سومین کنفرانس معادن روباز ایران
۳۱-۲۹ اردیبهشت ماه ۱۳۹۴

پیش‌بینی خردایش ناشی از انفجار در استخراج معادن روباز با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک

احمد مهرابی[۱]، عباس آقاجانی بزازی[۲]، مرتضی دلشاد سیس[۳]
[۱]دانش آموخته ارشد گروه مهندسی معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ahmadmehrabi1987@yahoo.com
[۲]استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران a_aghajani_bazzazi@kashanu.ac.ir
[۱]دانش آموخته ارشد گروه مهندسی معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران Morteza Delshadsis @yahoo.com

چکیده

یکی از اساسی‌ترین مراحل استخراج معدن عملیات چالزنی و انفجار است. برای انجام یک انفجار مناسب، در مرحله اول باید عوامل تاثیرگذار نظیر خصوصیات سنگ، پارامترهای مربوط به ماده منفجره و مشخصات هندسی شبکه انفجار تعیین گردند و سپس الگوی انفجار بهینه بر مبنای این عوامل محاسبه شود. به همین منظور انفجار مطلوب، کاهش هزینه‌های کلی را به دنبال خواهد داشت. در حالی که مدل‌های ریاضی زیادی برای پیش‌بینی ابعاد سنگ‌های خرد شده ارائه شده، اما همچنان عدم تطابق نتایج تئوری و عملی دیده شده است. در این پژوهش، پس از گردآوری اطلاعات در مورد انفجارهای انجام شده در معدن سنگ آهن چادرملو، تصویربرداری و آنالیز تصویری به کمک نرم‌افزار Gold Size انجام گرفت. سپس برای بهینه سازی انفجار وابستگی چهار پارامتر بار سنگ، فاصله ردیفی، خرج ویژه و وزن ماده منفجره در هر چال در معدن سنگ آهن چادرملو مورد بررسی قرار گرفت و برای به دست آوردن بهترین ضریب همبستگی از رگرسیون خطی، غیرخطی و همچنین برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شده است. نتایج به دست آمده در مورد R^2، RMSE و MAPE در رگرسیون خطی به ترتیب ۰/۶۸۲، ۶/۸ و ۱۳/۶۴۸ و در رگرسیون غیر خطی به ترتیب ۰/۷۹۲، ۳/۰۲ و۱۱/۳۷۴ و در برنامه‌ریزی ژنتیک به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۵ و ۴/۶۶ است که در نهایت بهترین نتایج مربوط به برنامه‌ریزی ژنتیک است که می تواند هزینه های کلی معدنکاری را کاهش دهد.

کلمات کلیدی: انفجار، برنامه‌ریزی ژنتیک، خردشدگی، نرم‌افزار Gep، معدن سنگ آهن چادرملو

۱. مقدمه

انفجار از عملیات اصلی معدنکاری است که هدف آن خردشدگی و جابه‌جایی مطلوب توده سنگ است. یک انفجار با خردشدگی مناسب بر کل عملیات استخراج اثر می‌گذارد و باعث کاهش هزینه کلی معدنکاری و افزایش راندمان تولید می‌شود. پیش‌بینی ابعاد سنگ‌های خردشده و تخمین توزیع خردشدگی آن‌ها از فاکتورهای مهم و موثر در انتخاب تجهیزات و عملکرد آن‌ها است (استوار، ۱۳۷۵). خردشدگی مناسب سنگ‌ها در اثر انفجار باعث سهولت در عملیات بارگیری و حمل، کاهش مصرف انرژی در مرحله سنگ‌شکنی اولیه و عدم نیاز به انفجار ثانویه و درنهایت کاهش هزینه‌های تولید خواهد شد. هدف اصلی خرد کردن سنگ‌ها با مواد منفجره در معادن آماده‌سازی آن جهت انجام فرآیندهای آتی و به دست آوردن

محصولی با یک سری مشخصات فنی و ابعاد خاص است. به نحوی‌که سنگ‌های خردشده به‌راحتی توسط وسایل بارگیری و باربری قابل‌حمل بوده و با توجه به کاربرد نهایی مواد استخراجی از درجه خردشدگی مناسبی برخوردار باشند تا نیازی به انفجار ثانویه نباشد. با کنترل ابعاد خردایش در محدوده بهینه، بسیاری از نتایج نامطلوب انفجار کاهش می‌یابد (Lopez، ۱۹۹۵).

برای اولین در سال ۱۹۸۷ ماآرز و همکاران، روش آنالیز تصویری را برای اندازه‌گیری ابعاد بلوک‌های منفجر شده معرفی کردند. در سال ۲۰۰۷ اوزمیر و همکاران از نرم‌افزار Split برای بررسی توزیع سایز ذرات استفاده کرد. (عنایت الهی، ۱۳۸۸). در سال ۲۰۱۳ شای و همکاران از ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی d_{50} استفاده کردند. داده‌ها در ورودی مدل ایشان درزه‌داری، بار سنگ، ضریب پورتودیاکونوف، تاخیر، سرعت انفجار، خرج ویژه، طول گل گذاری و فاصله ردیف چال‌ها است و خروجی ابعاد خردشدگی برای d_{50}است. ایشان مدل شبکه عصبی را با داده‌های واقعی آزمایش کردند و مقایسه نشان داد که این مدل دارای ۷/۸۳ درصد خطاست و سپس به کمک الگوریتم ژنتیک این مدل بهینه شده و پس از آزمایش مجدد میزان خطای حاصل به ۳ درصد کاهش یافت (Raina، ۲۰۱۳).

۲. داده ها و روش تحقیق

با توجه به مفاهیم نظری مورد بحث در بخش پیشین، گام‌های اجرای تحقیق حاضر به شرح زیر در دستور کار قرار گرفتند:

گام اول: جمع‌آوری اطلاعات و داده‌ها از معدن و به روز رسانی آن‌ها

گام دوم: پیاده‌سازی اطلاعات در نرم‌افزارهای Excel و SPSS و انتخاب بهترین ضریب همبستگی بین داده‌ها موجود

گام سوم: پیاده‌سازی داده‌های انتخابی بر اساس بالاترین ضریب همبستگی به منظور فرمول نویسی رگرسیون خطی و به دست آوردن R^2 مجموع، RMSE و MAPE

گام چهارم: اجرای مرحله قبل به منظور فرمول نویسی رگرسیون غیرخطی و به دست آوردن R^2 مجموع، RMSE و MAPE

گام پنجم: داده‌های انتخابی بر اساس بالاترین ضریب همبستگی در نرم‌افزار Gep پیاده‌سازی شده است و R^2 مجموع، RMSE و MAPE به دست آورده شده است.

گام ششم: مقایسه ضریب همبستگی به دست آمده در مراحل قبل و انتخاب بهترین روش موجود

گام هفتم: تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده

۳. معدن سنگ‌آهن چادرملو

کانسار آهن چادرملو در حال حاضر، بزرگ‌ترین کانسار آهن در ایران است که عملیات اکتشاف تفصیلی در آن به پایان رسیده و در مرحله بهره برداری قرار گرفته است. کانسار آهن چادرملو که در منطقه آهن خیز بافق – ساغند قرار دارد، دارای مختصات جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۵ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی می‌باشد. این کانسار در استان یزد و در فاصله ۱۸۰ کیلومتری شرق- شمال شرق شهر یزد و ۶۵ کیلومتری شمال شهرستان بافق و ۵۰ کیلومتری شمال معدن چغارت قرار دارد (شکل ۱).

شکل ۱: نمایی از معدن سنگ آهن چادرملو

۴. تحلیل داده‌ها

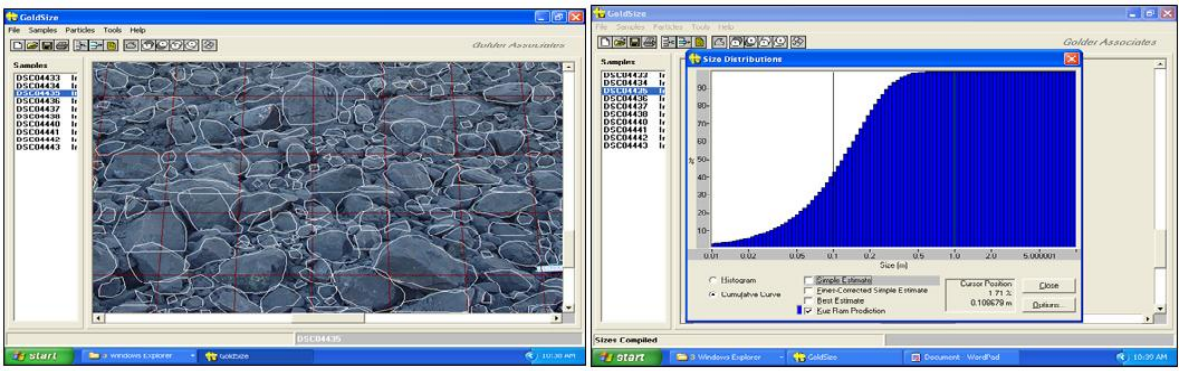
واژه رگرسیون از لحاظ لغوی به معنی پسروی و بازگشت تعریف شده است. در حقیقت تحلیل رگرسیونی، فن و روشی آماری برای بررسی و مدل‌سازی ارتباط بین متغیرها است. رگرسیون تقریبا در هر زمینه‌ای از جمله مهندسی، فیزیک، اقتصاد، مدیریت، علوم زیستی و علوم اجتماعی برای برآورد و پیش‌بینی مورد نیاز است. می‌توان گفت تحلیل رگرسیونی، پرکاربردترین روش در بین روش‌های آماری است. نمایی کلی و خلاصه شده از یک تحلیل رگرسیونی ساده به این صورت می‌باشد که در ابتدا تحلیل‌گر حدس می‌زند که بین دو متغیر نوعی ارتباط وجود دارد، در حقیقت حدس می‌زند که یک رابطه به شکل یک خط بین دو متغیر وجود دارد و سپس به جمع‌آوری اطلاعات کمی از دو متغیر می‌پردازد و این داده‌ها را به صورت نقاطی در یک نمودار دو بعدی رسم می‌کند (http://en.wikipedia).

در این پژوهش، از روش آنالیز تصویری جهت اندازه‌گیری ابعاد سنگ پس از انفجار استفاده شده است. به این منظور، ابتدا تصاویری از سنگ خرد شده حاصل از انفجار تهیه شده و پس از دیجیتایز کردن تصاویر و تحلیل آن‌ها توسط نرم‌افزار آنالیز تصویری Gold size نمودارهای دانه‌بندی ترسیم شده است. انجام دانه بندی در این روش نیاز به نمونه برداری از حجم زیاد ندارد و تنها با گرفتن تصاویری از خردایش می‌توان با دقت بیشتر و صرف وقت و هزینه کمتر، توزیع دانه‌بندی سنگ حاصل از انفجار را به دست آورد.در شکل ۲ تصویری از یک جبهه کار انفجار شده در معدن چادرملو مشاهده می‌شود. از این جبهه کار، تعداد زیادی تصویر به کمک دوربین دیجیتال تهیه شد. با ورود تصاویر به نرم‌افزار Gold size و دیجیتایز نمودن آن‌ها نمودارهای مربوط به دانه‌بندی هر تصویر به دست آمد. با ترکیب این نمودارها به کمک نرم‌افزار، نمودار دانه‌بندی این بلوک تعیین گردید.

۵. بحث و بررسی

در این حالت روابط تجربی حاکم میان پارامترهای چالزنی و انفجار بر اساس ۷۸ داده اخذ شده از معدن و d_{80} محاسبه شده مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از نرم‌افزار Excel و داده‌های موجود، نمودارها و روابط خطی میان تک‌تک

داده‌های چالزنی و d_{80} ترسیم شده است. پس از رسم نمودارها میان تک‌تک داده‌های چالزنی و d_{80}، ضریب‌های همبستگی گوناگونی به دست آمده است که به بررسی آن‌ها در جدول ۱ پرداخته شده است.



شکل .Error! No text of specified style in document**۲: تصویر دیجیتایز شده توده کانسنگ خرد شده چادرملو**

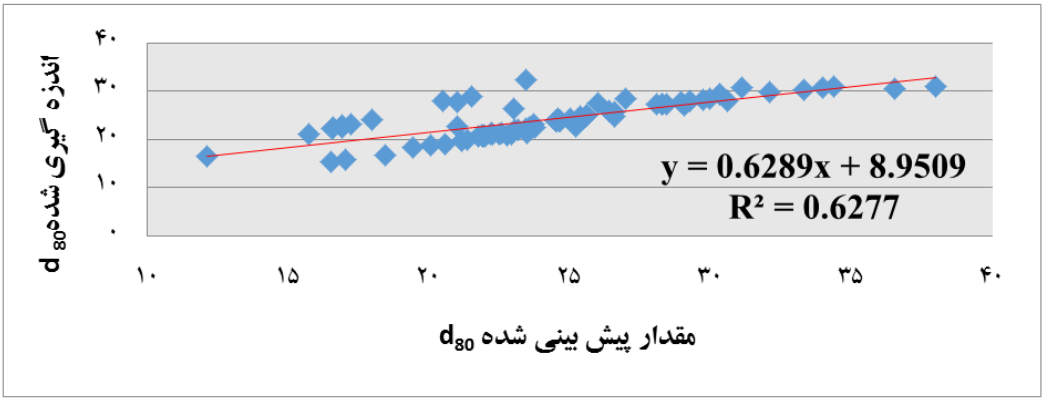
جدول ۱: بررسی ضریب همبستگی پارامترهای مختلف و d_{80}

نام پارامتر	علامت اختصاری	ضریب همبستگی خطی R^2
ارتفاع پله	H	۰/۰۲۷۲
خرج ویژه	**Q**	**۰/۵۸۵۳**
وزن ماده منفجره در هر چال	**q**	**۰/۲۸۵۸**
طول کل خرج	L	۰/۰۰۶۷
طول خاک‌ریزی	T	۰/۰۰۵۳
حفاری ویژه	Sd	۰/۰۲۹۵
فاکتور خردشدگی	Powder Factor	۰/۰۱۶۶
بار سنگ	**B**	**۰/۲۳۹۱**
فاصله ردیفی	**S**	**۰/۲۷۷۳**
نسبت فاصله ردیفی به بار سنگ	S/B	۰/۰۱۰۲

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۱ در ادامه تنها پارامترهایی که ضریب همبستگی بهتری نشان داده‌اند (q,Q,B,S) مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۵-۱. نتایج رگرسیون خطی با نرم‌افزار SPSS

سپس با به دست آوردن پارامترهایی که ضریب همبستگی بالایی دارند (q,Q,B,S)، داده‌های این ۴ پارامتر را در نرم‌افزار SPSS وارد کرده و از این ورودی‌ها یک رگرسیون خطی گرفته شده است که خروجی‌های زیر حاصل شده است.



شکل ۳: نمودار رابطه بین d_{80} پیش‌بینی شده با فرمول و همچنین d_{80} اندازه‌گیری شده

۵-۲.روابط غیرخطی

سپس با مشاهده خروجی‌های نرم‌افزار SPSS، پارامترهایی که ضریب همبستگی بالایی را نشان می‌دهند را انتخاب کرده و روابط غیرخطی بین آن‌ها نوشته شده است (جدول ۲).

جدول۲: بهترین نتایج حاصل از روابط غیرخطی

پارامتر	رابطه	ضریب همبستگی
B	$d_{80}=(-71.299)+23.660B-0.201B^3$	۰/۲۸۳
S	$d_{80}=2.806\ S^{1.110}$	۰/۳۰۲۶
q	$d_{80} = 74.352-93.792q+58.366q^2-13.217q^3$	۰/۶۱۸
Q	$d_{80} = 63.88-0.107Q+(1.05\times10\text{-}7)Q^3$	۰/۳۴۳۴

۵-۳. روابط بدست آمده از نرم‌افزار Gep

برنامه‌ریزی ژنتیک، روشی است که رایانه‌ها را قادر می‌سازد تا به حل مسایل بپردازند. بدون آن که به‌طور صریح برای آن برنامه‌ریزی انجام شده باشد. برنامه‌ریزی ژنتیک روشی از الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد که در آن هر عضو جمعیت یک برنامه رایانه‌ای است (Monjezi و همکاران، ۲۰۱۰). نرم‌افزار Gep نرم‌افزاری است که نسبت به GP که برنامه‌های با شکل‌ها و اندازه‌های متفاوت را با کروموزوم‌های خطی با طول ثابت کد می‌کند، گسترش یافته‌تر است. این نرم‌افزار توسط Candida

Ferreira توسعه یافته است. بیان ژن‌های برنامه‌نویسی در این نرم‌افزار مشابه الگوریتم ژنتیک و الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیک است که در آن جمعیتی مطابق با تناسب انتخاب می‌شوند و متغیر ژنتیکی با استفاده از یکی یا بیشتر از عملگرها معرفی می‌شود. تفاوت اساسی این سه الگوریتم در ماهیت فردی هر یک از آن‌ها است.

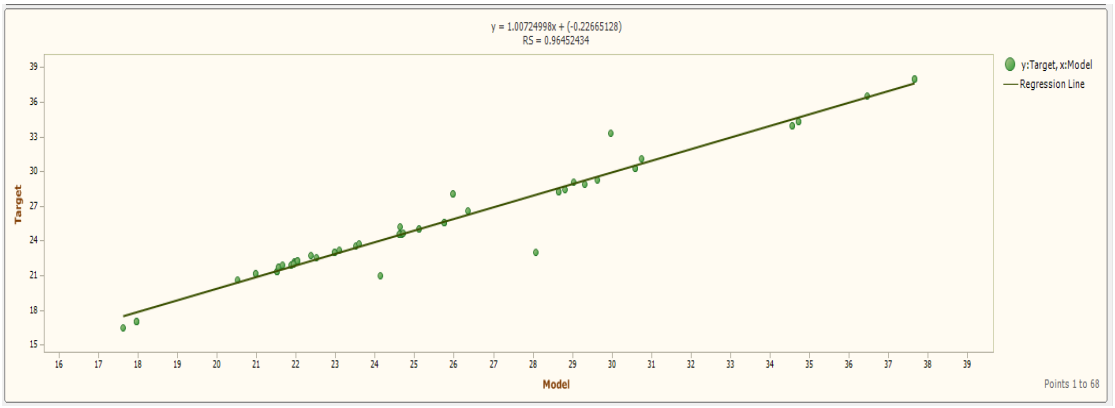
در Gep افراد رشته‌های خطی با طول ثابت هستند و کدگذاری می‌شوند (ژنوم یا کروموزوم) که سپس به‌صورت نهاده-های غیرخطی با شکل‌ها و سایزهای مختلف بیان می‌شوند که روابط بدست آمده از این الگوریتم به شرح زیر است:

$$d_{80}= \left|1-(\ln q)^{\frac{1}{5}}\right| + \left|\left[\left(\frac{B}{q}\right)-B\right]+4.44\right| \quad (۱)$$

$$d_{80}= \frac{1}{q^2} \quad (۲)$$

$$d_{80}= \left|\frac{(|(-10.774)+(-10774))-(-2.778)|)}{q}-q\right|+B \quad (۳)$$

$$d_{80}= \left|\left[\frac{1}{((S)+(-4.006))\times q}\right]^2-q\right| \quad (۴)$$



شکل۴: نمودار خروجی نرم‌افزار Gep

۶. نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از اجرای روش‌های فوق به قرار زیر است:

۱) در رگرسیون خطی برای به دست آوردن بهترین R^2 ، پارامترهای (S,B,Q_b,q) مورد بررسی قرار گرفت و بهترین نتایج شامل R^2= ۰/۶۸۲ و RMSE= ۶/۸ و MAPE=۱۳/۶۴۸ است. در رگرسیون غیرخطی با در نظر گرفتن همان ۴ پارامتر قبلی (S,B,Q_b,q)، نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار گرفت و بهترین نتایج شامل

R^2=۰/۷۹۲ و RMSE=۳/۰۲ و MAPE=۱۱/۳۷۷ است. در Gep که شاخه‌ای از برنامه‌ریزی ژنتیک است با در نظر گرفتن همان ۴ پارامتر قبلی (S,B,Q_b,q)، نتایج به دست آمده شامل R^2=۰/۹۸ و RMSE=۰/۹۵ و MAPE=۴/۶۶ است. ملاحظه می گردد که در بین این سه روش، نتایج حاصل از برنامه ریزی ژنتیک نسبت به سایر روشها از اعتبار بیشتری برخوردار هستند.

۲) نتایج حاصل از این پژوهش در مورد سنگ آهن چادرملو از اعتبار و صحت بالایی برخوردار هستند و پیشنهاد می شود که سایر محققین با بررسی بیشتر بر روی سایر معادن سنگ آهن ایران به یک رابطه کلی در زمینه پیش بینی ابعاد خردایش حاصل از انفجارهای تولیدی معادن روباز دست یابند.

۷. منابع

استوار، ر. (۱۳۷۵)، **آتش‌کاری در معادن**، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیر کبیر.

عنایت الهی، ا. (۱۳۸۸)، **پیش بینی خردایش حاصل از انفجار با استفاده از شبکه‌های عصبی و رگرسیون خطی چند متغیره (مطالعه موردی در معدن سنگ آهن گل گهر)**، پایان نامه جهت دریافت مدرک کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده تحصیلات تکمیلی

Lopez, C. 1995. Drilling and Blasting of Rocks, **A.A. Balkema**

Monjezi, M., Goshtasbi, K., Amiri, H., Farrokhi, A. 2010. Prediction of Rock FragmentationDue to Blasting in Sarcheshmeh Copper Mine Using Artificial Neural Networks, Springer**, Geotech Geol Eng (2010) 28:423–430** .

Raina, A. K.2013. A history of digital image analysis technique for blast fragmentation assessment and some Indian contributions, Measurement and Analysis of Blast Fragmentation – Sanchidrián & Singh (Eds**), 2013 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62140-3**

Wikipedia, 2006, the free encyclopedia, GNU Free Documentation License, http://en.wikipedia.org http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_coal_mining, 2006-08-03 visited.

Rock fragmentation prediction in open pit mines by genetic programming

Ahmad Mehrabi [1], Abbas Aghajani Bazzazi[2], Morteza Delshadsis [3]

[1]*Department of mining engineering, South Tehran branch, Islamic Azad Universtity, Tehran, Iran*
ahmadmehrabi1987@yahoo.com

[2]*Department of mining engineering, University of Kashan, Kashan, Iran*
a_aghajani_bazzazi@kashanu.ac.ir

[3]*Department of mining engineering, South Tehran branch, Islamic Azad Universtity, Tehran, Iran*

Mortezadelshadsis @yahoo.com

Abstract
One of the most critical phases of mining operation are drilling and blasting. At the first step, the effective factors such as rock properties, explosive and geometric properties of the blast design should be specified to perform a proper blasting. Then, optimized blast pattern should be calculated based on these factors. Therefore, the optimal blasting will lead to the reduction of overall costs. While many mathematical models proposed for rock fragmentation prediction up to now, but still there is a mismatch between theoretical and experimental results. In this study, after gathering the information about the blasting conducted in Chadormalou iron ore mine, image analysis was used by GoldSize software. Then, for blasting optimization, dependence of the four parameters such as burden, spacing, especial charge and weight of the charge in the blasthole in the Chadormalou iron ore were investigated and the best correlation coefficient of linear and nonlinear regression and the genetic programming was calculated. The obtained results for R^2, RMSE and MAPE in linear regression are 0.682, 6.8 and 13.648 respectively, in nonlinear regression method, 0.792, 3.02 and 11.374 and finally in the genetic programming are 0.98, 0.95 and 4.66 respectively. Finally the best results are in terms of genetic programming which causes a reduction in the overall costs in the mining.

Key words: blasting, fragmentation, genetic programming, Gep software, Chadormalou iron mine