

برآورد لرزش ناشی از انفجار در مغار نیروگاه سد مسجد سلیمان با استفاده از روابط تجربی

مجتبی دادخواه
کارشناس ارشد

محمد فاروق حسینی
استادیار

گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

چکیده

حفاری فضاهای زیرزمینی مربوط به سد مسجد سلیمان و نیروگاه برقی آبی آن از طریق چالزنی و انفجار انجام می‌شود. به منظور کنترل میزان لرزش ناشی از انفجار و کاهش پی‌آمدهای نامطلوب آن، سرعت ذرات محیط اطراف مغار در ۳۰ انفجار با نصب ژئوفون اندازه‌گیری و ثبت شده است تا در طراحی باقی حفاری‌ها مورد بهره‌برداری قرار گرفته و مقدار لرزش به حد مجاز آن محدود شود.

محققان روابط تجربی متعددی را برای برآورد لرزش حاصل از انفجار ارائه کرده‌اند. در این مقاله، با بهره‌گیری از مقادیر ثبت شده لرزش و سایر اطلاعات در انفجارهای اولیه، کارآیی پنج رابطه تجربی شناخته شده ارزیابی و مقدار همخوانی آنها با این داده‌ها بصورت کمی محاسبه شده است. با تجزیه و تحلیل داده‌ها بوسیله یک نرم افزار ویژه و مقایسه کاربرد فرمول‌های مذکور مشخص شده است که تفاوت زیادی بین کارآیی این فرمول‌ها وجود ندارد؛ گرچه دقت یکی از آنها بیش از چهار فرمول دیگر است. به عبارت دیگر، حتی مناسبترین فرمول از بین روابط مورد نظر فاقد همخوانی مطلوب با داده‌های ثبت شده است.

پردازش بیشتر روی داده‌های ثبت شده با هدف یافتن رابطه مناسبتر، منجر به ارائه یک رابطه جدید شده است که مقادیر لرزش در پروژه مورد نظر را به مراتب دقیقتر از فرمول‌های موجود برآورد می‌کند. بدین ترتیب مناسبترین رابطه برای برآورد لرزش در این پروژه معرفی و با تعیین بهترین مقادیر برای پارامترهای آن، که معمولاً به شدت منحصر به پروژه اند، چگونگی ادامه انفجار با هدف تحدید لرزش تعیین شده است. به کارگیری معیار انحصاری پیشنهادی و اعمال ضرایب معرفی شده برای آن منجر به حصول ضریب همبستگی ۰/۹۱۵۸ با داده‌ها گردید. با استفاده از رابطه پیشنهاد شده در این پژوهش می‌توان برای مقدار معینی از لرزش که مورد نظر و مجاز است، وزن ماده منفجره ای را که می‌توان همزمان منفجر نمود به دست آورد و از این طریق در ادامه عملیات انفجار شدت لرزش را به مقدار مورد نظر محدود کرد.

کلمات کلیدی

انفجار، لرزش زمین، روابط تجربی، سد مسجد سلیمان

Evaluation of Blast-Induced Ground Vibrations in Power Plant Cavern of Masjed Solaiman Dam Using Empirical Methods

M. F. Hossaini
Assistant Professor

M. Dadkhah
MSc.

Faculty of Engineering, University of Tehran

Abstract

Excavation of the underground spaces of Masjed Solaiman Dam and its hydro-electric power plant cavern is performed by drilling and blasting. In order to reduce the ground vibration to a safe level, the peak particle



velocity in the surrounding area was recorded, for the first 30 shots, by installing geophone in various locations. The recorded data were used for establishing a criterion for vibration control in future excavation works in the project.

A number of empirical criteria are available in literature for ground vibration estimation. In this study, the applicability of 5 well known criteria was assessed using the recorded data and other relevant information. Correlations of all these equations with real data were quantified by means of a capable data analyzing software. The result of these analysis showed that, there was not great differences between the applicability of the existing equations, although one of them was more applicable than the others. In other words, even the most applicable one of the five selected criteria did not demonstrate a satisfactory correlation with the recorded data.

Further investigation towards developing a more reliable equation resulted in introducing a new equation for this project, which carries a much more accurate estimation of the vibration than any of the existing criteria. Therefore, the most suitable equation for the current project was introduced. The best values of the site specific parameters of the suggested equation, for minimization of the ground vibration, were determined. The suggested equation was applied to the data and its best fit was found for which the coefficient of correlation was 0.8919. The maximum instantaneous charge, producing a certain value of vibration intensity, can be calculated through the suggested equation and thus the vibration can be kept at the certain desired value.

Keywords

blasting, ground vibration, empirical equations, Masjed Solaiman Dam.

مقدمه

عملیات انفجار در استخراج معادن و یا کارهای عمرانی، به دلیل ملاحظات اقتصادی و گستردگی کاربرد، یکی از اجزای اصلی از چرخه عملیاتی به شمار می‌آید. در هنگام انفجار، تمام انرژی ماده منفجره صرف کار مطلوب و پیش‌بینی شده نمی‌شود و انفجار علاوه بر محدوده مورد نظر، بر محدوده وسیعی از اطراف محل نیز اثراتی می‌گذارد که اغلب نامطلوب و مخربند. در بین پی‌آمدهای ناخواسته انفجار، لرزش زمین دارای اهمیت ویژه‌ای است. در انفجارهایی که در نزدیک مناطق مسکونی واقع می‌شود، لرزش ممکن است بر ایمنی ساختمان‌ها و سکنه آنها اثر گذارد. بعلاوه، لرزش زمین پایداری توده‌های سنگی اطراف و ابنیه و تاسیسات موجود را به مخاطره می‌اندازد.

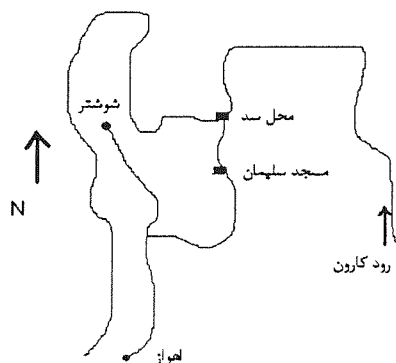
برای کاهش اثرات لرزش زمین و محافظت از سازه‌ها، محققین و مؤسسات تحقیقاتی با توجه به معیارهای گوناگون روابطی را برای پیش‌بینی لرزش ناشی از انفجار ارائه کرده‌اند. آمبراسیس و هندرون¹ (1962)، اداره معادن آمریکا² (1971)، لانگفورد و گیلستروم³ (1972)، جاست و فری⁴ (1980)، سینگ⁵ (1993) و موسسه مرکزی تحقیقات هند (1991) [3] درباره سرعت ذرات ناشی از انفجار تحقیق نموده‌اند. گوش و دیمن⁶ [1] مدل ارائه شده توسط اداره معادن آمریکا را تغییر دادند و پالروی⁷ (1998) [1] با توجه به نوع فعالیت معدنی و تاثیر آن بر روی سازه‌های سطحی مدل‌هایی را ارائه کرد.

در مطالعاتی که حاصل آن در این نوشته آمده است، هدف یافتن یک رابطه تجربی از بین روابط متعدد موجود است که برای پروژه مورد نظر بهترین کارایی را داشته باشد. هر یک از این روابط ممکن است برای یک موقعیت ویژه مناسب اما برای موقعیتی مغایر با آن کارایی نداشته باشد. بنابراین ارزیابی کارایی هر کدام و سپس مقایسه این کارایی‌ها ضروری بوده است. از این رو پنج معیار انتخاب شد، که برای هر یک در مواردی کارایی‌های عملی بالایی توسط محققین گزارش شده است. آنگاه با استفاده از داده‌های تولید شده در انفجارهای مراحل اولیه، کارایی آنها ارزیابی و مقایسه و در نهایت مناسب‌ترین آنها معرفی شده است. سپس یک رابطه جدید که کارایی به مراتب بالاتر، پیشنهاد شده است.

چنانکه در ادامه نشان داده خواهد شد، رابطه‌ی پیشنهادی، با مقادیر ضرائب تعیین شده در این بررسی، می‌تواند به عنوان بهترین رابطه برای برآورد لرزش ناشی از انفجار در حفاری مغار نیروگاه سد مسجد سلیمان به کار گرفته شود. بدیهی است که کاربرد رابطه مذکور برای شرائطی متفاوت نیاز به بازنگری و برازش مجدد دارد.

۱- موقعیت جغرافیایی و مشخصات ساختگاه سد مسجد سلیمان

رود کارون با طولی در حدود ۸۴۰ کیلومتر و حوضه آبریزی به وسعت شصت هزار کیلومتر مربع، از بهم پیوستن رودخانه های فرعی آب ونگ، بهشت آباد، درآب، بازیافت، خراسان و منج تشکیل می شود. مسیر این رودخانه از رشته کوه های زاگرس شروع و پس از عبور از کنار شهرهای ایذه، مسجدسلیمان، شوشتر، اهواز و خرمشهر به خلیج فارس خاتمه می یابد. سد مسجد سلیمان در ۲۲/۵ کیلومتری شمال شرق مسجد سلیمان و تقریباً ۲۶ کیلومتری پایین دست سد شهید عباس پور واقع است (شکل (۱)). هدف از این پروژه، تولید ۲۰۰۰ مگاوات ساعت انرژی برق - آبی (پس از اجرای طرح توسعه) می باشد [۴].



شکل (۱): موقعیت مکانی سد مسجد سلیمان [۴]

مشخصات فنی سد در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات فنی سد مسجد سلیمان [۴]

نوع سد	سنگریزه‌ای با هسته رسی
ارتفاع سد	۱۷۷ متر
طول تاج	۴۸۰ متر
عرض تاج	۱۵ متر
عرض پی	۷۰۲ متر
نوع سرریزه	سرسره ای در بچه دار با حوضچه آرامش
حجم بدنه سد	۱۳/۴ میلیون متر مکعب
حجم مخزن سد	۲۳۰ میلیون متر مکعب

۱-۱- چینه شناسی و طبقه بندی سنگ های محل پروژه

در منطقه مورد مطالعه می توان به ۴ سازند رسوبی اشاره کرد [۴]:

الف - سازند آسماری: این سازند تنها در گوشه انتهایی بالا دست مخزن سد به چشم می خورد و از نظر سنگ شناسی شامل سنگ آهک توده‌ای به رنگ خاکستری متمایل به زرد با تداخل هایی از لایه های مارنی به فواصل نا منظم است.

ب - سازند گچساران: این سازند سری های تبخیری مانند ژیبس و نمک با مقداری لایه های پلایائی متمایل به قرمز را در بر گرفته و تداخل هایی از سنگ آهک در آن دیده می شود.

ت - سازند میشان: این سازند اکثراً از رسوبات پلایایی و نهشته های مارن با ماسه سنگ تشکیل شده است.

ث - سازند بختیاری: این سازند با سن پلیوسن بالایی تا پلیستوسن زیرین جوانترین سازندچین خورده منطقه به شمار می رود.

با اجرای طبقه بندی سنگ های محل پروژه به روش RMR این نتیجه حاصل شده است که سنگ های محل را می توان در طبقه "خوب" توصیف کرد (جدول (۲)).



جدول (۲): طبقه‌بندی توده سنگهای نیروگاه آبی سد مسجد سلیمان به روش RMR [۴]

نوع سنگ	RMR	کیفیت سنگ
کنگومرا	۷۴	خوب
ماسه سنگ	۷۴	خوب
لای سنگ	۶۲	خوب
سنگ رس لای دار	۵۰	متوسط

۲- عملیات انفجار در سد مسجد سلیمان

ماهیت پروژه‌های ساختمانی بزرگ به ویژه سدها و نیروگاه‌ها، ایجاب می‌کند که در موارد متعددی عملیات انفجار در مجاورت محل‌های بتن ریزی و نصب تجهیزات دقیق و فضاهای موجود زیر زمینی صورت پذیرد. بنابراین لازم است انفجارها بصورتی انجام شود که خللی در سایر عملیات ساختمانی و تجهیزات موجود ایجاد نکند. در طرح توسعه نیروگاه آبی سد مسجد سلیمان، چالزنی توسط دستگاه‌های مختلفی از قبیل جامبو دو بوم و سه بوم اطلس کوپکو، دریل واگن تامراک رنجر و دستگاه حفاری از نوع SOILMIC انجام می‌گیرد.

قطر چال‌های حفاری با این دستگاه‌ها برابر ۵۱ و ۴۸ میلیمتر و طول چال‌های حفر شده ۳/۵ و ۳/۲ و ۲/۵ متر است. آرایش چال‌ها معمولاً به ابعاد سطح مقطع بستگی دارد که در سد مسجد سلیمان موازی و در مرکز مقطع (بخش برش) به شکل گوه‌ای (V) است. مواد منفجره مصرفی در سد مسجد سلیمان آنفو و دینامیت بوده و برای انفجار از فتیله کرتکس استفاده می‌شود. مقدار خرج ویژه مصرفی تقریباً بین $1/64 - 1/13 \text{ kg/m}^3$ است که برای سطح مقطع‌های مختلف متفاوت است. نوع چاشنی‌های مصرفی آنی، ۲۵ میلی ثانیه (ms) و ۵۰۰ میلی ثانیه (ms) بوده است.

۳- ثبت اطلاعات لرزه‌ای انفجار

برای دست یافتن به الگوی مناسب چالزنی و انفجار در حفر فضاهای مورد نظر، همزمان با حفر فضاهای زیرزمینی در دست اقدام مقدار لرزش و سایر اطلاعات مربوطه، ثبت شده است، تا تعداد داده‌های لازم برای تجزیه و تحلیل، و نهایتاً بهینه کردن الگوی حفاری تأمین شود.

در هر دور از انفجارهای انجام شده تمام اطلاعات مربوطه از جمله مقدار خرج مصرف شده در هر تأخیر و فاصله ژئوفون تا محل انفجار به دقت اندازه‌گیری و یاد داشت شده است. دستگاه ژئوفون، که در فواصل مختلف از محل‌های انفجار نصب از نوع UVS 1500 می‌شد، کار ثبت مقادیر لرزش در هر انفجار را برعهده داشت.

در مجموع ۳۰ گروه از اطلاعات لازم برای بررسی‌های حاضر تهیه شد که در جدول شماره (۳) آورده شده است. محل ثبت داده‌های لرزه‌ای در مغار نیروگاه فاز یک و محلهای انفجار در تونل دسترسی به تاج نیروگاه ترانسفورمر (T4)، تونل دسترسی (Adit No.1)، تونل سمت راست خروجی آب از نیروگاه (R-PILOT)، تونل سمت چپ خروجی آب از نیروگاه (L-PILOT) و مغار نیروگاه (PHC) بوده است.

۳-۱- ویژگی‌های دستگاه ژئوفون

ژئوفون UVS 1500 دارای چهار مدل متفاوت US, SCAN, DIN, EU و است که کارآئی‌های متفاوتی دارند و پاسخ‌های مختلفی را بدست می‌دهند [5]. دستگاه مورد استفاده در این پروژه از نوع DIN بوده است.

این دستگاه توانایی‌های زیر را دارا است:

۱- جابجایی‌های مختلف را در جهت‌های اصلی سه گانه ارائه می‌کند. همچنین می‌تواند برآیند سه مؤلفه اندازه‌گیری شده را ثبت کند.

۲- توانائی ارائه اطلاعات هم به صورت گرافیک و هم به شکل جدول را دارد. با این دستگاه می‌توان نمودار سرعت ذرات بر



- حسب زمان را در حین انفجارات ثبت کرد.
- ۳- توانایی ثبت زمان دقیق وقوع بیشترین مقدار سرعت ذرات (PPV) را دارد که بوسیله آن می‌توان تاخیری را که موجب بیشترین PPV شده است مشخص کرد.
- ۴- با انتخاب ۱۲ مقدار PPV و قراردادن آنها در نمودار معیار زیان رسانی DIN4150، نمایی از درجه خسارت انفجار را ارائه می‌کند.
- ۵- تمام انرژی مصرفی دستگاه تنها با ۶ باتری متوسط ۱/۵ ولتی معمولی تامین می‌شود.

جدول (۳): داده‌های ثبت شده در طرح توسعه نیروگاه آبی سد مسجد سلیمان

موقعیت	فاصله از محل انفجار (m)	مقدار خرج (kg/delay)	P.P.V (mm/s)
R-PILOT	145	7.7	0.65
T4	116.12	24	2.7
PHC	174.5	20.4	3.55
L-PILOT	112.48	7.7	0.55
T4	114.74	24	5.9
R-PILOT	144.1	7.7	0.9
T4	112.45	24	5.15
Adit No.1	193.33	29.1	3.4
Adit No.1	195.8	26	2.5
T4	110.76	24	5.15
T4	108.5	24	5.9
Adit No.1	178	30	6.1
T4	83	24	11.3
Adit No.1	213	34.3	11.6
T4	78	25.7	13.7
T4	63	25.7	19.2
R-PILOT	81.77	11	1.5
T4	80.61	18	11.6
T4	79.31	18	9.2
PHC	29.46	17.9	15.5
T4	53	18	10.6
PHC	29.46	14.06	13
T4	74	18	6.4
Adit No.1	217	27.14	3.2
Adit No.1	218	34.3	5.65
R-LVB	109	24	9.05
PHC	35.13	12.9	11.1
PHC	37.7	23	23.2
Adit No.1	209	15.2	1.95
PHC	37.7	12.6	7.35

۴- خلاصه‌ای از معیارهای تجربی مورد استفاده

به منظور یافتن مناسبترین رابطه‌ای که بوسیله آن بتوان مقدار لرزش ناشی از عملیات انفجار در نیروگاه سد مسجد سلیمان را در ادامه عملیات حفر فضای مورد نظر بر آورد نمود مروری بر تمام روابط تجربی موجود مرور و در پایان پنج رابطه که بیشترین کاربردها را در موارد مختلف داشته اند برای بررسی انتخاب شدند [۶].

شکل عمومی این روابط به صورت زیر است:

$$PPV = KQ^a R^b \quad (1)$$

که در آن PPV (mm/sec) حداکثر سرعت ذرات، R (m) فاصله محل ثبت لرزش از محل انفجار، Q حداکثر خرج منفجر شده همزمان (kg) و K و a، b ضرایب ثابت هستند. و اما فرم ویژه که هر کدام از پنج رابطه مورد نظر را در چهارچوب فرم عمومی (1) معرفی می‌کند، به یکی از صور زیر است:

$$PPV = K \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^a \quad (2)$$

ب - رابطه اداره معادن آمریکا (1971) [1]:

$$PPV = K \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^a \quad (3)$$

ج - رابطه لانگفوردس - گیلستروم (1973) [1]:

$$PPV = K \left[\frac{\left(\frac{Q}{3} \right)^{\frac{1}{2}}}{R^{\frac{3}{2}}} \right]^a \quad (4)$$

د- رابطه جاست - فری (1980) [1]:

$$PPV = K \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^a e^{-b \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)} \quad (5)$$

ه - رابطه موسسه مرکزی تحقیقات هند (1991) [1]:

$$PPV = K \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^a e^{-b \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)} \quad (6)$$

روابط دیگری نیز در سال‌های اخیر ارائه شده اند که روایت‌های مختلف رابطه (1) و یا یکی از پنج رابطه مرور شده در این مقاله هستند. این روابط برای مطالعات موردی و با ضرایب ویژه متناسب با پروژه‌های مورد مطالعه به کار گرفته شده‌اند، که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

$$PPV = 267.14Q^{0.8434} R^{-1.6822} \quad (7)$$

$$PPV = 267.14Q^{0.8434} R^{-1.6822} \quad (8)$$

$$PPV = 645QR^{-0.5} \quad (9)$$

$$PPV = 14.8Q^{0.59} R^{-1.18} \quad (10)$$

یادآور می‌شود که در روابط (2) و (5)، فاصله مقیاس شده از ریشه سوم مقدار خرج تعریف می‌شود و اساساً برای خرج‌های کروی شکل ارائه شده‌اند، اما از آنجا که در عمل برخی از محققین آنها را برای خرج‌های استوانه‌ای هم مورد استفاده قرار

داده‌اند [11] در این مطالعه نیز که خرج مصرفی شکل استوانه‌ای دارد مد نظر قرار گرفته‌اند.

۵- بررسی کارآیی معیارهای انتخاب شده

با استفاده از ۳۰ گروه اطلاعات ثبت شده (جدول (۳)) و به کمک نرم افزار DATA FIT [12] روابط تجربی مورد نظر بر داده‌ها تطبیق داده شدند.

برنامه رایانه‌ای مورد استفاده تکنیک کمینه کردن مجموع مربع خطاهای نسبی را برای یافتن مناسبترین رابطه منطبق با داده‌ها به کار می‌گیرد. این تکنیک در مقایسه با سایر روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها از بیشترین دقت برخوردار است. این برتری در مقاله دیگری به تفصیل آورده شده است [13].

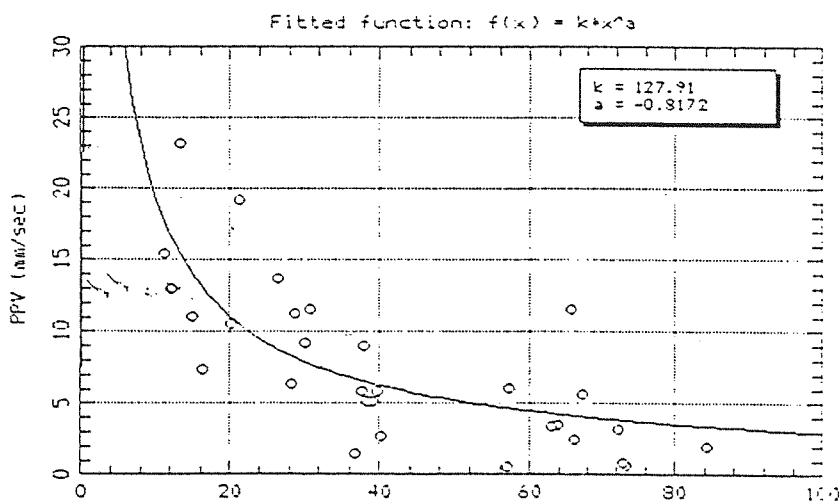
برای هریک از فرمول‌های پنجگانه مذکور با تجزیه و تحلیل همه داده‌های جدول (۳) بهترین مقادیر ضرائب آن فرمول بدست آمده و اطلاعات آماری لازم برای مقایسه کارآیی آنها شامل ضریب همبستگی (R)، واریانس و انحراف از معیار Standard Deviation) تعیین شد. شکل نهایی هر یک از فرمول‌ها با مقادیری از ضرائب آنها که با این داده‌ها بهترین هماهنگی و همخوانی را داشتند در ادامه بیان شده است.

۵-۱- رابطه آمبراسیس - هندرون

بهترین شکل این رابطه برای برآورد حداکثر سرعت ذرات ناشی از انفجار در محل مغار نیروگاه به صورت زیر است:

$$PPV = 127.91 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-0.8172} \quad (11)$$

ضریب همبستگی، واریانس و انحراف از معیار برای این برازش به ترتیب ۰٫۷۵۱۷، ۱۳/۸۱۶ و ۳/۷۱۷ می‌باشد. شکل ۲ نمودار مقدار حداکثر سرعت ذرات نسبت به فاصله مقیاس شده مربوط به این فرمول را نشان می‌دهد.



$$\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}, \left(\frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}} \right)$$

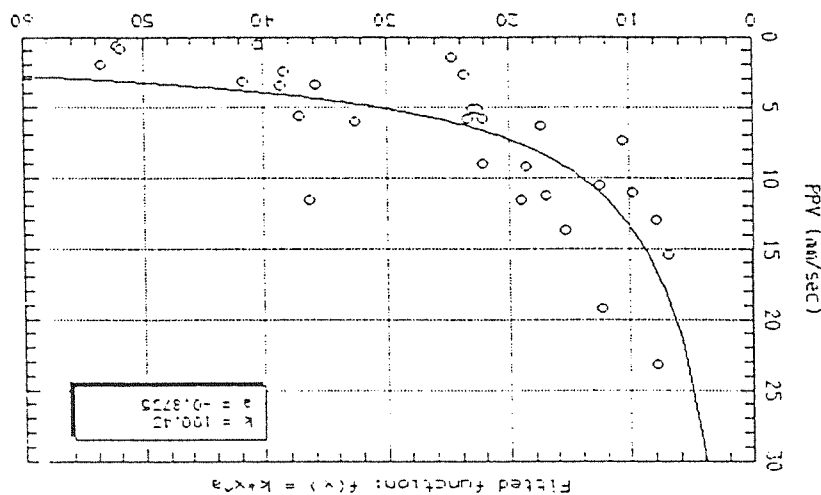
شکل (۲) نمودار برازش شده داده‌ها بر اساس رابطه آمبراسیس - هندرون.

۵-۲- رابطه اداره معادن آمریکا

شکل نهایی این رابطه با مناسبترین مقادیر ضرائب برای برآورد شدت لرزش در عملیات انفجار مغار نیروگاه به صورت زیر تعیین شده است:

$$PPV = 100.43 \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-0.8735} \quad (12)$$

ضریب همبستگی، واریانس و انحراف از معیار برای این برازش به ترتیب ۰/۷۹۰۶، ۱۱/۹۲۳، و ۳/۴۵۳ بدست آمده است. شکل (۳) نمودار مقدار حداکثر سرعت ذرات نسبت به فاصله مقیاس شده مربوط به این فرمول را نشان می‌دهد.



$$\frac{R}{\sqrt{Q}} \cdot \left(\frac{m}{kg^{0.5}} \right)$$

شکل (۳): نمودار برازش شده داده‌ها بر اساس رابطه اداره معادن آمریکا

۵-۳- رابطه لانگفورس - گیلستروم

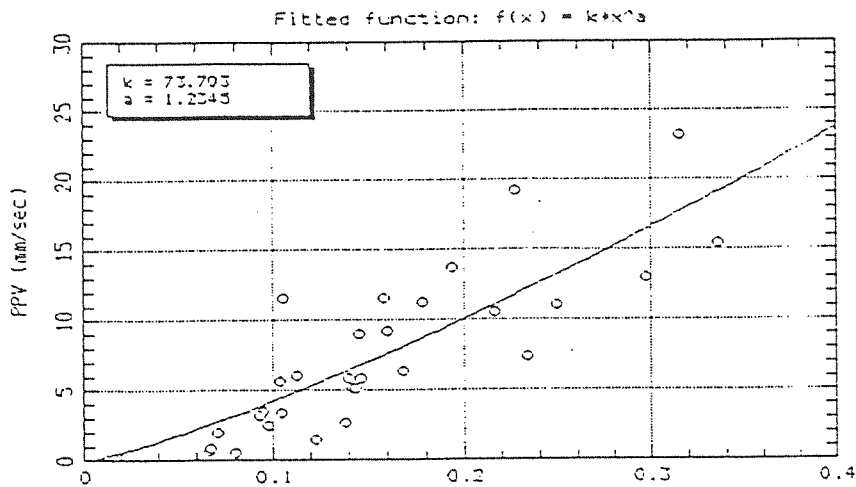
تجزیه و تحلیل داده‌ها مطابق آنچه برای سایر معیارها انجام شد برای این معیار هم اعمال و به یافتن بهترین شکل ممکن آن به صورت زیر منجر شد:

$$PPV = 73.703 \left[\left(\frac{Q}{R^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{1.2345} \quad (13)$$

ضریب همبستگی، واریانس و انحراف از معیار برای این برازش به ترتیب ۰/۸۲۵۱، ۰/۱۵۹، و ۳/۱۸۷ حاصل شده است. شکل (۴) نمودار مقدار حداکثر سرعت ذرات نسبت به فاصله مقیاس شده مربوط به این فرمول را نشان می‌دهد.

ذکر این نکته ضروری است که چنانچه مشاهده می‌شود در رابطه (۴) عاملی که در چنین فرمول‌هایی "فاصله مقیاس شده" نام گرفته و در سایر روابط به فرم $\left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)$ و $\left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)$ است به صورتی دیگر یعنی $\left[\frac{1}{\left(\frac{Q}{R^2} \right)^{\frac{1}{2}}} \right]$ تعریف شده است و به همین

دلیل شکل منحنی مربوط به آن تفاوتی را نسبت به شکل منحنی سایر روابط نشان می‌دهد. با توجه به عدم امکان هماهنگ کردن شکل ریاضی رابطه (۴) با سایر روابط، مقایسه کارایی آنها فقط از طریق مقایسه شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول (۴) مقدور است.



$$\left(\frac{Q}{3}\right)^{0.5}, \left(\frac{kg}{m^{1.5}}\right)^{0.5}$$

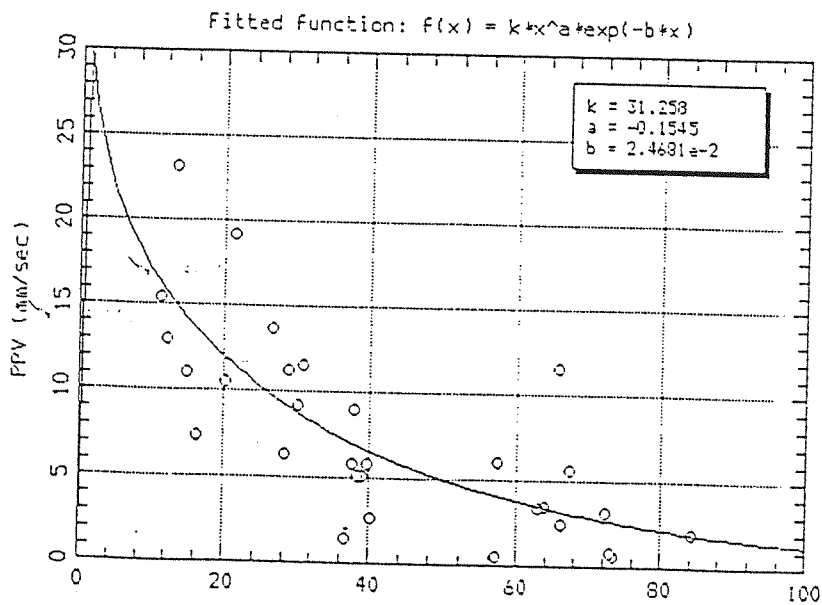
شکل (۴): نمودار برازش شده داده هابراساس رابطه لانگفوردس - گیلستروم

۵-۴- رابطه جاست - فری

برازش این معیار بر داده‌های جدول (۳) با بهترین ضرایب تعیین شده بوسیله نرم افزار مورد استفاده منجر به تعیین فرم آن به صورت زیر شد:

$$PPV = 31.258 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-0.1545} e^{-0.02468 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right)} \quad (14)$$

ضریب همبستگی، واریانس و انحراف از معیار برای این برازش به ترتیب ۰/۷۶۵۵، ۱۳/۱۲۶ و ۳/۶۲۳ است. شکل (۵) نمودار مقدار حداکثر سرعت ذرات نسبت به فاصله مقیاس شده مربوط به این فرمول را نشان می‌دهد.



$$\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}, \left(\frac{m}{kg^3}\right)$$

شکل (۵): نمودار برازش شده داده هابراساس رابطه جاست - فری

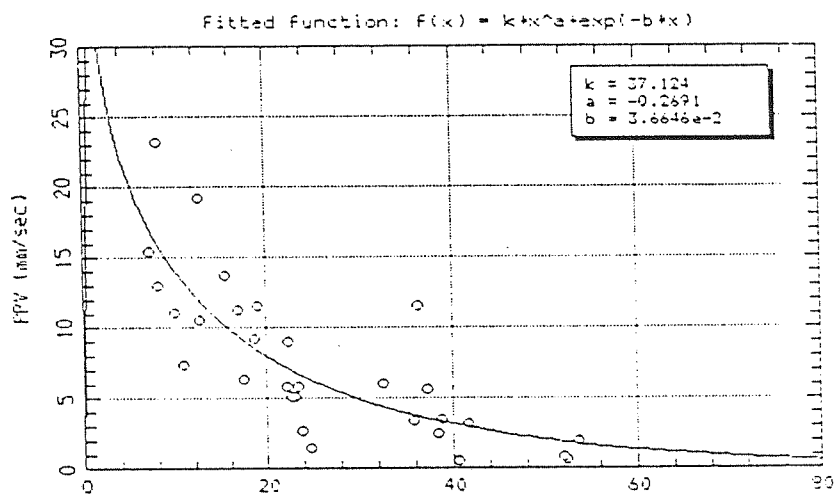


۵-۵- رابطه موسسه مرکزی تحقیقات هند

مشابه روابط فوق اشاره با تجزیه و تحلیل داده‌های جدول شماره (۳) بهترین فرم برای این فرمول که نزدیکترین انطباق ممکن با داده‌ها را دارد به صورت زیر بدست آمد:

$$PPV = 37.124 \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-0.2691} e^{-0.03646 \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)} \quad (15)$$

ضریب همبستگی، واریانس و انحراف از معیار برای این برازش به ترتیب ۰/۸۰۲۲، ۰/۱۱/۲۹۹ و ۳/۳۶۱ می‌باشد. شکل ۶ نمودار مقدار حداکثر سرعت ذرات نسبت به فاصله مقیاس شده مربوط به این فرمول را نشان می‌دهد.



$$\frac{R}{\sqrt{Q}}, \left(\frac{m}{kg^{0.5}} \right)$$

شکل (۶): نمودار برازش شده داده‌ها بر اساس رابطه موسسه تحقیقات هند

۶- پیشنهاد یک رابطه تجربی برای پروژه مسجد سلیمان

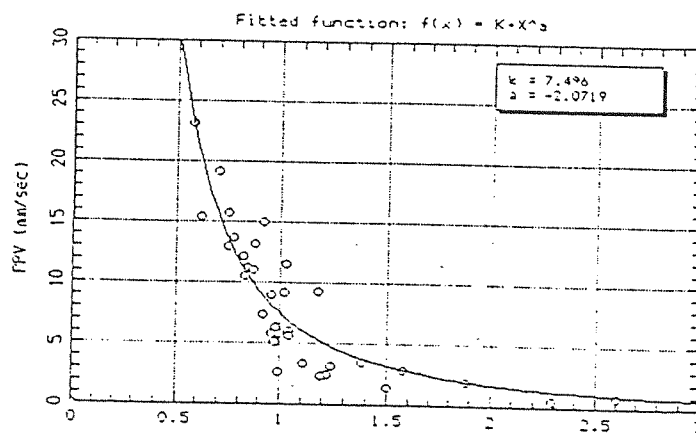
چنانکه در بخش‌های پیشین تشریح شد بالاترین ضریب همبستگی، معادل ۰/۸۲۵۱، برای رابطه (۱۳) بدست آمد. به منظور یافتن رابطه‌ای که ضریب همبستگی بالاتری با داده‌های پروژه مسجد سلیمان داشته باشد با به کارگیری شکل عمومی روابط، (۱)، محاسبات زیادی صورت گرفت. این تجزیه و تحلیل‌ها در نهایت به رابطه جدیدی منجر شد که دقت آن در همخوانی با داده‌های پروژه حاضر به مراتب بیشتر از معیارهای پیشین است منجر گردید. برای دست یافتن چنین به رابطه‌ای بهترین مقادیر ضرایب موجود در این فرمول‌ها به کمک نرم افزارهای آماری مناسب تعیین و شاخص‌های آماری برای مقایسه میزان همخوانی فرمول‌ها با داده‌های واقعی محاسبه شد. در میان تمام گزینه‌های حاصل مناسب‌ترین آنها انتخاب و به عنوان یک فرمول جدید ارائه شد. رابطه پیشنهادی که به تعبیری می‌تواند الهام گرفته از رابطه لانگفورس - گیلستروم تلقی شود به صورت زیر است:

$$PPV = K \left[\left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (16)$$

رابطه فوق به طریقی که برای سایر روابط تشریح شد، بر داده‌ها برازش گردید و مناسبترین فرم آن که نزدیکترین انطباق ممکن با داده‌ها را دارد به صورت زیر بدست آمد:

$$PPV = 7.496 \left[\left(\frac{R}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-2.0719} \quad (17)$$

ضریب همبستگی، واریانس و انحراف از معیار برای این برازش به ترتیب ۰/۹۱۵۸، ۵/۱۳۰۸ و ۲/۲۶۵۱ است. شکل (۷) نمودار مقدار حداکثر سرعت ذرات نسبت به فاصله مقیاس شده مربوط به این فرمول را نشان می‌دهد.



$$\left(\frac{R}{3} \right)^{0.5}, \left(\frac{m}{kg^{1.5}} \right)^{0.5}$$

شکل (۷): نمودار برازش شده داده‌ها براساس رابطه پیشنهادی

۷- مقایسه میزان کارآیی روابط

نتایج آماری تجزیه و تحلیل داده‌های تولید شده در مغار زیرزمینی نیروگاه برق - آبی سد مسجد سلیمان با استفاده از معیارهای تجربی انتخاب شده و معیار پیشنهادی جدید، که هرکدام فرمی ویژه از رابطه (۱) هستند، در جداول (۴) و (۵) آورده شده است. به کمک این جداول می‌توان میزان کارآیی روابط مذکور را مقایسه نمود.

جدول (۴): نتایج برازش داده‌ها بوسیله معیارهای بررسی شده

نام فرمول	مناسبتین مقدار ضریب a	مناسبتین مقدار ضریب b	مناسبتین مقدار ضریب k	ضریب همبستگی (R)	واریانس	انحراف از معیار
آمبرایس هندرون (۲)	-۰/۸۱۷۲	-	۱۲۷/۹۱	۰/۷۵۱۷	۱۳/۸۱۶	۳/۷۱۷
اداره معادن آمریکا (۳)	-۰/۸۷۳۵	-	۱۰۰/۴۳	۰/۷۹۰۶	۱۱/۹۲۳	۳/۴۵۳
لانگفوس-گیلستروم (۴)	۱/۲۳۴۵	-	۷۳/۷۰۳	۰/۸۲۵۱	۱۰/۱۵۹	۳/۱۸۷
جاست - فری (۵)	-۰/۱۵۴۵	۰/۰۲۴۶۸	۳۱/۲۵۸	۰/۷۹۵۵	۱۳/۱۲۶	۳/۶۲۳
موسه تحقیقات هند (۶)	-۰/۲۶۹۱	۰/۰۳۶۴۶	۳۷/۱۲۴	۰/۸۰۲۲	۱۱/۲۹۹	۳/۳۶۱
معیار پیشنهادی (۱۲)	-۲/۰۷۱۹	-	۷/۴۹۶	۰/۹۱۵۸	۵/۱۳۰۸	۲/۲۶۵۱

جدول (۵): مقایسه مقادیر برآورد شده حداکثر سرعت ذرات بوسیله روابط مورد بررسی با مقادیر واقعی ثبت شده

مقادیر ثبت شده	موسسه تحقیقات هند	جاست - فری	لانگفورس - گیلستروم	آمبراسیس - هندرون	اداره معادن آمریکا	معیار پیشنهادی
0.65	1.89	2.63	2.59	3.82	3.17	0.86
2.7	6.64	6.54	6.42	6.24	6.32	7.02
3.55	3.37	3.40	3.98	4.28	4.13	3.45
0.55	3.10	4.10	3.28	4.70	3.96	1.13
5.9	6.74	6.63	6.49	6.30	6.39	7.11
0.9	1.91	2.66	2.61	3.84	3.19	0.86
5.15	6.89	6.78	6.61	6.41	6.50	7.27
3.4	3.81	3.50	4.51	4.34	4.41	5.52
2.5	3.41	3.20	4.16	4.16	4.15	4.53
5.15	7.00	6.90	6.71	6.49	6.59	7.39
5.9	7.16	7.05	6.84	6.60	6.71	7.56
6.1	4.42	4.07	4.96	4.68	4.80	6.35
11.3	9.32	9.14	8.76	8.21	8.48	10.13
11.6	3.72	3.25	4.56	4.19	4.35	6.50
13.7	10.12	9.82	9.68	8.81	9.22	12.12
19.2	11.95	11.50	11.80	10.48	11.12	15.30
1.5	6.35	7.23	5.49	6.72	6.11	2.87
11.6	8.38	8.62	7.54	7.78	7.67	6.53
9.2	8.51	8.75	7.65	7.88	7.78	6.65
15.5	17.06	16.29	19.08	17.68	18.44	19.40
10.6	11.91	11.93	11.11	10.96	11.06	10.32
13	15.98	15.72	16.43	16.56	16.59	13.07
6.4	9.08	9.29	8.16	8.34	8.27	7.17
3.2	2.96	2.72	3.88	3.87	3.86	4.34
5.65	3.59	3.12	4.47	4.11	4.26	6.33
9.05	7.13	7.02	6.81	6.57	6.68	7.52
11.1	14.04	14.22	13.24	14.01	13.70	9.37
23.2	15.98	15.12	17.72	15.48	16.58	22.34
1.95	1.78	1.96	2.81	3.41	3.10	1.75
7.35	13.32	13.63	12.22	13.14	12.75	8.34

چنانکه در جداول (۴) و (۵) ملاحظه می‌شود، در مقایسه پنج معیار گزیده شده، نتایج حاصل از رابطه لانگفورس - گیلستروم، گرچه تفاوت فاحشی با بعضی از روابط دیگر مثلاً رابطه اداره معادن آمریکا ندارد، در مجموع نسبت به چهار رابطه دیگر دارای مقادیر نزدیکتری به مقادیر ثبت شده واقعی بوده و ضریب همبستگی، واریانس و انحراف از معیار مناسبتری را داراست. اما رابطه پیشنهادی این مقاله از کارایی به مراتب بالاتری برخوردار است.

۸- خلاصه و نتیجه گیری

- تجزیه و تحلیل گسترده داده‌های لرزه‌ای پروژه سد مسجد سلیمان منتج به ارائه رابطه تجربی جدیدی شد که دقت و کارایی آن نسبت به روابط تجربی موجود به مراتب بیشتر بوده به عنوان مناسبترین رابطه برای پیش بینی لرزش در این طرح معرفی می‌شود. این رابطه می‌تواند به منظور محاسبه حداکثر خرج منفجرشده همزمان برای فاصله‌های مورد نظر از محل انفجار مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

- نتیجه مقایسه مقادیر لرزش واقعی ثبت شده در انفجارات طرح توسعه نیروگاه برق - آبی سد مسجد سلیمان با برآوردهای حاصل از روابط اداره معادن آمریکا، آمبراسیس - هندرون، لانگفورس - گیلستروم، جاست - فری و موسسه تحقیقات مرکزی هند نشان می‌دهد که رابطه لانگفورس - گیلستروم نسبت به چهار رابطه دیگر از کارایی بالاتری برخوردار است.



- به منظور دست یافتن به رابطه‌ای که شدت لرزش زمین ناشی از انفجار در یک پروژه خاص را توصیف کند، انجام انفجارهای آزمایشی و تولید داده‌های واقعی در محل پروژه ضروری است تا در نتیجه تجزیه و تحلیل آنها به رابطه مناسب دست یافت.

- از آنجا که کارآیی روابط تجربی موجود برای برآورد لرزش برحسب شرایط و ویژگی‌های زمین شناسی و تکتونیکی و سایر فاکتورهای مؤثر از پروژه‌ای به پروژه دیگر متفاوت است، بهتر است در عمل به استفاده از یکی از آنها بسنده نکرده روابط مختلف آزمایش و مناسبترین رابطه انتخاب شود.

- با توجه به این که ضرایب تخمینی در روابط تجربی به شدت منحصر به پروژه هستند، استفاده از مقادیر ضرایبی که برای یک محل خاص جوابگویی مناسبی داشته‌اند در محل دیگر صحیح نبوده و باید برای هر محل و موقعیت ضرایب مناسب را بدست آورده جایگزین کرد.

۹- سپاسگزاری

مؤلفین بر خود لازم می‌بینند که از همکاری‌های مؤثر و مفید و تأمین امکانات توسط مدیران و مسؤولان شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران و شرکت مشاور به ویژه آقایان مهندس خلفی و مهندس دارابی که قطعاً بدون حسن توجهشان این بررسی‌ها مقدور نمی‌شد صمیمانه سپاسگزاری نمایند.

زیر نویس‌ها

- | | |
|---------------------------|----------------|
| 1 - Ambraseys & Hendron | 5- Singh |
| 2 - US Bureau of Mines | 6-Ghosh&Deamen |
| 3- Langeforce & Kilhstrom | 7- Pal Roy |
| 4 - Just & Free | |

مراجع

- [1] C.L. Jimeno and E.L. Jimeno, Drilling and blasting of rocks, A.A.Balkema, Rotterdam(1995).
- [2] S.P. Singh, Prediction and determination of explosive induced damage, Proc.4 th.Int.Sym.on rock fragmentation by blasting, A.A.Balkema, Rotterdam, PP.183-192(1993).
- [3] P. Pal roy, Characteristics of ground vibration and structural response to surface and underground blasting, Geotechnical and geological engineering, VOL.16, NO.2, PP.151-166 (1998).
- [۴] مشانیر و لامیر، گزارش بازنگری طرح نیروگاه آبی گدارلندر، سازمان آب و برق خوزستان، ۱۳۶۸.
- [5] ABEM, A Nitro Consult Company, UVS1500, vibration monitoring users manual .
- [۶] مجتبی دادخواه، رفتار نگاری و بررسی پیامدهای لرزش ناشی از آتشکاری در طرح توسعه سد مسجد سلیمان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.
- [7] A., Kahrman, Evaluation of ground vibration due to surface blasting at a Celestite open pit mine, Int. J. of Blasting and Fragmentation (FRAGBLAST), Vol. 5, PP 21-34, 2001.
- [8] G., Chen, and S.,L., Huang, Analysis of ground vibration caused by open pit production blasted - a case study, , Int. J. of Blasting and Fragmentation(FRAGBLAST), Vol. 5, PP 91-107, 2001.
- [۹] حسن بخشنده، پیش بینی اثرات ناشی از انفجار در معادن روباز بر روی سازه‌های سطحی مجاور(بررسی موردی معدن مس سرچشمه کرمان)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۷۸ .
- [۱۰] محمد فاروق حسینی، عبدالرحیم جواهریان، مهدی پورقاسمی ساغند، مدل ریاضی برای برآورد لرزش ناشی از انفجار در معدن مس سرچشمه کرمان، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، جلد ۳۶ شماره ۲ صفحات ۲۷۷ تا ۲۸۸ شهریور ۱۳۸۱.
- [11] N., Yang, Z., Zhang, and H., Liu, The vibration characteristics of a tunnel induced by adjacent blasting, Proceedings of 1st world conference on Explosives and Blasting Technique, PP97-102, Munich, Germany, 6-8 Sept. 2000
- [12] A Soft Answer, Data fitting by linear and multiple non-linear regression, P. O. Box 1743, Macquari Center, NSW, 2113, Australia (1992).
- [13] V.S. Vutukuri and S.M.F. Hossaini, Assessment of applicability of strength criteria for rock and rock mass to coal pillars, Proc. of 11th Int. conf. on Ground Control in Mining (eds. N.I. Aziz and S. S. Peng). Wollongong, 7-10 July, PP. 1-8(1992).
- [14] C.H. Dowding, Blast vibration monitoring and control, Prentice-all, Inc. Englewood cliff(1985).
- [15] C.H. Dowding, Construction Vibration, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ. USA, 604 pages(1996).
- [16] F. Seams, Aplication of computer assisted modeling to blast design and evalution in surface mining, AP.com(1996).

