

پیش بینی لرزش زمین، ناشی از آتشکاری در معادن به کمک روابط تجربی - ژئومکانیکی (مطالعه موردی معادن آهک سیمان شاهرود و مس سرچشمه)

مهدي مرتضايي^۱، سيداحمد ابوالقاسمي فر^۲، محمد تاجي^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود

^۲ دکتری مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود

^۳ دکتری مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود

نام نویسنده مسئول:

مهدي مرتضايي

چکیده

تعدادی فرمول و روش تجربی در رابطه با تحلیل اثرات لرزش زمین پیشنهاد شده که مختص یک محل هستند و توانایی در نظر گرفتن پارامترهای متنوع را ندارند. هدف پژوهش، ارائه مدل هایی بمنظور برآورد لرزش زمین ناشی از انفجار در سازندهای زمین شناسی مختلف می باشد. اطلاعات مرتبط با ۱۹۶ انفجار، گردآوری شده و به منظور ارائه یک رابطه تجربی از پارامترهای مرتبط با خصوصیات توده سنگ استفاده شده است. از اعتبارسنجی مدل های پیشنهادی با اطلاعات مربوط به معادن آهک سیمان شاهرود و مس سرچشمه، نتیجه گیری شد که این مدل ها دارای بیشترین همبستگی با اطلاعات معادن ایران هستند.

کلمات کلیدی: لرزش زمین، آتشکاری در معادن، روابط تجربی- ژئومکانیکی، معدن آهک شاهرود، معدن مس سرچشمه.

۱- مقدمه

لرزش زمین در اثر انفجار از مشکلات اساسی در صنعت معدنکاری می باشد. فرآیند انفجار توسط پارامترهای گوناگون کنترل می شود که لحاظ کردن تمام این پارامترها در یک رابطه کلی نامقدور است، زیرا تاثیر بعضی از این عوامل هنوز به طور کامل شناخته نشده است. پیش بینی لرزش زمین باعث کاهش خسارت ناشی از انفجار می شود. پارامترهای تاثیرگذار بر شدت لرزش ها به دو گروه تقسیم می شوند. گروه اول پارامترهای طراحی انفجار (خرج ویژه، شرایط چال، الگوی آشکاری و غیره) و گروه دوم پارامترهای زمین شناسی منطقه و مشخصه های توده سنگ است. شرایط زمین شناسی و خصوصیات توده سنگ که بر لرزش ناشی از انفجار موثر اند، عبارتند از: شرایط آب زیرزمینی، ناپیوستگی ها (جهت، دهانه، وضعیت و فراوانی آن ها)، ویژگی های سنگ (نوع، وزن مخصوص، مقاومت، درزه ها، لایه بندی و شیب لایه ها)، شاخص کیفی سنگ، امتیاز توده سنگ و سایر مشخصات فیزیکی و خواص ژئومکانیکی توده سنگ. لازم به ذکر است علاوه بر پارامترهای ذکر شده مواردی همچون انتشار امواج در سطح و داخل زمین، فرکانس لرزش، فاصله از محل انفجار و روش شروع انفجار نیز بر لرزش ناشی از انفجار موثر اند [۱،۲].

لحاظ کردن اثر توده سنگ با ترکیب چند پارامتر به صورت کیفی در فرمول های متداول PPV، انجام گرفته است. تاثیر مشخصه هایی مانند وزن مخصوص، مقاومت فشاری تک محوره، شاخص کیفیت سنگ، شاخص مقاومت زمین شناسی، امتیاز کیفی توده سنگ و ناپیوستگی ها و ساختار زمین شناسی بر مدل پیش بینی کننده PPV به ندرت لحاظ شده است. اغلب معادلات تجربی برای یک نوع سنگ و شرایط آشکاری خاص (منطقه های خاص)، ارائه شده، تعمیم آن ها امکان ناپذیر است و این معادلات جامع نیستند، بنابراین به توسعه مدلی برای PPV جهت رفع این نواقص نیاز می باشد. طبقه بندی کارهای تحقیقاتی قبلی نشان می دهد، پژوهش ها حول سه محور اثر سازندهای زمین شناسی مختلف، اثر ناپیوستگی ها و اثر مشخصه های کیفی سنگ می باشد. در بررسی اثر ناپیوستگی ها موارد مهم ذکر شده عبارتند از: دهانه، تعداد ناپیوستگی ها و زاویه رخداد امواج شوک نسبت به ناپیوستگی [۱،۲]. هدف از این پژوهش ارائه یک مدل تجربی برای PPV با در نظر گرفتن طیف گسترده ای از انفجارها در سنگ های مناطق مختلف است. این معادلات پیش بینی کننده لرزش با لحاظ کردن پارامترهای توده سنگ در معادن روباز ایران انجام گرفته است و دربرگیرنده انواع توده سنگ با شرایط بسیار متنوع کیفیتی و ساختاری است تا برای پرسنل آشکاری و ژئوتکنیک در هر موقعیت زمین شناسی مفید باشد. داده های موجود عبارتند از ۱۹۶ انفجار در پله های معادن روباز مرتبط با ۹ سایت مطالعاتی که عبارتند از: سنگ آهن چادرملو [۳]، مس سرچشمه [۴]، طلای موده [۵،۶]، مس سونگون [۷،۸]، آهن چغارت [۹]، معادن آهک کردستان و شاهرود [۱۰].

۲- اثر کیفیت توده سنگ بر لرزش ها

پارامترهایی که بر خواص لرزش تاثیر می گذارند، همان مواردی هستند که بر نتیجه انفجار تاثیر گذارند. این پارامترها به دو گروه تقسیم می شوند: پارامترهایی که آشکار می تواند آنها را کنترل کند و پارامترهایی که از کنترل استفاده کنندگان آن خارج است. میزان لرزش زمین و ساختارهای مجاور عملیات آشکاری به عواملی وابسته است که عبارتند از: روش ساخت و ساز ساختارهای مجاور، محیط خاک و سنگ، ناهمگن بودن خاک و سنگ منطقه، فاصله از محل انفجار، ویژگی های انتشار موج در محل، ویژگی های دینامیکی خاک و سنگ منطقه، خصوصیات شکستگی های منطقه و میزان سایت ساختارها. کیفیت سنگ بر لرزش های ناشی از انفجار در پله های معادن روباز و میزان خسارت ناشی از انفجار موثر است. برای بررسی اثر کیفیت سنگ از سیستم های طبقه بندی توده سنگ استفاده می شود. برای این منظور استفاده از رده بندی شاخص کیفیت توده سنگ و رده بندی ژئومکانیکی توده سنگ توصیه شده است. لرزش ناشی از انفجار بر روی توده سنگ دو نوع اثر دارد: اول تاثیر بر یکپارچگی سنگ و پارامترهای مقاومتی آن و دوم باعث ریزش دیواره یا شیب با ورود عامل بی ثبات کننده می شود [۱،۲].

تحلیل داده های PPV ثابت کرده است که با کاهش کیفیت توده سنگ، دامنه لرزش ها کاهش می یابد. همچنین افزایش امتیاز توده سنگ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیک توده سنگ میزان لرزش ها را تقویت می کند. یک ارتباط قوی بین گستره فرکانس و کیفیت توده سنگ وجود دارد. توده سنگ با کیفیت پایین تر، فرکانس لرزش کمتری ثبت می نماید. هر چه توده سنگ دارای کیفیت بالاتری باشد، میرایی امواج و جذب انرژی در آن کمتر است و امواج با کمترین افت از داخل آن عبور می کنند. به عنوان مثال، برای مقدار خرج ثابت به ازای هر تاخیر، توده سنگ های درزه دار با بازشدگی زیاد مانع لرزش زمین می شوند، در حالی که سنگ های با کیفیت خوب و درزه های جوش خورده اجازه می دهند که لرزش های زمین فواصل خیلی طولانی را طی کنند. شکاف های حاصل از انفجارهای کنترل شده مانند پیش شکافی موجب می شوند تا لرزش های زمین حدود ۸۰ الی ۹۰ درصد کاهش یابند. در ساختارهای زمین شناسی پیچیده، انتشار امواج در جهات مختلف تغییر می کند. در مواردی که لایه های سخت با روباره ای از خاک پوشیده شده اند، این مسئله در میزان شدت و فرکانس نوسانات موثر است. خاک، معمولاً دارای مدول الاستیسیته کمتری نسبت به سنگ است به همین دلیل سرعت انتشار امواج در این نوع مواد کاهش می یابد. همچنین با ضخیم تر شدن روباره خاکی، جابه جایی به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

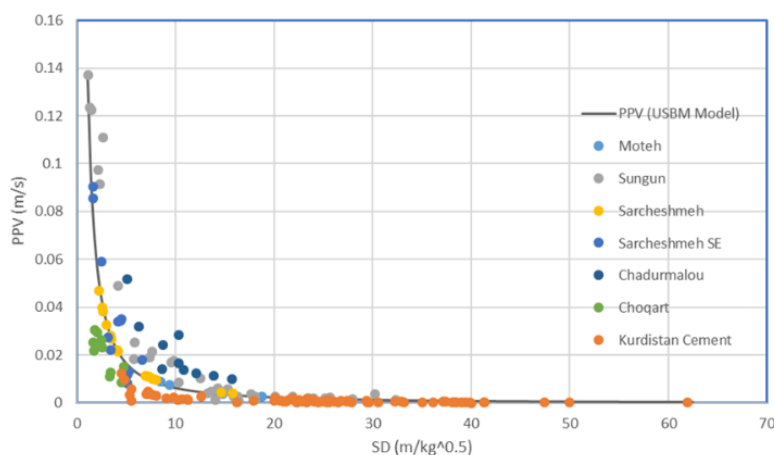
در صورت وجود روباره خاکی، با افزایش فاصله، بزرگی نوسانات به سرعت کاهش می یابد. علت آن است که قسمت اعظم انرژی صرف غلبه بر اصطکاک میان ذرات و جابه جا کردن آنها می شود. مواد سطحی حرکت امواج را تغییر می دهند و باعث می شوند تا امواج، طول موج بیشتر و فرکانس کمتری داشته باشند و بنابراین باعث افزایش واکنش و پتانسیل تخریب در ساختمان های مجاور می شوند [۱،۲].

۳- معادلات پیش بینی کننده لرزش ها

حداکثر سه مدل برای پیش بینی لرزش ها و معادلات مربوط به آنها در ادامه به تفکیک نشان داده شده است.

۳-۱- مدل PPV پیشنهادی بر مبنای معادله USBM

بعد از گردآوری داده های لرزه ای از سایت های تحقیقاتی مختلف، نخستین مدل پیشنهادی از برازش این داده ها مطابق با فرمول اداره معادن آمریکا USBM برای انفجارات سطحی بدست آمد. مطابق شکل ۱ داده های گردآوری شده، بازه وسیعی از فاصله مقیاس حداکثر تا 62 m/kg0.5 و سرعت ذره ای حداکثر تا 140 mm/s را در برمی گیرد.



شکل ۱: برازش معادله USBM سرعت ذره ای بر ۱۷۳ داده انفجاری از ۷ سایت مطالعاتی

از برازش این ۱۷۳ داده بر معادله فوق، رابطه ۱ به صورت زیر حاصل شده است:

$$PPV = 0.155 SD^{-1.386} \quad R^2 = 0.718 \quad (1)$$

که در آن SD فاصله مقیاس شده بر مبنای ریشه دوم حداکثر خرج در هر تاخیر می باشد.

۳-۲- مدل PPV پیشنهادی بر مبنای UCS

ایده اولیه این بخش از معادله ارائه شده توسط کومار و همکاران [۱۱] گرفته شده که از ترکیب تعداد بسیار زیاد داده انفجاری که در برگیرنده ۱۰۸۹ رویداد ثبت شده لرزه ای از سراسر دنیا گردآوری شده بود، رابطه ای را برای ترکیب های متفاوت خواص سنگ ارائه دادند. با انجام تست های مختلف آزمون و خطا مشاهده شده است که برخی از این معادلات بر مبنای UCS و وزن مخصوص، از ضریب همبستگی بیشتری برخوردارند. نتایج برازش داده های ۷ سایت مطالعاتی با فرمت معادله کومار در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول مشاهده می شود که توان های مربوط به UCS (a) و SD (b) بسته به شرایط زمین شناسی مناطق متفاوت است. از این معادلات، میانگین وزنی توان ها محاسبه و به عنوان مقادیر نهایی در نظر گرفته شد. منظور از میانگین های وزنی این است که تعداد رویداد انفجار در محاسبه مقدار میانگین لحاظ شده است.

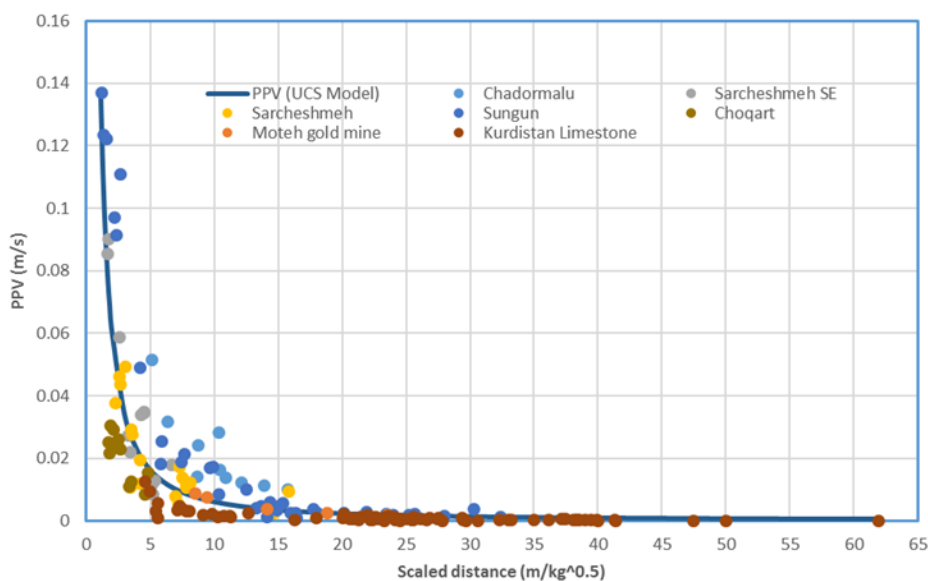
جدول ۱: اطلاعات اولیه

تعداد داده های انفجار	$PPV = \sigma_c^a \times SD^b / \gamma$			ویژگی های سنگ		نوع ماده معدنی و معدن
	R ² (%)	b	a	UCS(Mpa)	Y(KN/m3)	
۱۰	۸۵.۳	-۱.۴۷۹	۰.۵۸۳	۱۰۰	۲۷	سنگ آهن چادرملو
۱۲	۸۹.۴	-۱.۳۴۵	۰.۴۳	۳۲.۸	۲۵.۶	جنوب شرق مس سرچشمه
۵	۹۹.۹	-۱.۱۵۵	۰.۴۵۱	۵۴.۶	۲۴.۷	طلای موته
۱۸	۷۳.۶	-۱.۲۴۹	۰.۶۱۸	۴۴.۵	۲۶	مس سرچشمه
۳۷	۹۳.۳	-۱.۰۴۵	۰.۳۶۷	۶۳.۴	۲۵	مس سونگون
۷۸	۷۶.۶	-۱.۷۹۳	۰.۲۸۹	۵۹	۲۴.۵	آهک کردستان
۱۳	۶۵.۶	-۰.۸۲۳	۰.۰۸۲	۴۸.۷	۳۰.۸	سنگ آهن چغارت
۱۷۳	-۱.۴۴۷	۰.۳۵۶		میانگین وزنی		

براساس داده‌های تجربی جمع‌آوری شده، مدل تجربی زیر با ضریب تعیین ۰/۷۱۷ برای PPV در این مطالعه بدست آمده است (رابطه ۲).

$$PPV = \frac{UCS^{0.356} SD^{-1.447}}{\gamma} \quad R^2 = 0.717 \quad (2)$$

منحنی پیش‌بینی کننده مقادیر PPV توسط این مدل به همراه داده‌های تجربی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: برازش سرعت ذره ای براساس مقاومت فشاری و دانسیته

۳-۳- مدل PPV پیشنهادی بر مبنای RMR

ارشد نژاد و همکاران [۱۲]، اثر شرایط توده سنگ را بر روی PPV با یک مدل تجربی و با احتساب میرایی مواد بررسی کردند و یک رابطه تجربی را برای پیش‌بینی PPV که کیفیت توده سنگ را نیز شامل می‌شود، پیشنهاد کردند. ایده اولیه مدل این بخش از همین کار تحقیقاتی گرفته شده است. بر این اساس، برازش دیگری به کمک نرم افزار بر روی ۱۷۳ داده گردآوری شده از ۷ سایت مطالعاتی انجام و در نهایت به رابطه ۳ به صورت زیر منجر شد:

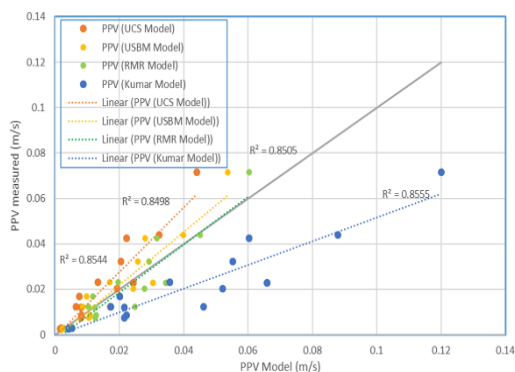
$$PPV = RMR^{0.509} \times SD^{-1.414} \times \exp(0.018 \times SD) \quad R^2 = 0.737 \quad (3)$$

۴- ارزیابی مدل های پیشنهادی و رتبه بندی آن ها

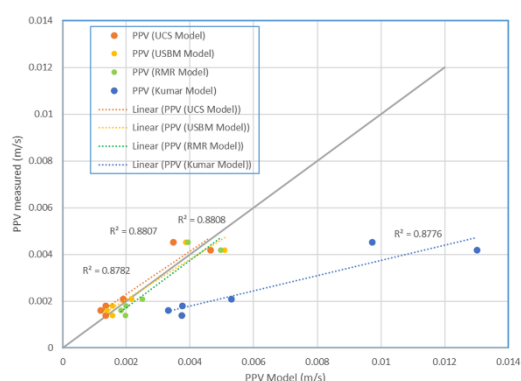
سایت های انتخابی برای ارزیابی مدل معادن آهک سیمان شاهرود [۱۰] و مس سرچشمه [۴] می باشند. در معدن آهک سیمان شاهرود برای داده های لرزه ای، مقادیر سرعت ذره ای از 5 mm/s فراتر نمی رود. به منظور بررسی یک بازه وسیع تر، از داده های لرزه ای ثبت شده در ناحیه جنوب غرب معدن مس سرچشمه که سرعت ذره ای تا 72 mm/s ثبت شده، کمک گرفته شده است. کارهای تحقیقاتی نشان می دهد که گستره سرعت ذره ای ثبت شده در معادن به ندرت از این حد فراتر می رود. شاخص های آماری مدل های UCS، USBM، RMR و مدل پیشنهادی کومار مشتمل بر ۱۰۸۹ داده برای معدن آهک سیمان شاهرود محاسبه شده است. در جدول ۲ رتبه بندی مدل های پیشنهادی و مدل کومار به همراه معیارهای آماری نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳ سرعت ذره ای مدل های پیشنهادی و مدل کومار با مقادیر ثبت شده میدانی و در شکل ۴ مقادیر PPV پیش بینی شده و واقعی داده های آزمون برای معدن آهک شاهرود و بلوک جنوب غرب معدن مس سرچشمه مقایسه شده است.

جدول ۲: معیارهای آماری و رتبه بندی مدل های پیشنهادی و مدل کومار

معدن	Model	MAPE	RMSE	MAD	R ²	مجموع
معدن آهک سیمان شاهرود	USBM	۳	۱	۱	۱	۷
	UCS	۲	۳	۲	۱	۱۰
	RMR	۱	۲	۳	۱	۱۰
بلوک جنوب غرب مس سرچشمه	Kumar et al	۴	۴	۴	۱	۱۷
	USBM	۲	۲	۲	۱	۸
	UCS	۳	۳	۳	۱	۱۲
	RMR	۱	۱	۱	۱	۷
	Kumar et al	۴	۴	۴	۱	۱۷

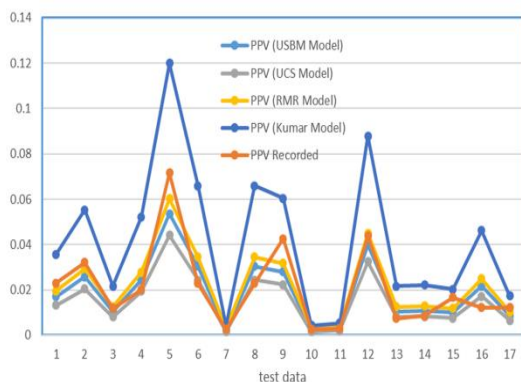


ب

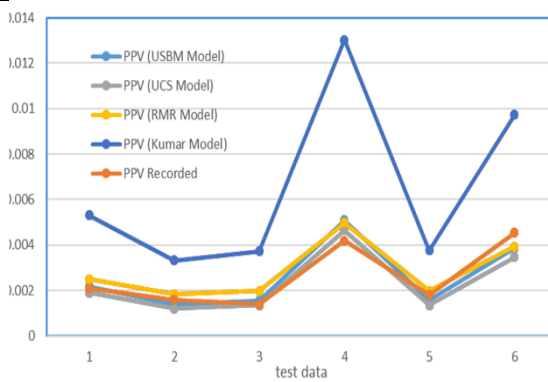


الف

شکل ۳: مقایسه سرعت ذره ای از مدل های پیشنهادی و مدل کومار با مقادیر ثبت شده میدانی برای معدن آهک شاهرود و بلوک جنوب غرب معدن مس سرچشمه



ب



الف

شکل ۴: مقایسه مقادیر PPV پیش بینی شده و واقعی داده های آزمون معدن آهک سیمان شاهرود و بلوک جنوب غرب معدن مس سرچشمه

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

بر اساس پژوهش، سه مدل تخمین سرعت ذره ای مبتنی بر ریشه دوم خرج مصرفی (USBM)، مقاومت تک محوره سنگ (UCS)، وزن مخصوص و نیز امتیاز کیفی توده سنگ پیشنهاد شد. پیش بینی های صورت گرفته از ۳ مدل دارای حداکثر ضریب تعیین و حداقل مربع خطاهای استاندارد است، همچنین اختلاف بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر ثبت شده تجربی کم می باشد. برای سرعت لرزه ای کم و جزئی، ۳ مدل پیشنهادی و مدل کومار از دقت مناسبی در تخمین PPV برخوردارند. برای مقادیر بالای سرعت ذره ای، استفاده از مدل های RMR و USBM ارجحیت دارد. تعمیم دادن معادله پیش بینی لرزش ناشی از انفجار به کل معادن کشور بر اساس نتایج صحت سنجی مدل ها مثبت ارزیابی می شود. مدل های پیشنهادی می تواند برای پرسنل معدنکار و لرزه نگاران مورد استفاده قرار گیرد. در صورت عدم دسترسی به داده های تجربی در یک منطقه، این مدل ها می تواند برای پیش بینی پارامترهای لرزش ناشی از انفجار و نیز برنامه ریزی و طراحی عملیات انفجار مفید باشد. پیشنهاد می شود تعداد بیشتری اطلاعات لرزه ای و ژئومکانیکی از معادن روباز ایران گردآوری شده و دقت مدل های پیشنهادی ارتقا یابد، همچنین امکان اضافه کردن دیگر خصوصیات از جمله شاخص کیفی سنگ و شاخص مقاومت زمین شناسی به معادلات پیشنهادی وجود دارد.

تشکر و قدردانی

این مقاله از پایان نامه اینجانب، مهدی مرتضایی استخراج شده است. از زحمات اساتید محترم و همچنین مهندس سیدمهران سیدمجرد ثمرین به جهت راهنمایی های علمی و نگارشی برای هر چه بهتر شدن این مقاله و پایان نامه کمال تشکر و قدردانی را دارم.

- ۱- استوار، رالف، آتشکاری در معادن، جلد اول، انتشارات جهاد دانشگاهی امیرکبیر، چاپ اول، ۱۳۷۰.
- ۲- استوار، رالف، آتشکاری در معادن، جلد دوم، انتشارات جهاد دانشگاهی امیرکبیر، چاپ دوم، ۱۳۷۷.
- 3- Akbar, M., Lashkaripoor G., Ghafouri M., Yarahmadi Bafghi M., "Assessment and Classification of Rock Mass Properties in Iran Central Iron Ore Mines", Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, Vol 4, P143-148, 2014.
- 4- Bahadori M., Bakhshandeh Amnieh H., Vahidpour S.M. "Prediction of blasting vibration in Sarcheshmeh copper mine using GA algorithm", 1st Iranian Applied Blasting, Volume: 1. 2010.
- ۵- مقدم علی، ح. و خواجه پور، پ.، "تعیین حداکثر خرج مجاز آتشیاری در معادن روباز براساس پارامترهای لرزش زمین و هوا، مطالعه موردی معدن طلای موته"، چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تهران، تهران، صفحه ۲۵۰-۲۵۹، ۱۳۹۱.
- ۶- معارف وند، پ.، "گزارش آزمایشات مکانیک سنگی جهت تخمین خواص مکانیکی و فیزیکی سازندهای سنگی معدن چاه خاتون شرقی مجتمع موته"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۶.
- ۷- فخامتی، ف.، تلخابو، م. و شمسی، ح.، "ارزیابی خصوصیات مقاومتی سنگ های معدن مس سونگون با استفاده از تخمین به روش غیرمستقیم"، نخستین کنگره بین المللی علوم زمین، ۱۳۹۲.
- 8- Alipour A., Mokhtarian M., Sharif J., "Artificial Neural Network or Empirical Criteria, A Comparative Approach in Evaluating Maximum Charge per Delay in Surface Mining - Sungun Copper Mine", JOURNAL GEOLOGICAL SOCIETY OF INDIA Vol.79, pp.652-658, 2012.
- ۹- گنجعلی وند، م.، "تخمین لرزش زمین در آتشیاری سطحی براساس ویژگی های ژئومکانیکی و ژئوفیزیکی توده سنگ (مورد مطالعاتی معدن چغارت)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، یزد، ۱۳۹۵.
- ۱۰- کمالی، م.، "تخمین میزان لرزش های ناشی از آتشکاری در کارخانه سیمان شاهرود"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ۱۳۸۸.
- 11- Kumar R., Choudhury D., Bhargava K., "Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 8 341e349, 2016.
- 12- Arshadnejad SH, Yan W.M., Tham L.G., Zhou J., "An empirical approach to introduce the relationship between blast-induced vibration and rock mass condition in tunneling", Advances in Geotechnical Infrastructure Research Publishing, 423-429, 2013.