر خط پیمایش و در معدن سه‌چاهون 1213 ناپیوستگی در طول 333/8 متر خط پیمایش برداشت شده است.



شکل 3. 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 4). جدول 2 درصد فراوانی خصوصیات ناپیوستگی‌ها و جدول 3 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.

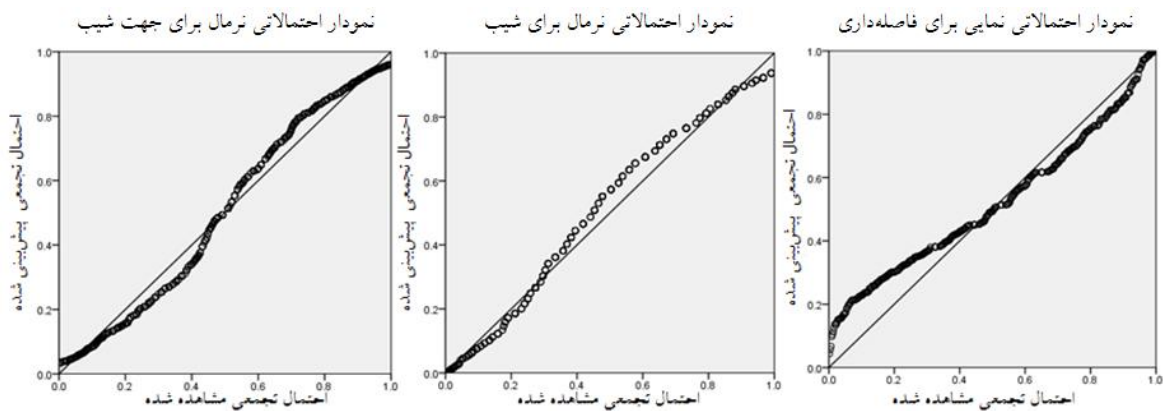
#### 1-4. اندازه‌گیری خصوصیات توده‌سنگ

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 100-10 متر متغیر است.

(Priest and Hudson, 1976) پیشنهاد کرده‌اند که طول خط پیمایش حداقل بایستی 50 برابر فاصله‌داری متوسط ناپیوستگی‌ها باشد (نقل از Wines and Lilly, 2002). در حالیکه طبق توصیه انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ طول خط پیمایش معمولاً 50-100 متر است (ISRM, 1978). در این روش بسته به تغییرات عمده خصوصیات توده‌سنگ از قبیل تغییرات سنگ شناسی، 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 80-10 متر و بطور متوسط 35 متر بوده است (شکل 3).

در این مطالعه در طولی حدود 1961 متر خط پیمایش، خصوصیات ناپیوستگی‌ها در 51 بلوک انفجاری مورد مطالعه اندازه‌گیری شد. بطوریکه در طول این خطوط پیمایش خصوصیات 7176 ناپیوستگی مورد ارزیابی قرار گرفت.





شکل 4. نمودارهای احتمالاتی داده‌های مربوط به شیب، جهت شیب و فاصله‌داری معدن چغارت

جدول 2. درصد فراوانی خصوصیات ناپیوستگی‌ها در معادن مطالعاتی

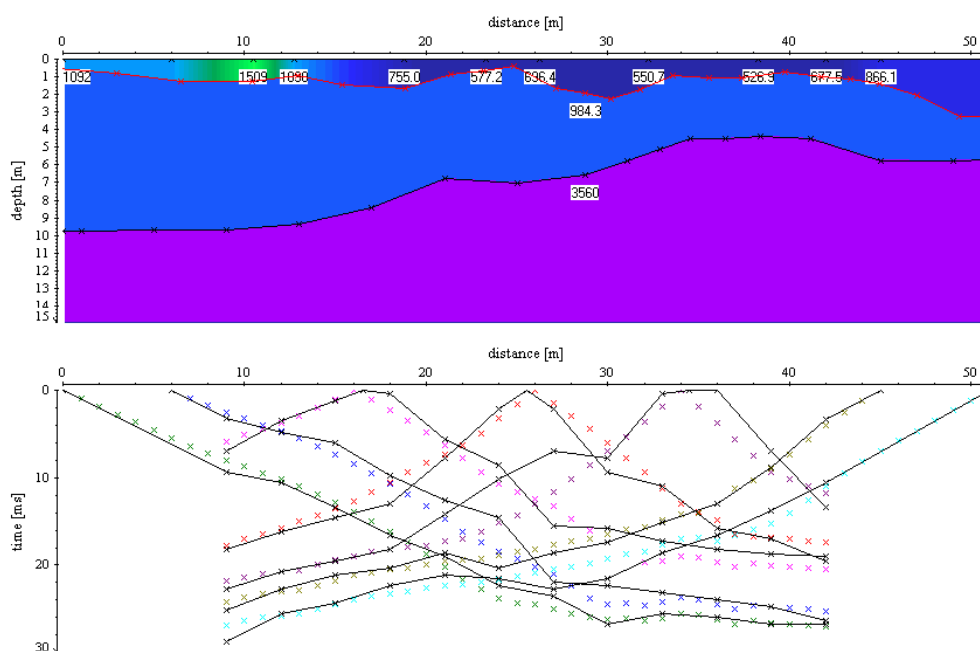
درصد فراوانی			خصوصیات ناپیوستگی‌ها	
معدن چغارت	معدن چادرملو	معدن سه‌چاهون		
8/7	3/5	4/3	گسل	نوع
91/3	96/5	95/6	درزه	
-	-	0/1	کتناکت	
2/6	-	1/4	بسیار کم <1	تداوم (متر)
56	60/4	46	کم 1-3	
37/3	31/2	35	متوسط 3-10	
3/9	8/3	15/5	زیاد 10-20	
0/2	0/1	2/1	بسیار زیاد >20	
-	-	1	بسیار بسته <0/1	
3	2/5	2	بسته 0/1-0/25	بازشدگی (میلی‌متر)
31/2	28/6	16/6	نسبتاً باز 0/25-0/5	
55/8	47/2	58/9	باز 0/5-2/5	
4/7	13/1	14/3	بظور متوسط عریض 2/5-10	
5/1	8/1	6/7	بسیار عریض 10-100	فاصله‌داری (سانتی‌متر)
0/2	0/5	0/5	بشدت عریض 100-1000	
-	-	6/9	بشدت نزدیک <2	
0/4	5/3	2/9	بسیار نزدیک 2-6	
22/6	35/7	30/8	نزدیک 6-20	نوع پرکننده
72/8	52	50/3	متوسط 20-60	
4/2	6/8	8/7	زیاد 60-200	
-	0/2	0/4	بسیار زیاد 200-600	
0/1	0/1	2/2	تمیز	
16/3	16/3	21/3	آغشتگی سطحی	مواجی بودن سطح
73/7	73/7	60/6	رس	
2/4	2/4	5/2	اکسید آهن	
7/5	7/5	10/7	انواع دیگر	
6/2	52/5	15/5	صفحه‌ای	زبری سطح
93/8	47/5	84/1	مواج	
-	-	0/4	پلکانی	
16/4	47/6	32/2	زبر	خش لغزدار
75/3	49/7	60/2	هموار	
8/3	2/7	7/5	خش لغزدار	

اندازه‌گیری ارتعاشات در کلیه شرایط آب و هوایی مناسب می‌باشد. این دستگاه با حافظه داخلی 80 گیگابایت دارای بازه فرکانسی 2-4000 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 5).

بسته به طول و موقعیت بلوک‌های انفجاری، چیدمان مناسب لرزه‌سنج‌ها با فاصله‌داری 2، 3 یا 5 متری استفاده شد. در کلیه برداشت از 7 ضربه‌گاه در طول پروفیل استفاده شد. بطوریکه 5 ضربه‌گاه در میان پروفیل و 4 ضربه‌گاه در خارج پروفیل قرار داشت. در این مطالعه خصوصیات لرزه‌ای توده‌سنگ در طول 71 پروفیل لرزه‌ای برداشت شده است (شکل 6). با توجه به فاصله‌داری متفاوت بکار رفته برای لرزه‌سنج‌ها در این پروفیل‌ها، طول کل پروفیل‌های برداشتی 1771 متر می‌باشد. نتایج لرزه‌نگاری انکساری انجام شده در معادن مورد مطالعه در جدول 5 ارائه شده است.

#### 2-4. 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. در برداشت‌های صحرائی 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 18 کیلوگرم به عنوان منبع لرزه‌زا استفاده گردید. پتک دستی می‌تواند یک شوک با انرژی و بسامد مناسب ایجاد کند که تا اعماق 10 تا 50 متر قابل کاربرد است. لرزه‌سنج‌های مورد استفاده در این پروژه، ژئوفون‌های الکترومغناطیسی PE-3 ساخت شرکت سنسور هلند با بسامد ذاتی 10 هرتز و ثبات مورد استفاده، دستگاه لرزه‌نگار 8 TERRALOC Mk ساخت شرکت ABEM سوئد بود. این دستگاه لرزه‌نگار 12 کاناله بوده و برای برداشت‌های انکساری، انعکاسی، توموگرافی و



شکل 5. مدل دویعدی تغییرات سرعت لرزه‌ای مربوط به بلوک انفجاری E2964-1 معدن چادرملو



شکل 6. نمایی از پروفیل لرزه‌ای اجرا شده جهت ایجاد و ثبت امواج طولی در معدن چغارت

جدول 5. 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	36	869	1265	180/2	1652	967/3
چادرملو	27	682	1342/9	304/5	2146/8	868/2
سه‌چاهون	8	220	2134	360/3	2919/2	1668/3

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

کلیه عکس‌ها با استفاده از یک دوربین رقومی با قدرت تفکیک 10 مگاپیکسل در مقیاس متوسط گرفته شد. در این مقیاس طول افقی تصویر بایستی حدود 3 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.

## 5. 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 خرد شده 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

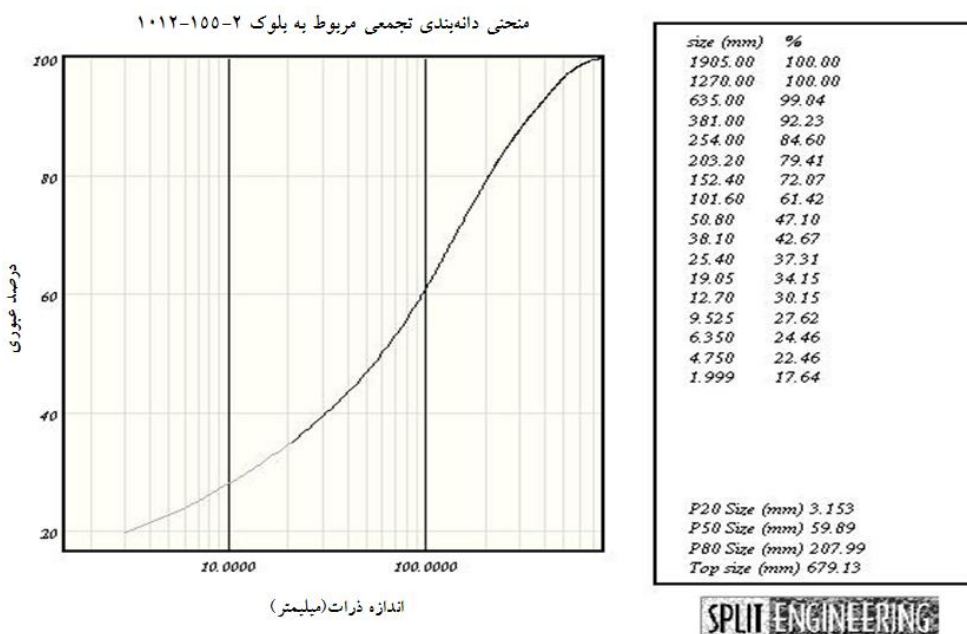


(شکل 7). بطور کلی پس از حذف تصاویر ناخواسته حدود 1500 تصویر و بطور میانگین 29 تصویر برای هر بلوک آتشفباری مورد پردازش قرار گرفت و منحنی توزیع دانه‌بندی کپه انفجاری برای هر بلوک انفجاری بدست آمد (شکل 8). در جدول 6 خصوصیات آماری توزیع اندازه مصالح حاصل از انفجار برای کلیه 51 بلوک آتشفباری مورد مطالعه ارائه 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 (1680×1400 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 7. الف) تصویر اولیه کپه انفجاری ب) تصویر مقیاس خاکستری ج) تصویر دودویی پس از ترسیم و ویرایش



شکل 8. منحنی توزیع دانه‌بندی بدست آمده برای یک کپه انفجاری

### جدول 6. نتایج آمار توصیفی درصد‌های عبوری محاسبه‌شده در بلوک‌های انفجاری مورد مطالعه

اندازه درصد‌های عبوری (میلی‌متر)				
بزرگترین اندازه	80%	50%	30%	تعداد نمونه
51	51	51	51	میانگین
706/8	308/1	128/4	56/5	انحراف معیار
233/6	142/2	69/8	36/4	حداقل
269/6	116/2	35/5	9/4	حداکثر
1342/9	753/6	268/3	237	

### 6. 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 1961 متر خط پیمایش و 1771 متر پروفیل لرزه‌ای برای 51 بلوک انفجاری مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس اثر خصوصیات توده‌سنگ بر روی خردایش حاصل از آتشباری همان توده‌سنگ برای مقادیر اندازه درصد‌های عبوری 30%، 50% و 80% مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت.

همانگونه که در شکل 9 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 90 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 9).

برای برآزش مدل‌های مختلف میان خصوصیات توده‌سنگ با خردایش حاصله از نرم افزار 18 PASW statistics استفاده شد. در جدول 7 بهترین مدل برآزش یافته میان هر یک از خصوصیات توده‌سنگ با مقادیر اندازه 30% عبوری، 50% عبوری و 80% 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 80% عبوری داده‌های خردایش با ضریب تعیین 0/927 بدست آمد.

رابطه (1):

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

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

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



شکل 9. اثر خصوصیات توده سنگ بر اندازه خردایش حاصله

جدول 7. بهترین مدل برازش یافته میان خصوصیات توده سنگ و خردایش

Y=P30	Y=P50	Y=P80	X
$R^2$	$R^2$	$R^2$	
$y=x^{2.34}$	$y=x^{2.843}$	$y=x^{3.371}$	تداوم ناپیوستگی ها (متر)
0/901	0/900	0/896	
$y=4.008/x$	$y=4.901/x$	$y=5.854/x$	بازشدگی ناپیوستگی ها (میلی متر)
0/652	0/660	0/666	
$y=x^{-2.297}$	$y=x^{-2.847}$	$y=x^{-3.428}$	فاصله داری ناپیوستگی ها (متر)
0/717	0/745	0/764	
$y=e^{1.043x}$	$y=x^{1.047}$	$y=x^{1.247}$	شاخص تخصیص کیفیت توده سنگ
0/981	0/989	0/994	
$y=x^{0.964}$	$y=x^{1.176}$	$y=x^{1.4}$	مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر (مگا پاسکال)
0/973	0/980	0/983	
$y=x^{0.451}$	$y=x^{0.552}$	$y=x^{0.658}$	سرعت موج طولی سنگ بکر (متر بر ثانیه)
0/977	0/989	0/994	
$y=x^{0.532}$	$y=x^{0.651}$	$y=x^{0.776}$	سرعت موج طولی توده سنگ (متر بر ثانیه)
0/975	0/985	0/993	
$y=x^{-2.812}$	$y=x^{-3.439}$	$y=x^{-4.096}$	شاخص سرعت
0/938	0/950	0/953	
$y=x^{0.902}$	$y=x^{1.013}$	$y=x^{1.315}$	تأثیر جهت داری
0/962	0/974	0/980	

## 7. نتیجه گیری

انجام لرزه نگاری انکساری در مناطق مورد مطالعه نیز نشان داد که سرعت میانگین موج طولی در معدن چغارت 1265 متر بر ثانیه، در معدن چادرملو 1342/9 متر بر ثانیه و در معدن سه چاهون 2134 متر بر ثانیه می باشد. از طرفی جهت اندازه گیری خردایش حاصل از آتشیاری از روش پردازش تصاویر رقومی استفاده شد. بدین منظور پس از پردازش 1500 تصویر گرفته شده از سطح کپه های انفجاری، مقادیر میانگین اندازه درصدهای عبوری 30%، 50%، 80% و بزرگترین اندازه به ترتیب 56/5، 128/4، 308/1 و 706/8 میلی متر بدست آمد.

بررسی تغییرات خردایش با توجه به تغییرات خصوصیات توده سنگ نشان داد که با افزایش فاصله داری، تداوم و 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 آتشیاری نیز افزایش می یابد. همچنین با برازش مدل های مختلف بر روی داده ها بهترین روابط موجود بین خردایش و خصوصیات توده سنگ بدست آمد و رابطه ای جهت پیش بینی خردایش با توجه به خصوصیات توده سنگ ارائه شد.

با توجه به تأثیر خصوصیات توده سنگ بر نتایج حاصل از آتشیاری، در این مطالعه اثر این خصوصیات بر توزیع اندازه سنگ های خرد شده در ساختگاه های مورد مطالعه مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. جهت رسیدن به این هدف خصوصیات توده سنگ در 51 بلوک انفجاری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل های آماری نشان می دهد که در کلیه معادن مطالعاتی ناپیوستگی ها عمدتاً دارای تداوم کم، بازشدگی باز، پرکننده رس و فاصله داری متوسط می باشند. ناپیوستگی ها در معدن چغارت به طور عمده دارای سطحی مواج و هموار، در معدن چادرملو دارای سطحی صفحه ای و هموار و در معدن سه چاهون دارای سطحی مواج و هموار هستند.

با توجه با انجام آزمایشات آزمایشگاهی بر روی نمونه های سنگ بکر اخذ شده از هر بلوک انفجاری در معدن مورد مطالعه برای سنگ های باطله بطور متوسط مقاومت تراکمی تک محوری 59/8 مگاپاسکال، مقاومت کششی برزیلی 6/59 مگاپاسکال، سرعت موج طولی 5294/7 متر بر ثانیه و چگالی 2/75 تن بر متر مکعب می باشد. در حالیکه برای ماده معدنی بطور متوسط مقاومت تراکمی تک محوری 25/5 مگاپاسکال، مقاومت کششی برزیلی 3/7 مگاپاسکال، سرعت موج طولی 4693/2 متر بر ثانیه و چگالی 3/25 تن بر متر مکعب می باشد.

## 7. 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، 1392. گزارش فنی تعیین پارامترهای فیزیکی و مقاومتی سنگ بکر بیت شمالی معدن چادرملو.
- شرکت مهندسی کاوشگران، 1370. گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیکی و زمین ساختاری محدوده معدن چغارت.
- شرکت مهندسی کاوشگران، 1378. گزارش نهایی مدل زمین شناسی 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