

## تأثیر لرزش زمین ناشی از عملیات انفجار تونل‌های آبرسان و مخازن بر سازه‌های زیرزمینی سد گتوند علیا

حسن بخشنده امنیه<sup>۱\*</sup> و معین بهادری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه معدن، دانشکده مهندسی دانشگاه کاشان، ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج، گروه معدن، دانشکده مهندسی دانشگاه کاشان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۶/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۲۴، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۳/۲۵)

### چکیده

لرزش زمین یکی از آثار جانبی عملیات انفجار است. معیار مهم در ارزیابی میزان خسارت ناشی از لرزش زمین، حداکثر سرعت ذرات است. به منظور بررسی اثرات امواج حاصل از انفجار در دهانه‌های آبگیر و مخازن ضربه‌گیر روی سازه‌های زیرزمینی و بتن‌ریزی سد گتوند علیا، ۱۶ نگاشت ۳ مؤلفه‌ای و در مجموع ۴۸ رکورد حاصل از ۴ انفجار ثبت شد. این عملیات با ۴ دستگاه لرزه‌نگار PG-2002 با لرزه‌سنج‌های سه مؤلفه‌ای GS-11D در سه امتداد متعامد شعاعی، مماسی و قائم برداشت و با نرم‌افزار DADISP پردازش شد. با استفاده از فاکتور فاصله مقیاس شده رابطه‌ای برای پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات ناشی از انفجار ارائه شد. این رابطه بر اساس ریشه سوم فاصله مقیاس شده و ضریب همبستگی ۰/۸۵ است. دقت این رابطه به کمک الگوریتم ژنتیک به مقدار ۰/۸۹ افزایش پیدا کرد. باتوجه به حداقل فاصله ۵۶/۲ متری سازه تا مرکز انفجار، حداکثر میزان خرج مجاز در هر تاخیر ۲۵۴/۴ کیلوگرم پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: انفجار، لرزش زمین، حداکثر سرعت ذرات، الگوریتم ژنتیک

## Investigating the influence of blasting operations at the surge tanks and storage facilities on the underground structures of Gotvand Olya dam

Hassan Bakhshandeh Amnieh<sup>1\*</sup>, and Moein Bahadori<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mining, Faculty of Engineering, University of Kashan, Iran

(Received: 01 September 2010, accepted: 15 March 2011, available online: 15 June 2011)

### Summary

Ground vibration is an inevitable consequence of blasting operations in open pit mining and civil engineering projects. A large amount of energy is released in every blasting exercise in the form of wave propagation, which can cause serious damage to the surrounding environment. Safe design of blasting for underground structures and tunneling are nowadays carried out mainly based on the permissible peak particle velocity (PPV), which has become a major criterion in setting out the appropriate safety standards envisaged to prevent structural damage near such operations. Many published studies have produced correlations for PPV prediction using experimental data. The Gotvand Olya Dam is one of the major civil engineering projects in the last thirty years in Iran,

\*Corresponding author:

bakhshandeh@kashanu.ac.ir

\*نگارنده رابط:

constructed as the last dam on the Karoon River with the aim of increasing environmentally friendly electrical energy of the country, seasonal flood control in the province, and a supply of agricultural water for the strategic farming grounds of Khoozestan. The geological formations of Gotvand include the two main formations of Bakhtiyari and Aghajari. The existence of discontinuities in these formations as well as joint sets and their low inherent strength caused a number of challenges in blasting design operations. This dam is 30 km north west of Shoshtar in the Khoozestan province, and 12 km away from Gotvand. In this study, 16 records of 3 components produced from 4 blasts were obtained using 4 seismographs of the type PG-2002 at Intac and surge tanks of the Gotvand Olya Dam in order to investigate their effects on underground structures. The three-component seismometers were of the GS-11D type and the records were analyzed using DADISP software. The explosion materials used were ANFO and dynamite, and the maximum weight of the explosions per delay in the Intac and surge tank were in the range of 32.0 to 343.3 kg. The positions of the seismometers were in the range of 56.2 to 145.5 meters away from the centre of blast blocks. The permissible peak particle velocity was taken from the Korean Institute of Geology, Mining and Materials. Using the scale distance, an exponential equation based on the cubic root of the charge weight per delay and coefficient correlation of 85% was proposed for predicting the PPV. In this relationship, the geological coefficients of the Gotvand area were estimated to be 20.339 and -3.08. Using a genetic algorithm, an improved coefficient correlation between the experimental and predicted PPV of 89% was obtained. The results from the genetic algorithm applied for the coefficients of a, b, and n in the equation of  $PPV=b(d/w^n)^a$  were -9.286849, 9.769703 and 0.745959, respectively. Considering this proposed relationship, the minimum distance of 56.2 m to the centre of the blast block and the permissible peak particle velocity of 254 mm/s for a 10 day old concrete, the maximum charge weight per delay was found to be 254.4 kg.

**Key words:** Blasting, ground vibration, peak particle velocity, genetic algorithm

## ۱ مقدمه

به طوری که امواج دارای بسامدهای زیادتر، فاصله تأثیر کمتری خواهند داشت. با توجه به امکان تخریب سازه در اثر عبور امواج، می توان با کنترل مشخصات موج انتشار یافته، نیروهای دینامیکی حاصل از انفجار را پیش بینی و کنترل کرد. یافتن مقادیر استاندارد و مطمئن برای اجتناب از آسیب رساندن به سازه های زیرزمینی مانند مغارها، انبارهای ذخیره سازی سوخت، تونل های انتقال و انحراف آب الزامی است. به طور کلی آسیب های وارد بر سازه های بتنی تونل ها در اثر عملیات انفجار با دو عامل پرتاب سنگ و لرزش زمین مرتبط است. با توجه به روابط تجربی پیش بینی مقدار حداکثر سرعت ذرات و با تغییر در پارامترهای قابل کنترل، می توان میزان لرزش ناشی از انفجار را پیش بینی و از آسیب های احتمالی جلوگیری

از مراحل زمان بر در فرایند احداث تونل عملیات حفاری است. هنگام برخورد با ساختارهای زمین شناسی متفاوت، تاخیر در عملیات احداث تونل افزایش می یابد و موجب بیشتر شدن هزینه های عملیاتی می شود. کاهش زمان عملیات حفاری و انفجار و به دنبال آن احداث سامانه نگهداری، از روش های کاهش هزینه احداث تونل است. در حفر تونل با عملیات انفجار، مقادیر زیادی انرژی در زمان بسیار کوتاهی آزاد می شود که با تولید و انتشار موج ضربه در محیط اطراف همراه خواهد بود. امواج انفجاری پس از تولید در جهت های متفاوت انتشار می یابند و انرژی آنها با افزایش فاصله از منبع، تضعیف می شود. میرایی امواج با بسامد زیاد سریع تر است

علاوه بر روش مقاوم‌سازی سازه در مقابل امواج، کنترل میزان لرزش ناشی از عملیات انفجار، یکی دیگر از راه‌های کاهش اثرات تخریبی است. از این رو به کمک روابط تجربی یا مدل‌سازی‌های عددی، مشخصات موج تخریب‌کننده محاسبه و براساس آن مقدار ماده منفجره مصرفی مجاز در هر انفجار مشخص می‌شود (بخش‌نامه و جواهریان، ۱۳۸۶).

در این مقاله به منظور بررسی اثرات امواج حاصل از انفجار در دهانه‌های آبگیر و مخازن ضربه‌گیر روی سازه‌های زیرزمینی و بتن‌ریزی سد گتوند علیا، ۱۶ نگاشت ۳ مولفه‌ای و در مجموع ۴۸ رکورد حاصل از ۴ انفجار ثبت و برداشت شد. این عملیات با ۴ دستگاه لرزه‌نگار PG-2002 با لرزه‌سنج‌های سه‌مؤلفه‌ای GS-11D در سه امتداد متعامد شعاعی، مماسی و قائم برداشت و با نرم‌افزار آنالیز علائم DADISP پردازش شد. این نرم‌افزار براساس اصول یک صفحه گسترده طراحی و برای پردازش سیگنال‌های رقمی از آن استفاده شده است. اطلاعات حاصل از همه لرزه‌سنج‌ها به صورت آنالوگ است که در دستگاه‌های لرزه‌نگار به وضعیت رقمی تبدیل می‌شود. اطلاعات دیگر شامل تاریخ اجرای آزمایش‌ها، نام سیگنال، زمان ثبت و حداکثر و حداقل علائم است. براساس راهنمای استفاده و به کارگیری لرزه‌نگار PG-2002، دستگاه به گونه‌ای درجه‌بندی شده که با حذف اثر دستگاه تصحیح می‌شود و سرعت ذرات را برحسب میلی‌متر بر ثانیه محاسبه می‌کند. با استفاده از فاکتور فاصله مقیاس شده، رابطه‌ای برای پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات ناشی از انفجار عرضه شد و در نهایت با کمک فاکتور مقدار خرج به‌ازای هر تاخیر و الگوریتم ژنتیک، مقدار مجاز خرج مصرفی برای انفجار در دهانه‌های آبگیر و مخازن ضربه‌گیر سد گتوند علیا برآورد شده است.

کرد. دووال و اتکینسون (۱۹۵۹) مقدار حداکثر سرعت ذرات مجاز برای کنترل آسیب‌های احتمالی به تونل‌ها را در توده‌سنگ گرانتیت حفر شده، ۲۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه و در مورد ماسه‌سنگ، ۷۶۰ میلی‌متر بر ثانیه پیشنهاد کرده‌اند. شاخه مهندسی ارتش آمریکا (۱۹۷۲) برای دیواره‌های سنگی سازه‌های زیرزمینی، مقدار مجاز این فاکتور را ۵۰۰ میلی‌متر بر ثانیه توصیه کرده است. لانگ‌فوس و کیل‌استروم (۱۹۷۳) مقدار حداکثر سرعت ذرات برای تشکیل ترک‌های جدید در سازه‌های زیرزمینی را ۶۱۰ میلی‌متر بر ثانیه پیشنهاد کرده‌اند. به منظور پیش‌بینی آسیب‌های احتمالی وارده بر سازه‌های تونل می‌توان فاکتور حداکثر سرعت ذرات را با خواص ذاتی و مقاومت‌های برشی و کششی بتن مرتبط کرد. در مورد بتنی با مقاومت کششی ۱/۵ مگاپاسکال و مدول یانگ ۱۵ گیگاپاسکال، مقدار مجاز حداکثر سرعت ذرات ۳۰۰ میلی‌متر بر ثانیه پیشنهاد شده است. اریارد (۱۹۸۰) با اجرای آزمایش‌های گوناگون روی شکستگی‌های به وجود آمده در بتن، حداکثر سرعت ذرات مجاز را ۲۵۴۰ میلی‌متر بر ثانیه پیشنهاد کرده است. طراحی عملیات انفجار براساس حداکثر مقدار مجاز جابه‌جایی ذرات در فاصله‌ای مشخص از جمله روش‌هایی است که امروزه در فعالیت‌های انفجار رویاز و زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شاخه مهندسی ارتش آمریکا، ۱۹۹۷ و ۱۹۹۵؛ فنون انفجار در سنگ، ۱۹۹۸). اندازه لرزش ایجاد شده در زمین بستگی به مشخصات فیزیکی و زمین‌شناسی توده‌سنگ، فاصله از منبع ایجاد لرزش، میزان خرج مصرفی و مشخصات چشمه موج دارد (اولوفسون، ۱۹۹۸؛ هاشاش و همکاران، ۲۰۰۱؛ لوکا و ترا، ۲۰۰۳). مهم‌ترین تغییرات در خصوصیات امواج لرزه‌ای کاهش انرژی و دامنه است (نوروزی و همکاران، ۱۳۸۶). با توجه به تأثیر مخرب امواج بر مقاومت سازه‌ها و به منظور بهینه‌سازی رفتار مقاومتی آنها،

DADISP پردازش شدند. دستگاه‌ها به گونه‌ای نصب شد که بتوان تا شعاع تاثیر ۱۲۰ درجه‌ای انتشار امواج را برداشت کرد.

برای تعیین حداکثر سرعت مجاز ذرات از جدول پیشنهادی انجمن زمین‌شناسی، معدن و مواد گره استفاده شده است. براین اساس حداکثر سرعت مجاز ذرات ناشی از عملیات انفجار به مدت زمان سپری شده از بتن‌ریزی وابسته است. مقادیر حداکثر سرعت ذرات مجاز براساس زمان سپری شده از عملیات بتن‌ریزی پیشنهاد شده از سوی انجمن زمین‌شناسی، معدن و مواد گره در جدول ۱ بیان شده است (چانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

### ۳-۱- عملیات ثبت و پردازش داده‌های لرزه‌ای حاصل از انفجار

به منظور بررسی اثر ارتعاش‌های ناشی از انفجارهای مخازن ضربه‌گیر و کف‌برداری دهانه‌های آبگیر بر سازه‌های بتنی تونل‌های آبرسان، شفت و مخازن، ۴ دستگاه لرزه‌نگار در تونل‌های آبرسان نصب شد. حداکثر وزن ماده منفجره مصرفی در هر تاخیر در انفجارهای سینه‌کار دهانه آبگیر ۳۲ کیلوگرم و در انفجارهای کف‌برداری این تونل‌ها ۲۴۲/۳۰۰ کیلوگرم است. به منظور بررسی تاثیر انتشار امواج حاصل از انفجار روی سازه‌های بتنی این تونل‌ها از معیار حداکثر سرعت ذرات استفاده شده است. مراحل گوناگون پردازش نگاشت ثبت شده با دستگاه PG-2002 برای مولفه‌های قائم، شعاعی و مماسی حاصل از انفجار در مخازن ضربه‌گیر در شکل ۲ نشان داده شده است. این پارامترها همراه با بسامد غالب، گویای میزان اثرات ناشی از انفجار به سازه‌های مورد نظر است. نتایج حاصل از پردازش این امواج در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود، موقعیت دستگاه‌ها در فاصله ۵۶/۲ متری تا ۱۴۵/۵ متری از مرکز بلوک‌های انفجاری قرار دارد.

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی سد گتوند علیا سد گتوند علیا در استان خوزستان در ۳۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان شوشتر و ۱۲ کیلومتری شهر گتوند واقع شده و آخرین سدی است که روی رودخانه کارون در حال احداث است. بدنه سد از نوع سنگ‌ریزه‌ای با هسته رسی، طول تاج ۷۶۰ متر، عرض تاج ۱۵ متر، ارتفاع از پی ۱۸۰ متر و دارای حجم مخزن ۴۵۰۰ میلیون متر مکعب است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به سد گتوند علیا نشان داده شده است.

سازندهای زمین‌شناسی محدوده سد گتوند علیا شامل دو سازند اصلی بختیاری و آغاچاری است. به‌طور کلی از نظر سنگ‌شناسی سازند بختیاری از رسوبات کنگلومرایی با ضخامت زیاد و تشکیل‌دهنده تکیه‌گاه‌ها در دو جناح سد با ارتفاع بیش از ۳۰۰ متر است. سازند آغاچاری تناوبی از لایه‌بندی‌های گل‌سنگ، سیلت‌استون و ماسه‌سنگ با لایه‌های کنگلومرا است. در این سازند از لحاظ ساختاری دو دسته درزه اصلی و یک دسته درزه غیر سامان‌مند (سیستماتیک) مشاهده می‌شود. وجود ناپیوستگی در سطوح لایه‌بندی سازند آغاچاری به همراه درزه‌های موجود در این تشکیلات و مقاومت ذاتی کم آن سبب شده که عملیات حفاری در این سازند با مشکلاتی همراه باشد. محدوده ورودی تونل‌های آبرسان و مخازن ضربه‌گیر در جناح چپ سد واقع شده است که در محدوده سازند بختیاری است.

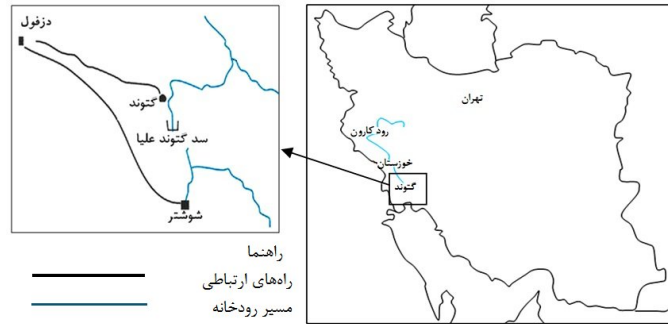
### ۳- روش تحقیق

به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر میزان لرزش ناشی از انفجار در سد گتوند علیا رکوردهای حاصل از ۴ انفجار در دهانه‌های آبگیر و مخازن ضربه‌گیر با لرزه‌نگارهای رقمی PG-2002 ثبت و پردازش شدند. لرزه‌سنج‌های سه‌مولفه‌ای GS-11d در سه امتداد متعامد شعاعی، مماسی و قائم نصب شده و نگاشت‌های برداشت شده با نرم‌افزار

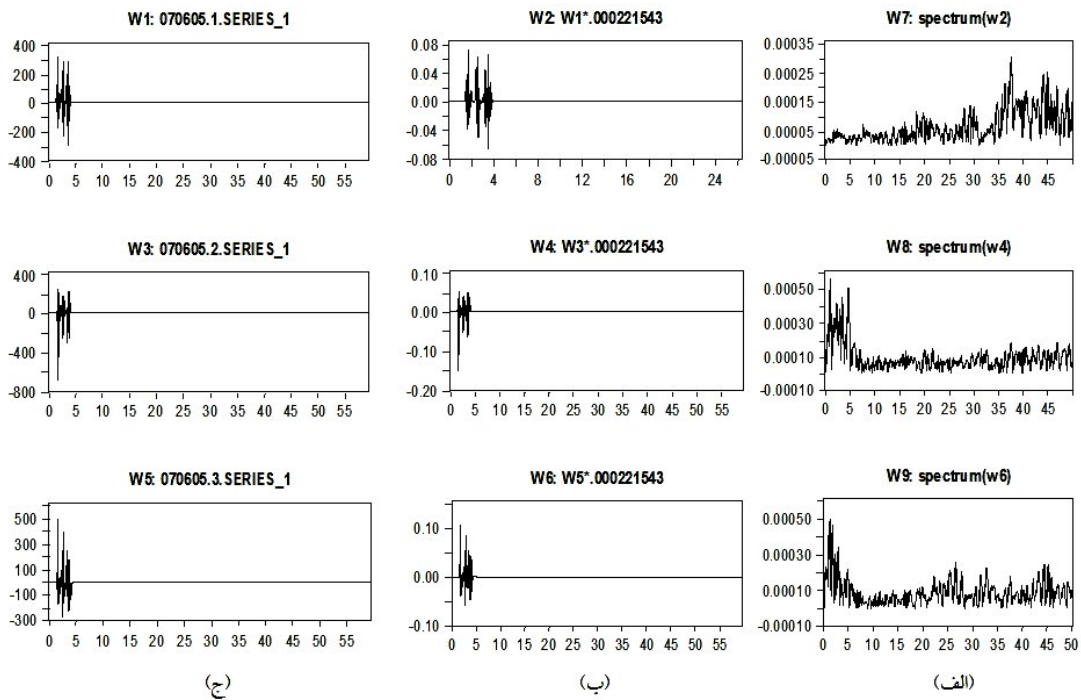
۲-۳ تحلیل داده‌های لرزه‌ای

پس از پردازش نگاشت‌های حاصل از انفجار، تحلیل‌های آماری روی داده‌ها صورت گرفت. تحلیل نگاشت‌ها برای رسیدن به رابطه‌ی کلی برای برآیند حداکثر سرعت ذرات با استفاده از نرم‌افزار اکسل صورت گرفته است. به‌منظور پیش‌بینی برآورد میزان خسارت احتمالی، رابطه تجربی (۱)

براساس ریشه سوم فاصله مقیاس شده برای ساختگاه این سد برآورد شد. این رابطه به شکل نمایی منفی و دارای ضریب همبستگی ۰/۸۵ است. نمودار کلی این رابطه در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$PPV = ۲۰۳۳۹ \quad Sd^{۳/۰۸} \quad (۱)$$


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و مسیرهای دسترسی به سد گتوند علیا.



شکل ۲. مراحل متفاوت پردازش لرزه‌نگاشت ثبت شده با دستگاه PG-2002 برای (الف) مؤلفه‌های مماسی، (ب) شعاعی و (ج) قائم لرزش حاصل از انفجار در مخازن ضربه‌گیر. محور افقی زمان برحسب ثانیه و محور قائم برحسب ولت که با حذف اثر دستگاه به میلی‌متر بر ثانیه تبدیل شده است.

افزایش فاصله از محل انفجار به طور نمایی کاهش پیدا می کند.

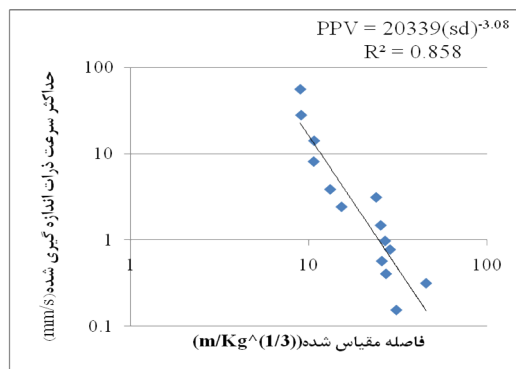
#### ۵ پیش بینی رابطه حداکثر سرعت ذرات با استفاده از الگوریتم عددی GA

بنابر پیشنهاد روی (۱۹۹۸) فاصله مقیاس شده، یکی از معیارهای کاربردی در پیش بینی و کنترل مقدار لرزش ناشی از انفجار است و شکل رابطه نمایی منفی، به منظور پیش بینی مقدار حداکثر سرعت ذرات با توجه به کاربرد زیاد و سادگی آن، به صورت رابطه (۳) بیان شده است.

$$PPV = b \left( \frac{d}{W^n} \right)^a \quad (3)$$

جدول ۱. مقدار حداکثر سرعت مجاز ذرات براساس زمان سپری شده از عملیات بتن ریزی براساس داده های انجمن زمین شناسی، معدن و مواد گره.

زمان سپری شده از بتن ریزی	حداکثر سرعت ذرات (mm/s)
کمتر از ۳ ساعت	۵۰/۸
بین ۳ تا ۲۴ ساعت	۶/۳
بین ۱ تا ۳ روز	۲۵/۴
بین ۳ تا ۷ روز	۵۰/۸
بین ۷ تا ۱۰ روز	۱۲۷
بیشتر از ۱۰ روز	۲۵۴



شکل ۳. نمودار حداکثر سرعت ذرات نسبت به فاصله مقیاس شده در سد گتوند علیا.

که در آن PPV، حداکثر سرعت ذرات برحسب میلی متر بر ثانیه، Sd فاصله مقیاس شده و نسبت فاصله ایستگاه نقطه اندازه گیری تا مرکز بلوک انفجاری به ریشه سوم حداکثر وزن ماده منفجره به کار رفته به ازای هر تاخیر برحسب  $\left(\frac{m}{kg}\right)^{1/3}$  است. ثابت های ساختگاه منطقه گتوند با توجه به اندازه گیری ها برابر ۲۰۳۳۹ و ۳/۰۸- برآورد شد. ضریب همبستگی این رابطه قابل قبول است اما به منظور افزایش دقت آن از روش الگوریتم عددی ژنتیک تحت نرم افزار مطلب استفاده شد.

#### ۴ فاکتورهای موثر بر مقدار لرزش زمین

##### ۴-۱ مقدار ماده منفجره مصرفی

مقدار ماده منفجره مصرفی در هر نوبت انفجار از مهم ترین فاکتورهای تعیین کننده میزان لرزش ناشی از انفجار است. شکل ۴ مقادیر حداکثر سرعت ذرات ثبت شده نسبت به مقدار خرج در هر تاخیر را که رابطه ای غیر خطی است نشان می دهد.

##### ۴-۲ فاصله تا محل انفجار

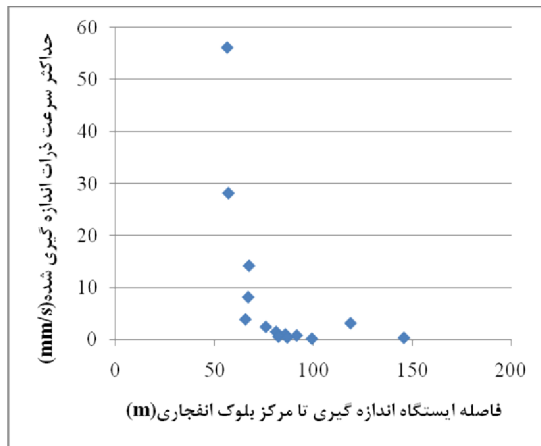
فاصله از محل انفجار، همانند مقدار خرج به کار رفته از پارامترهای موثر در مقدار لرزش زمین ناشی از انفجار است. سرعت ذرات را می توان با فاصله از محل انفجار طبق رابطه (۲) مرتبط دانست (کونیا و والتر، ۱۹۸۵):

$$V \propto \frac{1}{d^b} \quad (2)$$

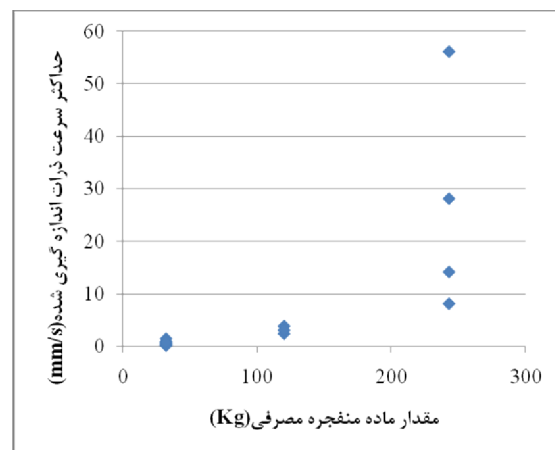
که در آن V سرعت ذرات و d فاصله نقاط اندازه گیری تا محل انفجار و b مقدار ثابت وابسته به منطقه انفجار است. شکل ۵ مقادیر حداکثر سرعت ذرات ثبت شده در برابر فاصله تا نقطه انفجار را نشان می دهد. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود، مقدار حداکثر سرعت ذرات با

جدول ۲. نتایج داده‌های حاصل از پردازش نگاشت‌ها با لرزه‌نگار PG-2002 در انفجارهای سد گتوند علیا.

ردیف	فاصله لرزه‌نگار تا محل انفجار (m)	فاصله مقیاس شده (m/kg <sup>1/3</sup> )	وزن خرج برای هر تاخیر (kg)	برآیند حداکثر سرعت ذرات (mm/s)
۱	۶۶/۸	۱۰/۷	۲۴۳	۸/۱۴
۲	۵۶/۲	۹	۲۴۳	۵۶/۱۷
۳	۶۷/۲	۱۰/۷۸	۲۴۳	۱۴/۲
۴	۵۶/۸	۹/۱۱	۲۴۳	۲۸/۱۷
۵	۸۰/۹	۲۵/۴۸	۳۲	۱/۴۷
۶	۸۵/۶	۲۶/۹۶	۳۲	۰/۹۸
۷	۹۸	۳۰/۸۷	۳۲	-
۸	۱۴۵/۵	۴۵/۸۳	۳۲	۰/۳۱
۹	۷۵/۷	۱۵/۳۵	۱۲۰	۲/۴۳
۱۰	۶۵/۴	۱۳/۲۶	۱۲۰	۳/۸۷
۱۱	۷۶/۱	۱۵/۴۳	۱۲۰	-
۱۲	۱۱۸/۵	۲۴	۱۲۰	۳/۱۳
۱۳	۸۲/۱	۲۵/۸۶	۳۲	۰/۵۷
۱۴	۸۶/۶	۲۷/۲۸	۳۲	۰/۴۰۵
۱۵	۹۹	۳۱/۱۸	۳۲	۰/۱۵۴
۱۶	۹۱/۳	۲۸/۷۶	۳۲	۰/۷۷۵



شکل ۵. ارتباط حداکثر سرعت ذرات با فاصله ایستگاه اندازه‌گیری تا مرکز بلوک انفجار.



شکل ۴. رابطه حداکثر سرعت ذرات نسبت به مقدار خرج به ازای هر تاخیر در سد گتوند علیا.

که در آن  $a$ ،  $b$  و  $n$  مقادیر ثابت عددی اند و با الگوریتم ژنتیک (GA) برآورد می‌شوند. مقدار  $\left(\frac{d}{w^n}\right)$  فاصله مقیاس شده و PPV مقادیر حداکثر سرعت ذرات پیش‌بینی شده هستند. در این تحقیق برای تحلیل داده‌ها سعی شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحت نرم‌افزار مطلب، همبستگی بهتری بین نتایج رابطه عرضه شده و مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد شود. الگوی عملیات الگوریتم ژنتیک مشابه عملیات رخ داده در طبیعت است. ابتدا جمعیتی از داده‌های اولیه به همراه تابع موردنظر برای تولید ارقامی که مقدار اندازه‌گیری شده آن در دسترس است برای نرم‌افزار تعریف شد. مقادیر اندازه‌گیری شده همان حداکثر سرعت ذرات و ارقام تولید شده نیز پیش‌بینی‌های صورت گرفته با تابع موردنظر است. برای این منظور تابع موردنظر برای الگوریتم تعریف و بازه‌های مجاز تغییرات ضرایب ثابت به نرم‌افزار داده شد. سپس ویژگی‌های ژنتیکی نسل اولیه در دسترس برای الگوریتم عددی GA تعریف شد. همانند آنچه که در مورد تنوع ژنتیکی در طبیعت رخ می‌دهد، برای محاسبات دستوراتی صادر می‌شود. این دستورها در عملیات صورت گرفته در این بررسی به شرح زیر است:

- مقدار جهش ژنتیکی در حداقل مقدار ممکن در نظر گرفته شد.
- هدف اجرای عملیات مقدار همبستگی بیشتر بین مقادیر تولید شده و اندازه‌گیری شده است.
- تعداد نسل مجاز (۱۰۰ نسل) برای پیشروی و بهبود همبستگی تعریف شد.
- دو فاکتور متوقف‌کننده برای ادامه محاسبات تعیین شد. این فاکتورها شامل زمان و تعداد توالی نسل‌اند. در حالت اول اگر در حین عملیات، زمان محاسبات از یک حد مجاز (که کاربر تعیین می‌کند) تجاوز کند، ادامه محاسبات متوقف می‌شود. در حالت دوم در بازه پیشروی

مجاز نسل‌ها اگر بهبودی در تابع هدف (همبستگی بهتر) تا نسلی به‌خصوص (در اینجا ۵۰ نسل) مشاهده نشد، ادامه توالی نسل متوقف می‌شود.

- نحوه رقابت برای پیدایش همگرایی در انتخاب طبیعی و تعداد عناصر شرکت‌کننده در هر رقابت تعیین شد. در این بررسی نوع رقابت از نوع tournament انتخاب شده و برای هر نوبت رقابت ۲ عضو جامعه به تصادف انتخاب می‌شود.

- به منظور حفظ تعداد جمعیت در طی توالی نسل، برای مثال در یک جامعه ۲۰ عضوی، ۲ عضو که در نسل حاضر بهترین همبستگی را با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند مستقیماً به نسل بعد منتقل می‌شوند. بنابراین ۲ عضو از جامعه نسل بعد ساخته شده است. در مرحله بعد از بین ۱۸ عضو باقی‌مانده نسل بعد ۸۰ درصد با رقابت و با نوترکیبی بین نسل حاضر ساخته شده و ۲۰ درصد نهایی نیز از طریق جهش ژنتیکی متولد می‌شوند.

در شکل ۶ توالی نسل‌های ساخته شده با الگوریتم ژنتیک برای داده‌های سد گتوند علیا نشان داده شده است. در این شکل محور افقی شماره نسل، محور قائم میزان همبستگی است. در هر نسل جفت داده‌ای که دارای بهترین ضریب همبستگی یا انطباق با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد، با نماد لوزی و میانگین ضریب همبستگی کل داده‌های هر نسل با نماد مربع مشخص شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پدیده انتخاب طبیعی همگرا به وضوح نمایان است و سعی دارد تا میانگین ضریب همبستگی داده‌ها را به میانگین ایدئال‌ترین داده نزدیک سازد.

نتایج عملیات صورت گرفته با الگوریتم ژنتیک برای تعیین ثابت‌های  $a$ ،  $b$  و  $n$  در رابطه (۳) به ترتیب برابر  $۰/۷۴۵۹۵۹$ ،  $۹/۷۶۹۷۰۳$ ،  $-۹/۲۸۶۸۴۹$  برآورد شد. مقدار ضریب همبستگی برای ثابت‌های تولید شده به کمک الگوریتم ژنتیک برابر  $۰/۸۹$  محاسبه شد. به‌منظور مقایسه

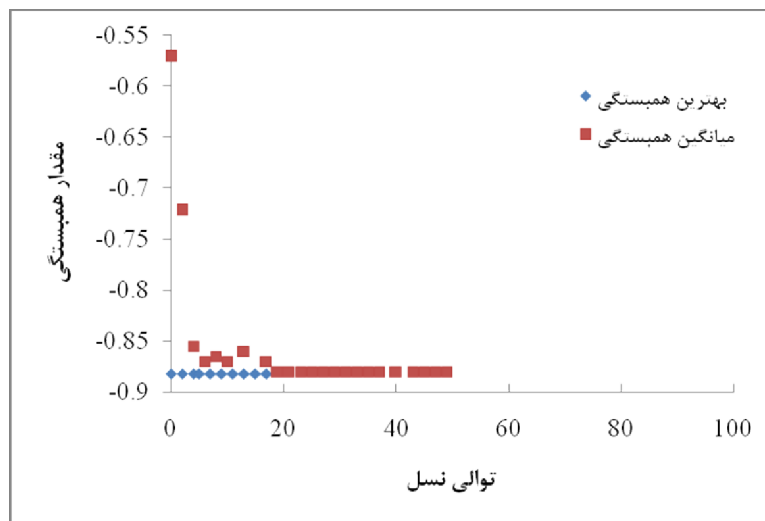


که در آن  $PPV_{ga}$  خروجی‌های الگوریتم ژنتیک برای رابطه (۳) و  $PPV_{old}$  مقادیر حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده است. در شکل ۷ تصویر رابطه (۴) و چگونگی انطباق مقادیر حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به کمک الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.

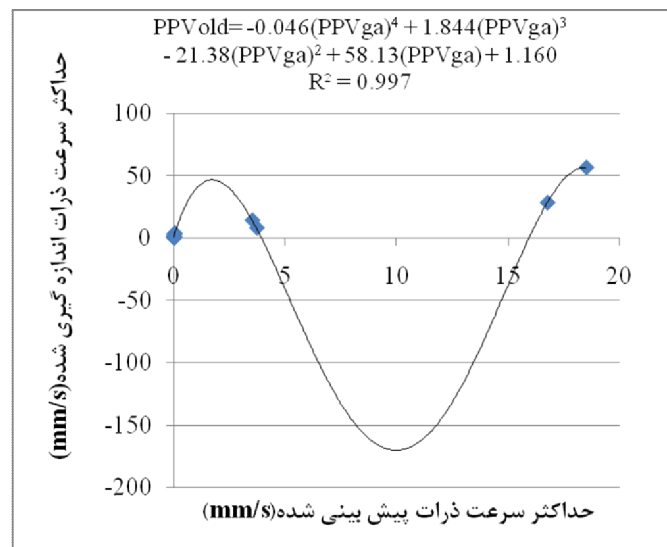
مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر ثبت شده حداکثر سرعت ذرات، خروجی الگوریتم ژنتیک برای رابطه (۳) به برنامه اکسل وارد شد و ضریب همبستگی بین این دو دسته مقادیر به کمک رابطه (۴) به مقدار ۰/۹۹۷ نزدیک شد.

$$PPV_{old} = -0.046PPV_{ga}^4 + 1.844PPV_{ga}^3 - 21.38PPV_{ga}^2 + 58.13PPV_{ga} + 1.160 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.997$$



شکل ۶. توالی نسل‌ها و گرایش مقدار ضریب همبستگی میانگین نسل به ضریب همبستگی ایدئال موجود در نسل؛ نماد لوزی برای حالت ایدئال نسل و نماد مربع برای میانگین ضریب همبستگی نسل. محور قائم مقدار ضریب همبستگی و محور افقی تعداد توالی نسل‌های تولید شده با الگوریتم ژنتیک است. مقدار میانگین همبستگی به مقدار بهترین همبستگی ۰/۸۲۰۱ همگرا شده است.



شکل ۷. انطباق مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده حداکثر سرعت ذرات با الگوریتم ژنتیک.

## ۶ نتیجه گیری

با توجه به پردازش نگاشت‌های حاصل از انفجارهای سد گتوند، بسامدهای غالب از ۱/۱ تا ۴۷/۵ هرتز برآورد شد. رابطه تجربی پیش‌بینی میزان خسارت احتمالی برای ساختگاه سد گتوند علیا به شکل نمایی منفی و دارای ضریب همبستگی ۰/۸۵ برآورد شد و این ضریب با کمک الگوریتم ژنتیک به ۰/۸۹ افزایش یافت. ثابت‌های منطقه با الگوریتم ژنتیک برآورد شد. مقدار ضریب همبستگی برای مقادیر پیش‌بینی شده و ثبت شده با استفاده از رابطه چندجمله‌ای ۰/۹۹۷ به دست آمد. با تکیه بر دقت زیاد رابطه پیشنهادی در پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات، می‌توان براساس فاصله بلوک انفجاری تا سازه موردنظر و نوع بتن مقدار حداکثر وزن ماده منفجره مصرفی مجاز را به‌ازای هر تاخیر تعیین کرد. با توجه به حداقل فاصله تا محل انفجار معادل ۵۶/۲ متر و حد مجاز حداکثر سرعت ذرات معادل ۲۵۴ میلی‌متر بر ثانیه برای بتن ۱۰ روزه، حداکثر خرج مجاز مصرفی در هر تاخیر ۲۵۴/۴ کیلوگرم برآورد شد.

## منابع

- بخشنامه امنیه، ح.، و جواهریان، ع.، ۱۳۸۶، تحلیل عددی تاثیر عوارض ساختاری بر انتشار موج تراکمی حاصل از انفجار در ماده بسپاری (پلیمری) پلکسی گلاس: مجله ژئوفیزیک ایران، ۱(۱)، ۱-۱۱.
- نوروزی، غ.، غفوری آشتیانی، م.، جوان دولوئی، غ.، و مختاری، م.، ۱۳۸۶، تعیین وابستگی امواج S و P در ناحیه مشهد: مجله ژئوفیزیک ایران، ۱(۱)، ۲۱-۳۵.
- Chang, H. R., Byung, H. C., Yang, K. K., and Hung, J. A., 2006, Case studies on tunneling with blasting and concurrent construction of
- concrete lining: Proceedings of the eighth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 442-445.
- Duval, W. I., and Atchison, T. C., 1959, Rock breakage with confined concentrated charges: Mining Engineering, **11**, 605-611.
- Hashash, Y. M. A., Hook, J. J., Schmidt, B., and Yao, J. I., 2001, Seismic behavior of underground structures and site response: Tunnelling and Underground Space Technology, **16**, 247-293.
- Konya, C. J., and Walter, E. L., 1985, Rock blasting, Springfield, Virginia: National Technical Information Service, 232-235.
- Longefors, U., and Kihlstrom, B., 1973, The modern technique of rock blasting: John Wiley and sons, New York.
- Lucca, F. J., and Terra, L. L. C., 2003, Tight construction blasting: ground vibration basics, monitoring, and prediction: [http://lawrenceks.org/web\\_based\\_agendas/2004/11-23-04/11-23-04H/blasting\\_tight\\_construction\\_whitepaper.pdf](http://lawrenceks.org/web_based_agendas/2004/11-23-04/11-23-04H/blasting_tight_construction_whitepaper.pdf), 1-21.
- Olofsson, S. O., 1998, Applied explosive technology for construction and mining: Publisher APPEX.
- Oriard, L. L., 1980, Observations on the performance on concrete at high stress levels from blasting: Proceedings of the Sixth Conference on Explosives and Blasting Technique, International society of Explosives Engineers, 1-10.
- Rock blasting technique, blasting with restriction, 1998, NTNU Department of Building Construction, project report, 14A-98.
- Roy, P. P., 1998, Characteristics of ground vibration and structure response to surface and underground blasting: Geotechnical and Geological Engineering, **16**, 151-166.
- US Army Corps of Engineering, 1972, Systematic drilling and blasting for surface excavation: Engineer Manual, 1110-2-3800, 145.
- US Army Corps of Engineering, 1995, causes of distress and deterioration of concrete: Engineer Manual, 1110-2-2002, chapter 3.
- US Army Corps of Engineering, 1997, construction of tunnels and shafts: Engineer Manual, 1110-2-2901, chapter 5.