

## ارائه مدل ریاضی جهت پیش‌بینی میزان لرزش در شفت‌های سد گتوند با استفاده از رگرسیون چند متغیره

محمد رحمانی پاچی\*<sup>۱</sup>، فرشاد رشیدی نژاد<sup>۲</sup>، محمود پارسایی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی معدن (استخراج)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۲- هیات علمی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۳- هیات علمی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود

(\*عهده دار مکاتبات - mohammad\_rahmani\_p@yahoo.com)

### چکیده

انفجار یکی از عملیات کلیدی در معدنکاری، سدسازی و فضاهای زیرزمینی می‌باشد. انرژی حاصل از انفجار صرف شکستن سنگ‌ها می‌شود و تنها در حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد انرژی ایجاد شده توسط انفجار صرف این کار می‌شود و مابقی انرژی به شکل لرزش زمین، انفجار هوا و پرتاب سنگ تلف می‌شود. لرزش‌های ناشی از انفجار بر روی سازه‌های نزدیک به محل انفجار مانند: ساختمان‌ها، سدها و جاده‌ها تاثیرات مهمی دارد. کنترل و اندازه‌گیری لرزش‌ها بسیار مهم می‌باشد. در این تحقیق اندازه‌گیری میزان لرزش در عملیات انفجار و بررسی تاثیرات آن بر سازه‌های حساس و در حال ساخت در محل گارگاه و همچنین کنترل لرزش‌های شفت سد گتوند علیا با نصب ژئوفن انجام گرفته است تا به منظور بهینه‌سازی طراحی انفجار مورد استفاده قرار گیرند. در این تحقیق لرزش‌های ناشی از انفجارات شفت‌ها در فواصل مختلف و با خرج‌های متفاوت از محل انفجار اندازه‌گیری گردیدند. تعداد ۲۷ انفجار از لرزش‌های تولید شده ناشی از امواج انفجاری در بیش از ۱۵ ایستگاه ثبت شده است. سپس لرزش‌های ثبت شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و کارایی برخی از روابط تجربی جهت پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات ارزیابی شده و بهترین رابطه با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه و رگرسیون غیر خطی انتخاب شده است.

**واژگان کلیدی:** لرزش زمین، حداکثر سرعت ذرات، شفت، انفجار.

### ۱- مقدمه

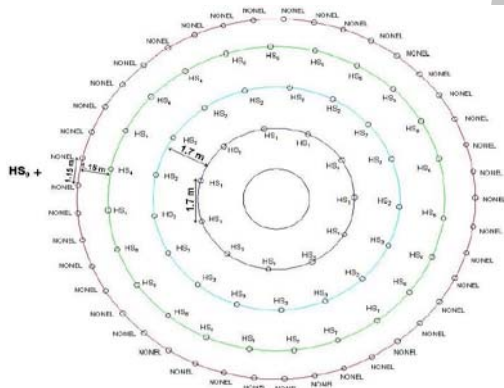
لرزش زمین ناشی از عملیات انفجار در پروژه‌های عمرانی و عملیات معدن‌کاری علاوه بر اینکه مقدار زیادی از انرژی انفجاری در حدود ۴۰ درصد را به خود اختصاص می‌دهد باعث مزاحمت برای افراد، تخریب ساختمان و سازه‌های عمرانی و دیواره‌های معدن می‌شود (Jimeno and Jimeno, 1995). بطور کلی لرزش زمین به صورت حرکت موج به طرف خارج از محل انفجار انتشار می‌یابد. لرزش بوجود آمده از میان ساختمان‌ها و سازه‌های اطراف محل انفجار عبور کرده و بر اثر این امواج ارتعاشاتی بر سازه‌های القا می‌شود. بوسیله کنترل سرعت ذره‌ای عملیات انفجار اثرات مخرب نیروهای امواج انفجار بر سازه‌های زیرزمینی در حال احداث کاهش می‌یابد. بررسی سرعت ذرات ناشی از عملیات انفجار توسط محققینی همچون آمبرسیس و هندرون (۱۹۶۲)، اداره معادن آمریکا (۱۹۷۱)، لانگفورد و کلیستروم (۱۹۷۳)، گوش و دیمن (۱۹۸۳)، موسسه تحقیقاتی هند (۱۹۹۱)، اگان (۲۰۰۳) و آدیکاری (۲۰۰۵) مورد توجه قرار گرفته است (Tantawy, 2009 & Dessureault, 2003). در فضاهای زیرزمینی در حال ساخت که مقاومت و رفتار سنگ تاثیر پذیر از نیروهای دینامیکی حاصل از انفجار بوده. دسترسی به مقاومت نهایی طراحی زمانی

مسیر است که عوامل کاهش دهنده آن از جمله امواج لرزه‌ای کنترل گردند. اهداف عمده این تحقیق ارائه رابطه تجربی جهت پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات به منظور کنترل سطح لرزش در فضاهای زیرزمینی سد گتوند علیا است.

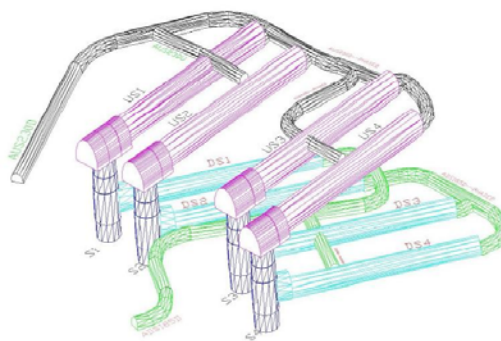
## ۲- مشخصات سد گتوند علیا

طرح سد و نیروگاه برق‌آبی گتوند علیا از جمله بزرگ‌ترین طرح‌های سدسازی در حال اجرا بر روی رودخانه‌ی کارون است. این طرح در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان شوشتر واقع شده و شامل یک سد سنگ‌ریزه‌ای با هسته‌ی رسی و یک نیروگاه سطحی با ظرفیت نهایی ۲۰۰۰ مگاوات است. پروژه‌ی گتوند علیا دارای یک نیروگاه سطحی شامل ۸ واحد ۲۵۰ مگاواتی با طرح توسعه است. در این سیستم، آب دریاچه در تراز ۱۵۰ متری وارد تونل‌های آبرسان فوقانی شده و پس از عبور از شفت‌های تحت فشار و تونل‌های آبرسانی تحتانی، در تراز حدود ۶۹ وارد نیروگاه می‌شود. این سیستم شامل مجموعه‌ی عظیمی از حفاری‌های زیرزمینی با حجمی بالغ بر ۱۵۰۰۰۰ مترمکعب است و در تکیه‌گاه چپ سد ایجاد می‌شود. با توجه به مشخصات طرح و شرایط اجرایی موجود، حفاری شفت‌ها بعد از حفاری مخازن و اجرای کلاهی بتونی، لازم است با انتخاب طرح آتشیاری مناسب، میزان لرزش را به گونه‌ای کنترل کرد که به سازه‌ی بتونی احداث شده آسیب وارد نشود.

این مخازن از نظر زمین‌شناسی در سازند بختیاری واقع شده‌اند که شامل کنگلومرا با میان‌لایه‌های گل‌سنگی است. ضخامت لایه‌های گل‌سنگ متغیر و بین ۱ تا ۸ متر متغیر است. در مجموع کیفیت سنگ دربرگیرنده‌ی مخازن بر اساس طبقه‌بندی کیفی توده سنگ بسته به نوع سنگ از خیلی ضعیف (در گل سنگ) تا خوب (در کنگلومرا) ارزیابی شده است. در شکل (۱) نمایی سه‌بعدی از موقعیت مخازن فشارشکن، شفت و تونل آب‌بر نشان داده شده است. در شکل (۲) الگوی پیشنهادی حفاری چال‌های انفجاری تمام‌مقطع



شکل ۲: الگوی پیشنهادی حفاری چال‌های انفجاری تمام‌مقطع



شکل ۱: نمایی سه‌بعدی از موقعیت مخازن فشارشکن، شفت و تونل

جدول ۱: مشخصات ابعادی مخازن فشارشکن

ایتم	طول (m)	قطر (m)	شیب (%)	سطح مقطع (m <sup>2</sup> )	تعداد	حجم حفاری (m <sup>2</sup> )
شفت مخزن ضربه‌گیر	۶۶	۱۸	قائم	۲۵۴	۴	۵۰۹۰۰
دستک تراز ۲۳۰	۱۷۵	۱۶	۱	۲۴۱	۴	۱۶۸۸۷۰
دستک تراز ۱۸۵	۱۷۵	۱۲/۶	۱-	۱۳۱	۴	۹۲۰۲۹

### ۳- مدل‌های ریاضی پیش‌بینی لرزش

از جمله روش‌هایی که امروزه در فعالیت‌های انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرد طراحی عملیات انفجار بر اساس حداکثر مقدار مجاز سرعت در یک فاصله مشخص می‌باشد. زیرا بهترین مبنا جهت بررسی قدرت تخریبی امواج، حداکثر سرعت جابجایی ایجاد شده توسط امواج لرزه‌ای می‌باشد (Torano and et al., 2008). اساس اکثر روابط که تاکنون برای پیش‌بینی لرزش ناشی از انفجار ارائه شده به صورت رابطه کلی (۱) بیان می‌شود. در جدول (۲) مهمترین روابط تجربی موجود آورده شده است (Osanloo and Aliasghari, 2008).

$$PPV = K \times D^A \times Q^B \quad (1)$$

جدول ۲: روابط تجربی پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات (Torano and et al., 2008)

فاصله مقیاس شده	رابطه	نام رابطه	ردیف
$\left(\frac{D}{Q^{0.5}}\right)$	$PPV = K \times \left(\frac{D}{Q^{0.5}}\right)^{-B}$	اداره معادن آمریکا	۱
$\left(\frac{Q}{D^3}\right)$	$PPV = K \times \left(\frac{Q}{D^3}\right)^B$	لاتگفوس	۲
$\left(\frac{D}{Q^{\frac{1}{3}}}\right)$	$PPV = K \times \left(\frac{D}{Q^{\frac{1}{3}}}\right)^{-B}$	گوش	۳
$\left(\frac{D^{0.5}}{Q}\right)$	$PPV = K \times \left(\frac{D^{0.5}}{Q}\right)^{-B}$	دیمن	۴

در تمامی روابط ارائه شده PPV بیشترین سرعت ذرات، D فاصله نقطه رفتارنگاری تا محل انفجار، Q میزان خرج منفجرشده در هر تاخیر، K، B ثابت‌های مربوط به شرایط منطقه انفجاری می‌باشد که در هر منطقه با رفتارنگاری تعدادی از انفجارها محاسبه می‌گردد. در تمامی این‌گونه روابط به کسری که فاصله و میزان خرج در آن نقش مستقیم دارند، فاصله مقیاس شده می‌گویند. در کلیه این روابط با قرار دادن میزان خرج در هر تاخیر و فاصله نقطه مورد بررسی از محل انفجار می‌توان بیشترین سرعت ذرات را محاسبه نمود. جهت محاسبه این میزان خرج بدین صورت عمل می‌شود که مقدار ماده منفجره در هر ردیف انفجاری محاسبه و ردیفی که بیشترین خرج مصرفی را داراست به عنوان ردیف موثر و ایجاد کننده حداکثر شدت موج در نظر گرفته می‌شود. مرکز این ردیف به عنوان مرکز انفجار تعریف گردیده و برای محاسبه فاصله انفجار از ایستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۴- ارزیابی روابط تجربی

قابلیت مدل‌های تجربی برای پروژه‌های مختلف متفاوت است. ممکن است رابطه‌ای برای یک مورد مطالعاتی خاص جوابگو باشد ولی برای مورد دیگر از دقت پایینی برخوردار باشد. برای ساختگاه‌های مختلف می‌بایست کارایی هر یک از روابط سنجیده شده و رابطه‌ای که بیشترین همخوانی را با نتایج دارد انتخاب شود. در جدول (۳) نتایج حاصل از مقایسه روابط تجربی با استفاده از رگرسیون غیر خطی آورده شده است. با توجه به نتایج جدول (۳) رابطه گوش بهترین نتیجه را برای پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات را دارا می‌باشد. مقدار ضریب همبستگی این رابطه در حدود ۶۹ درصد می‌باشد. در شکل (۲) نمودار رابطه مقیاس شده با حداکثر سرعت جابجایی ذرات برای هر یک از روابط آورده شده است.

جدول ۳: ضرایب فرمول‌های تجربی به همراه مقایسه ضرایب همبستگی

نام رابطه	B	K	ضریب همبستگی
اداره معادن آمریکا	-1/064	99/024	65/2
لاتگفوس	0/679	47/082	60/7
گوش	-1/098	215/377	69/1
دیمن	-0/904	6/851	50/8

### ۵- مدل ارائه شده برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات با استفاده از رگرسیون چند متغیره

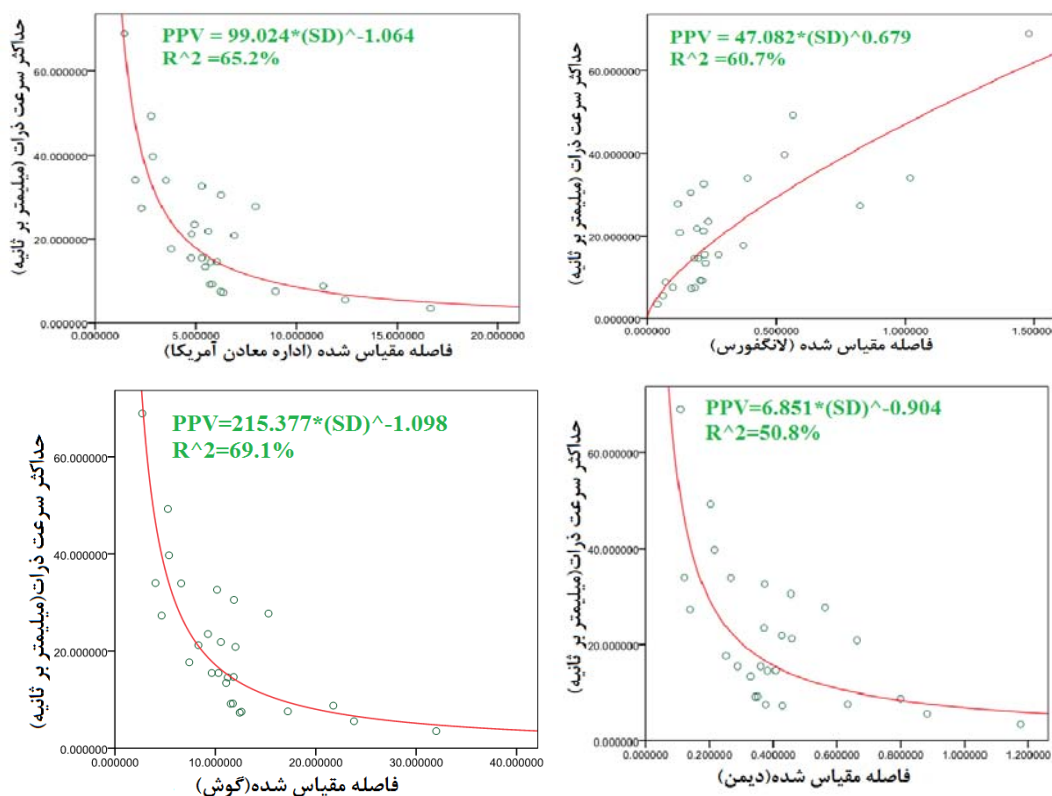
برای ارائه چنین مدلی با در نظر گرفتن رابطه (۱) که با بررسی تمامی مدل‌های ارائه شده نتیجه شده است و با لگاریتم‌گیری از طرفین رابطه (۱) رابطه فوق به شکل رابطه (۲) درمی‌آید.

$$\log(\text{PPV}) = \log(k) + a \log(D) + b \log(Q) \quad (2)$$

با ساده‌سازی رابطه (۲) می‌توان رابطه (۳) را تعریف کرد.

$$Y = AX_1 + BX_2 + C \quad (3)$$

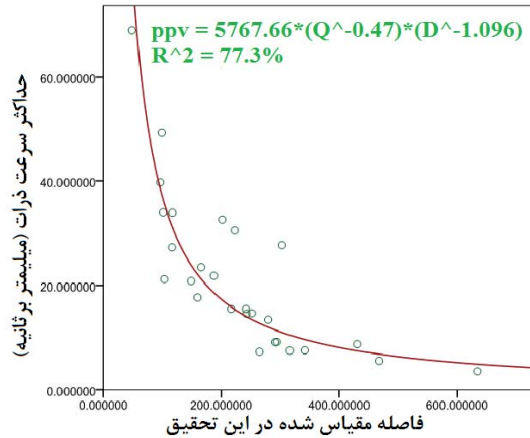
در رگرسیون چند متغیره با برقراری رابطه‌ای مشابه بین پارامترهای معادله (۳) ضرایب معادله (۲) بدست خواهد آمد. با انجام رگرسیون چند متغیره با استفاده از نرم‌افزار SPSS ضرایب معادله (۲) بدست آمده که در جدول (۴) ارائه شده است. در شکل (۳) نمودار فاصله مقیاس شده رابطه ارائه شده در این تحقیق و حداکثر سرعت ذرات نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار رابطه مقیاس شده با حداکثر سرعت جابجایی ذرات

جدول ۴: ضرایب رابطه ۱ ارائه شده در این تحقیق

ضریب همبستگی	b	a	k
77/3%	-0/471	-1/096	5767/66



شکل ۴: نمودار فاصله مقیاس شده رابطه ارائه شده در این تحقیق و حداکثر سرعت ذرات

با کمک نتایج حاصل از رگرسیون چند متغیره روابط (۴) و (۵) برای محاسبه میزان لرزش حاصل از انفجار در شفت‌های سد گتوند علیا ارائه شده است.

$$ppv(\text{mm/sec}) = 5767.66 \times Q_{(kg)}^{-0.471} \times D_{(m)}^{-1.096} \quad (۴)$$

$$ppv(\text{mm/sec}) = 5767.66 \times (Q_{(kg)}^{-0.43} \times D_{(m)})^{-1.096} \quad (۵)$$

البته بر طبق نظر برخی از محققین، باید به رابطه (۱) جزئی به صورت  $e^{-\alpha(\frac{D}{Q})}$  که به نام فاکتور تضعیف محیط خوانده می‌شود را اضافه نمود. این جزء بیانگر این واقعیت است که با فاصله گرفتن موج از مرکز به دلیل تاثیر پارامترهایی نظیر جنس سنگ‌ها، توالی لایه‌ها و درزه‌داری محیط، از دامنه‌ی موج کاسته شده و در اصطلاح میرا می‌شود که این کاهش در دامنه‌ی موج موجب کم شدن سرعت لرزش زمین می‌شود. با در نظر گرفتن این جزء می‌توان معادله کلی لرزش را به صورت رابطه (۶) تعریف کرد.

$$ppv = k \times Q^a \times D^b \times e^{-\alpha(\frac{D}{Q})} \quad (۶)$$

با لگاریتم‌گیری از طرفین رابطه (۶) رابطه فوق به شکل رابطه (۷) درمی‌آید. با کمک نتایج حاصل از رگرسیون چند متغیره روابط (۸) برای محاسبه میزان لرزش حاصل از انفجار در شفت‌های سد گتوند علیا با در نظر گرفتن فاکتور تضعیف محیط ارائه شده است و دومین رابطه ارائه شده در این تحقیق است.

$$\log(PPV) = \log(k) + a \log(D) + b \log(Q) \times -\alpha \left(\frac{D}{Q}\right) \log e \quad (۷)$$

$$ppv(\text{mm/sec}) = 9550 \times (D^{-0.831}) \times (Q^{-0.738}) \times \left(e^{-0.461(\frac{D}{Q})}\right) \quad (۸)$$

در جدول (۵) میزان ضریب همبستگی میزان حداکثر سرعت ذرات و میزان پیش‌بینی شده توسط روابط ارائه شده در این تحقیق مقایسه شده است.

جدول ۵: میزان ضریب همبستگی میزان حداکثر سرعت ذرات و میزان پیش‌بینی شده توسط روابط

نام رابطه	اداره معادن امریکا	لانگفوس	گوش	دیمن	رابطه ۱ ارائه شده در این تحقیق	رابطه ۲ ارائه شده در این تحقیق
ضریب همبستگی	68/5	63/9	72/4	53/5	78/9	۸۰

### ۶- نتیجه گیری

با توجه به نتایج ثبت شده حداکثر سرعت ذرات و پس از ارائه هر رابطه، صحت نتایج ارائه شده به کمک آن رابطه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از روابط پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات نشان می‌دهد رابطه (۱) و (۲) ارائه شده در این تحقیق با استفاده از رگرسیون چند متغیره بیشترین میزان ضریب همبستگی را در پیش‌بینی میزان حداکثر سرعت ذرات به ترتیب در حدود  $77/3$  و  $78/5$  درصد داشته و میزان ضریب همبستگی حداکثر سرعت اندازه‌گیری شده با حداکثر سرعت پیش‌بینی شده به ترتیب در حدود  $78/9$  و  $۸۰$  درصد است که به مراتب بهتر از روابط تجربی دیگر می‌باشند.

### ۷- منابع

1. Jimeno, C.L. and Jimeno, E.L., 1995, Drilling and Blasting of Rocks, A, A, Balkama, Rotterdam, pp345-357.
2. Ambraseys, N.R. and Hendron, A.J., 1968, Dynamic Behaviour of Rock Mass. Rock Mechanics In Engineering Practices, John Wiley and Sons, London.
3. Tantawy, M., 2009, Artificial neural network for prediction and control of blasting vibrations in Assiut (Egypt) limestone quarry; International journal of rock mechanics and mining sciences vol 49, pp426-431.
4. Dessureault, S, Corse Notes, 2003, Rock Excavation, university of Arizona mining and geological engineering, pp 132-146.
5. Torano, J.P.; Ramirez, R. and Diego, I., 2008, Analysis of the environmental effects of ground vibration produced by blasting in quarries, International journal of mining, reclamation and environment, vol, 20, pp249-266.
6. Monoj, K. and Singh, T.N., Prediction of blast induced ground vibration and frequency in opencast mine: A neural network approach, Journal of sound and vibration, vol, 289, pp711-725.
7. Osanloo, M. and Aliasghari, H., 2008, Investigation of ground vibration and its relation with specific charge in two Iran's copper mines, proceedings of seventeenth international symposium on mine planning and equipment selection (mpes), Beijing, china, pp733-741.