

# مقایسه مدل‌های تجربی و شبکه عصبی در برآورد لرزش ناشی از آتشکاری در حفريات سد مسجدسلیمان

محمد فاروق حسینی

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مجتبی دادخواه

فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد استخراج معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

حسین کاظمی

فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد اکتشاف معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۲/۱/۳۰، تاریخ تصویب ۸۲/۹/۸)

## چکیده

در طرح توسعه نیروگاه مسجدسلیمان عملیات حفاری و آتشکاری به طور همزمان با کارهای مکانیکی و الکتریکی فاز یک انجام می‌شود. برای جلوگیری از آسیب دیدن سازه‌ها و تجهیزات نیروگاه فاز یک در اثر انفجارات انجام شده در طرح توسعه نیروگاه لازم است میزان لرزش ناشی از این انفجارات پیش‌بینی شود تا بتوان با توجه به حد مجاز لرزش، عملیات آتشکاری را به نحو مناسبی طراحی کرد. در این مقاله پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات توسط روابط تجربی و شبکه عصبی و بر اساس دو عامل فاصله از محل انفجار و مقدار ماده منفجره مصرفی به ازای هر تاخیر انجام شده است. نتایج نشان داد که پنج مدل تجربی پاسخ‌های تقریباً مشابهی ارائه می‌کنند اما شبکه عصبی علاوه بر خطای کمتر نسبت به روابط تجربی، به دلیل غیرخطی بودن، انعطاف‌پذیری زیاد و همچنین امکان حذف و اضافه نمودن هر تعداد از عوامل موثر بدون نیاز به کار گسترده، قابلیت‌های بسیار بیشتری نسبت به روابط تجربی دارد. با توجه به جمیع جهات پیشنهاد می‌شود برای پیش‌بینی میزان لرزش ناشی از انفجار از شبکه‌های عصبی استفاده شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان لرزش‌های اندازه‌گیری شده در حفريات فاز یک سد مسجدسلیمان در اثر آتشکاری در طرح توسعه سد، مقادیر کوچکی نسبت به حد مجاز لرزش داشته و با توجه به استانداردهای موجود، هیچگونه خطری ایجاد نمی‌کند.

## واژه‌های کلیدی: شبکه عصبی، روابط تجربی، لرزش، آتشکاری، سد مسجدسلیمان

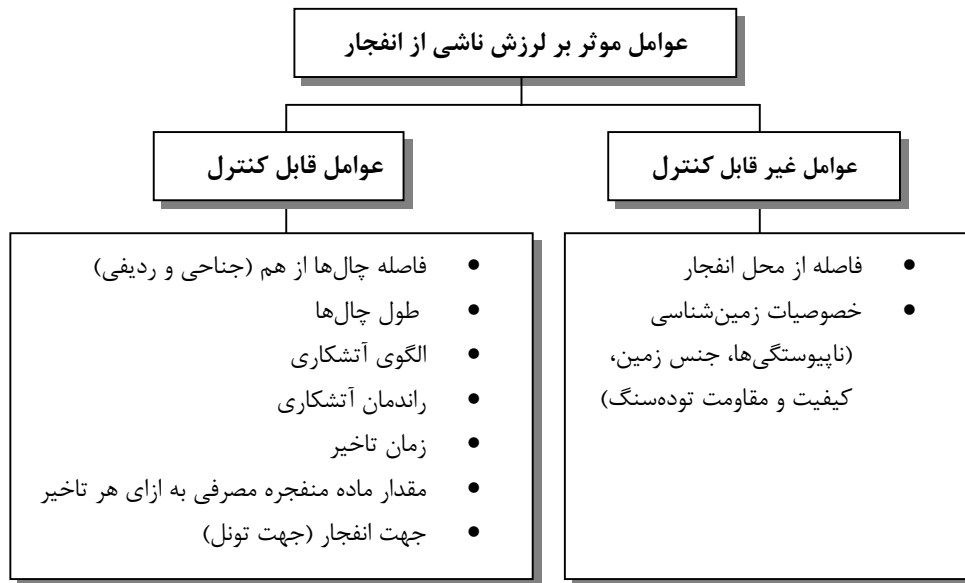
## مقدمه

زیرزمینی و در فاصله کمی از تجهیزات و ساختمان‌ها انجام شود. لرزش ناشی از انفجارات ممکن است بر ساختمان‌های بنا شده، بتن‌های موجود و نیز پایداری سقف فضایی که قبلاً حفر شده‌اند اثرات نامطلوب داشته باشد. بنابراین لازم است انفجارها به گونه‌ای انجام شود که خللی را در سایر عملیات ساختمانی و تاسیسات موجود به وجود نیاورد.

برای کاهش اثرات نامطلوب لرزش زمین بیشترین فعالیت محققان در زمینه پیش‌بینی میزان لرزش بوده است. بدین ترتیب می‌توان محدوده خطر اطراف محل انفجار را بدست آورد یا با توجه به حد مجاز لرزش، عملیات آتشکاری مناسبی را طراحی کرد تا کمترین آسیب به سازه‌های مجاور وارد شود. برای این مقاله به

عملیات انفجار برای حفر فضاهای روباز و زیرزمینی (که به منظور استخراج معادن یا مقاصد عمرانی صورت می‌گیرد) به دلیل هزینه کم و سهولت کاربرد از اهمیت خاصی برخوردار بوده و کاربرد گسترده‌ای دارد. انرژی آزاد شده از مواد منفجره علاوه بر خردایش سنگ‌ها موجب لرزش مناطق اطراف نیز می‌شود. این لرزش‌ها به صورت یک پدیده نامطلوب بر سلامت ساکنان و ساختمان‌ها اثر می‌گذارد. اگر ارتعاشات حاصل از انفجار از حد استاندارد بیشتر باشد به سازه‌های اطراف خسارت رساننده و از نظر زیست محیطی نیز تاثیرات نامطلوبی دارد.

در پروژه‌های عمرانی بزرگ به ویژه سدها و نیروگاه‌ها، گاهی لازم است عملیات آتشکاری در حفريات



شکل ۱: عوامل موثر بر لرزش ناشی از آتشکاری و تقسیم‌بندی آن‌ها [۱].

در ادامه نحوه پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات با روابط تجربی و شبکه عصبی با جزئیات بیشتری ارائه می‌گردد.

#### الف - روابط تجربی

همان‌طور که ذکر شد این روابط بر اساس فاصله تا محل انفجار و مقدار ماده منفجره به ازای هر تاخیر، حداکثر سرعت ذرات را پیش‌بینی می‌کنند. شکل کلی این روابط به صورت زیر است [۲]:

$$PPV = kR^a Q^b$$

(۱)

که در آن PPV حداکثر سرعت ذرات بر حسب میلیمتر بر ثانیه، R فاصله تا محل انفجار بر حسب متر، Q حداکثر خرج منفجر شده در هر تاخیر بر حسب کیلوگرم و k، a و b ضرایب ثابت می‌باشند.

در زیر مهم‌ترین روابط تجربی موجود آورده شده‌اند

[۲]:

الف) رابطه اداره معادن امریکا (۱۹۷۱)

$$PPV = kR^a Q^{-0.5a}$$

(۲)

ب) رابطه آمبرایس - هندرون (۱۹۶۲)

$$PPV = kR^a Q^{-0.33a}$$

(۳)

ج) رابطه لانگفوردس - کیلستروم (۱۹۷۳)

به بررسی روابط تجربی و شبکه عصبی و مقایسه آن‌ها در پیش‌بینی لرزش ناشی از انفجار در فضاهای زیرزمینی سد مسجدسلیمان می‌پردازد. از آنجا که عملیات حفاری و آتشکاری طرح توسعه نیروگاه مسجدسلیمان به طور همزمان با کارهای مکانیکی و الکتریکی فاز یک انجام می‌شود لذا نتایج حاصل از مدلسازی ارتعاشات می‌تواند برای جلوگیری از آسیب دیدن سازه‌ها و تجهیزات نیروگاه فاز یک در اثر انفجارات انجام شده در طرح توسعه نیروگاه سد به کار رود.

#### پیش‌بینی لرزش زمین در اثر آتشکاری

حداکثر سرعت ذرات<sup>۱</sup> (PPV) مهمترین پارامتری است که برای ارزیابی و پیش‌بینی میزان خسارت ناشی از لرزش زمین در اثر انفجار به کار می‌رود. تا به حال روابط تجربی مختلفی برای پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات پیشنهاد شده است. در این روابط پیش‌بینی لرزش صرفاً بر اساس فاصله تا محل انفجار و مقدار ماده منفجره مصرفی در هر تاخیر انجام می‌شود. به جز روابط تجربی می‌توان از شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز برای پیش‌بینی استفاده نمود. این شبکه‌ها می‌توانند پس از مشاهده تعداد کافی مثال، ارتباط بین ورودی‌ها (پارامترهای موثر بر ارتعاش) و خروجی (حداکثر سرعت ذرات) را بیابند و از این ارتباط برای مقاصد پیش‌بینی استفاده نمایند.

سنگی انجام شده نشان می دهد که کیفیت سنگ های محل (RMR) خوب می باشد [۵]. جدول ۲ مشخصات آتشکاری در حفاریات زی-ر زمی نی طرح توسعه سد را نشان می دهد.

جدول ۱: مشخصات فنی سد مسجدسلیمان [۵].

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

جدول ۲: مشخصات آتشکاری در طرح توسعه سد مسجدسلیمان.

قطر چال ها	۴۸ و ۵۱ میلی متر
طول چال ها	۲/۵، ۳/۲ و ۳/۵ متر
آرایش چال ها	موازی با برش V شکل در مرکز
نوع مواد منفجره مصرفی	انفو و دینامیت
نوع فتیله	کورتکس
خرج ویژه	۱/۱۳ تا ۱/۶۴ کیلوگرم بر متر مکعب
نوع چاشنی مصرفی	آنی، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی ثانیه

## ثبت داده های لرزه ای

به منظور بررسی تاثیر ارتعاشات انفجارهای انجام شده در حفاریات طرح توسعه بر روی مغار نیروگاه فاز یک سد مسجدسلیمان، عملیات ثبت داده های لرزه ای ۳۷ انفجار توسط یک دستگاه ژئوفن مدل USV1500 صورت پذیرفت (جدول ۳). ژئوفن به کار رفته قادر است سرعت جابه جایی ذرات در سه جهت اصلی و همچنین برآیند آن ها را اندازه گیری نماید. همچنین می تواند نمودار تغییرات PPV بر حسب زمان را به صورت گرافیکی ارائه دهد. برای هر انفجار، فاصله محل انفجار تا ژئوفن، میزان خرج مصرفی به ازای هر تاخیر و حداکثر سرعت ذرات (PPV) ایجاد شده در اثر آتشکاری ثبت شد. محل نصب ژئوفن در مغار نیروگاه فاز یک بوده (شکل ۲) و انفجارهای مورد بررسی در تونل دسترسی به تاج نیروگاه ترانسفورمر (T4)، تونل دسترسی به مغار اصلی (Audit No 1)،

$$PPV = kR^{-0.75a} Q^{0.5a}$$

(۴)

(د) رابطه جاست - فری (۱۹۸۰)

$$PPV = kR^a Q^{-0.33a} \exp(-bRQ^{-0.33})$$

(۵)

(ه) رابطه موسسه تحقیقات مرکزی هند (۱۹۹۱)

$$PPV = kR^a Q^{-0.5a} \exp(-bRQ^{-0.5})$$

(۶)

## ب - شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی، یک سیستم غیرخطی است که از واحدهای پردازشی (سلول عصبی یا نرون) و اتصالات بین این واحدهای پردازش تشکیل می شود [۳]. مدلسازی لرزش به روش شبکه عصبی بر این اساس است که شبکه عصبی می تواند با مشاهده تعداد کافی داده لرزشی اندازه گیری شده، رابطه بین فاصله تا محل آتشکاری و خرج مصرفی هر تاخیر را با حداکثر سرعت ذرات بیابد. تشخیص الگوی موجود بین ورودی ها و خروجی (ها) توسط شبکه عصبی یادگیری نامیده می شود. پس از طی مرحله آموزش، می توان داده های جدید به شبکه عصبی ارائه نمود و خروجی (PPV) را تخمین زد. مزیت های اصلی شبکه های عصبی نسبت به سایر روش های مرسوم عبارتند از: توانایی تشخیص الگوهای غیرخطی و حذف نوفه. آنجا که در علوم زمین الگوهای غیرخطی فراوانند و وجود نویز در داده ها غیر قابل اجتناب است لذا کاربرد شبکه های عصبی می تواند نتایج بسیار مطلوبی در بر داشته باشد [۴].

## پیش بینی لرزش در مغار فاز یک نیروگاه سد

### مسجد سلیمان

سد مسجدسلیمان در ۲۲/۵ کیلومتری شمال شرق مسجدسلیمان و حدود ۲۶ کیلومتری پایین دست سد شهید عباسپور، بر روی رودخانه کارون واقع است. مشخصات فنی سد در جدول (۱) آورده شده است. نیروگاه برق - آبی سد مسجدسلیمان از نوع زیرزمینی و دارای ۸ واحد ۲۵۰ مگاوات ساعتی بوده و پس از اجرای طرح توسعه ۲۰۰۰ مگاوات ساعت انرژی تولید خواهد نمود. زمین شناسی محل شامل سازندهای آسماری، گچساران، میشان و بختیاری است. مطالعات مکانیک

جدول ۳: داده های لرزه ای ثبت شده در طرح توسعه نیروگاه سد مسجد سلیمان.

شماره	PPV (mm/sec)	خرج در هر تاخیر (kg)	فاصله از محل انفجار (m)
۱	0.65	7.7	145
۲	2.7	24	116.12
۳	3.55	20.4	174.5
۴	0.55	7.7	112.48
۵	5.9	24	114.74
۶	0.9	7.7	144.1
۷	5.15	24	112.45
۸	3.4	29.1	193.33
۹	2.5	26	195.8
۱۰	5.15	24	110.76
۱۱	5.9	24	108.5
۱۲	6.1	30	178
۱۳	11.3	24	83
۱۴	11.6	34.3	213
۱۵	13.7	25.7	78
۱۶	19.2	25.7	63
۱۷	1.5	11	81.77
۱۸	11.6	18	80.61
۱۹	9.2	18	79.31
۲۰	15.5	17.9	29.46
۲۱	10.6	18	53
۲۲	13	14.06	29.46
۲۳	6.4	18	74
۲۴	3.2	27.14	217
۲۵	5.65	34.3	218
۲۶	9.05	24	109
۲۷	11.1	12.9	35.13
۲۸	23.2	23	37.7
۲۹	1.95	15.2	209
۳۰	7.35	12.6	37.7
۳۱	2.95	14.8	199
۳۲	15.8	17.1	40
۳۳	12.2	24	80
۳۴	15	13	40
۳۵	2.35	17	99
۳۶	9.3	16.7	95
۳۷	13.2	14.4	42

تونل سمت راست خروجی آب از نیروگاه (R-Pilot)،  
تونل سمت چپ خروجی آب از نیروگاه (L-Pilot) و مغار  
نیروگاه (PHC) واقع بودند.

### مقایسه مدل های مختلف پیش بینی لرزش

داده های لرزه ای جمع آوری شده مربوط به ۳۷ انفجار در ساخت مدل های تجربی و آموزش شبکه عصبی به کار رفت. شکل (۳) داده های حداکثر سرعت ذرات را در فضای سه بعدی بر حسب فاصله از محل انفجار و میزان خرج هر تاخیر نشان می دهد.

از آنجا که هدف، مقایسه مدل های پیش بینی کننده لرزش و بررسی کارایی آن ها می باشد لذا تعداد پنج داده به عنوان مجموعه تست برای سنجش قدرت تخمین مدل ها کنار گذاشته شد. این مجموعه به عنوان معیار سنجش توانایی هر مدل به کار خواهد رفت. انتخاب پنج داده تست از قسمت هایی که تراکم داده ها بیشتر بود به تصادف انجام شد تا به معرف بودن بقیه داده ها لطمه ای وارد نشود. در مرحله بعد پنج مدل تجربی معرفی شده با ۳۲ داده لرزه ای باقیمانده ساخته شد و ضرایب ثابت آن ها توسط نرم افزار Excel بدست آمد. جدول (۴) ضرایب بهینه را برای روابط تجربی نشان می دهد. همچنین برای هر مجموعه از داده ها میانگین مربعات خطا (بین داده های اندازه گیری شده و تخمینی)، ضریب همبستگی و درصد پراش توجیه شده توسط مدل آورده شده است. مطابق جدول (۴) نتایج روابط تجربی اختلاف های اندکی با هم دارند. با توجه به میانگین مربعات خطا، به نظر می رسد که مدل ج (رابطه لانگفورس - کیلستروم) نتایج نسبتاً بهتری نسبت به بقیه مدل ها ارائه می کند. البته اگر بین جواب های این مدل و بقیه مدل ها اختلاف معنی دار آماری وجود نداشته باشد، رجحان دادن آن بر دیگر روابط چندان صحیح نخواهد بود، زیرا به علت کم بودن تعداد داده های به کار رفته در مدل ممکن است افزودن چند داده جدید باعث شود که خطای مدل های دیگر کمتر از مدل ج شوند. روابط تجربی در عین سادگی و سرعت محاسبه، تعداد محدودی انتخاب در اختیار می گذارند که ممکن است تطابق مناسبی با داده های یک منطقه خاص نداشته باشند. علاوه بر این، گزینش بهترین رابطه تجربی از بین چندین رابطه که



جدول ۴: ضرایب بهینه مدل‌های تجربی پیش‌بینی لرزش و نتایج سنجش قدرت تخمین هر مدل.

مدل تجربی					الف	ب	ج	د	ه	
										k
					A					
					B					
					۹۹/۰۴	۱۲۶/۱۷	۷۲/۹۷	۳۰/۰۷	۳۳/۷۱	داده‌های به کار رفته در ساخت مدل (۳۲ داده)
					-۰/۸۶	-۰/۸۰	۱/۲۱	-۰/۱۳	-۰/۲۱	
					-	-	-	۰/۰۲	۰/۰۴	
					۱۱/۴	۱۳/۰	۱۰/۰	۱۲/۳	۱۰/۷	میانگین مربعات خطا (MSE) ضریب همبستگی (%) درصد واریانس توجیه شده (%)
					۷۹/۷	۷۶/۵	۸۲/۶	۷۷/۸	۸۱/۰	
					۵۸/۸	۵۴/۳	۶۳/۰	۶۲/۵	۶۶/۴	
					۵/۲	۶/۱	۴/۰	۴/۸	۳/۹	داده های تست (پنج داده)
					۹۴/۷	۹۳/۳	۹۵/۶	۹۳/۸	۹۴/۳	
					۴۴/۳	۴۰/۳	۵۲/۴	۵۳/۴	۶۱/۸	

جدول ۵: مشخصات شبکه عصبی به کار رفته برای پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات (PPV).

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
هندسه شبکه	۲-۱۰-۱	خطای مطلوب	۰/۰۰۱
تابع انتقال لایه میانی	لجستیک (سیگموئیدی)	حداکثر تعداد دوره‌های آموزش	۱۰۰
تابع انتقال لایه خروجی	خطی	روش تغییر مقیاس داده‌های ورودی	روش مستقیم به بازه [۰ ۱]
نوع تابع خطا	میانگین مربعات خطا (MSE)	روش تغییر مقیاس داده‌های خروجی	روش مستقیم به بازه [۰ ۱]

جدول ۶: نتایج حاصل از ارزیابی تخمین‌های شبکه عصبی.

پنج داده اعتبارسنجی	پنج داده تست	۲۷ داده به کار رفته در مدل (داده‌های آموزش)	میانگین مربعات خطا (MSE)
۲/۸	۳/۷	۶/۷	ضریب همبستگی (%)
۹۲/۷	۹۷/۱	۸۹/۳	درصد واریانس توجیه شده (%)
۹۰/۲	۵۶/۶	۷۲/۳	

یک سلول در لایه خروجی حداکثر سرعت ذرات را پیش‌بینی خواهد نمود. مشخصات شبکه به کار رفته در جدول (۵) آمده است.

جدول (۶) معیارهای ارزیابی قابلیت تخمین‌های شبکه عصبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای تخمین‌های شبکه عصبی (با اینکه تنها از ۲۷ داده برای مجموعه آموزشی استفاده می‌کند) به مراتب کمتر از روابط تجربی است و این نشان‌دهنده توانایی زیاد شبکه عصبی است. دارا بودن خاصیت غیرخطی باعث می‌شود که شبکه عصبی رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی را بهتر تشخیص دهد.

علاوه بر روابط تجربی می‌توان از شبکه عصبی چند لایه با تغذیه رو به جلو نیز برای پیش‌بینی لرزش استفاده نمود. به این منظور از ۳۲ داده‌ای که برای ساخت مدل در اختیار بود تعداد پنج داده به تصادف برای اعتبارسنجی کنار گذاشته شد. به عبارت دیگر ۲۷ داده برای آموزش شبکه عصبی به کار رفت. آموزش شبکه عصبی هنگامی متوقف خواهد شد که خطای تخمین پنج داده اعتبارسنجی به حداقل خود برسد. شبکه عصبی نهایی پس از چند سعی و خطا به صورت ۲-۱۰-۱ به دست آمد که دو سلول در لایه ورودی فاصله از محل انفجار و مقدار ماده منفجره مصرفی به ازای هر تاخیر را دریافت نموده و

## بحث

بر اساس نتایج مدلسازی لرزش های ایجاد شده در مغار فاز یک سد مسجدسلیمان مشاهده می شود که حداکثر مقدار PPV اندازه گیری شده در حدود ۲۵ میلی متر بر ثانیه می باشد که با توجه به استانداردهای موجود (جدول ۷) کمتر از حد خطرناک است و مشکلی ایجاد نمی کند.

همان طور که از شکل (۱) مشخص است میزان لرزش در اثر انفجار تابعی از چندین پارامتر است. قاعدتا برای پیش بینی حداکثر سرعت ذرات باید از همه عوامل موثر (یا لاقلاً پیش بینی کننده های اصلی) استفاده نمود. در روابط تجربی ذکر شده تنها نقش دو عامل فاصله از محل انفجار و مقدار ماده منفجره مصرفی به ازای هر تاخیر در نظر گرفته می شود. این روابط برای مقدار ثابتی از خرج همزمان به ازاء نقاطی که در فاصله یکسانی از محل انفجار قرار دارند لرزش برابری را پیش بینی می کنند که این با واقعیت همخوانی ندارد.

جدول ۷ : معیار لرزش بر اساس حداکثر سرعت ذرات برای حفريات زیرزمینی [۶].

میزان خطر	حداکثر سرعت ذرات (میلیمتر بر ثانیه)
خطر سبک	-
خطر متوسط	-
خطر سنگین	-

خطوط میزان PPV معمولاً دارای ناهمسانگردی (آنیزوتروپی) در جهت های مختلف می باشد. این ناهمسانگردی در میزان حداکثر سرعت به ناپیوستگی ها و خواص سنگ ها ارتباط دارد که روابط تجربی ذکر شده قادر به در نظر گرفتن آن نیستند.

این عوامل را به راحتی می توان در لایه ورودی شبکه عصبی قرار داد. در واقع این یک امتیاز شبکه عصبی است که می تواند هر تعداد از عوامل موثر را به عنوان ورودی بپذیرد. بدین ترتیب با صرف هزینه ای اندک و اندازه گیری پارامترهای زیر می توان لرزش ها را با دقت بسیار بیشتر توسط شبکه عصبی پیش بینی نمود:

- ۱- فاصله بین نقطه اندازه گیری لرزش و محل آتشکاری
- ۲- خرج مصرفی در هر تاخیر
- ۳- طول چال ها
- ۴- راندمان آتشکاری
- ۵- RQD
- ۶- RMR
- ۷- مقاومت سنگ
- ۸- جهت تونل
- ۹- پارامترهای ناپیوستگی های اصلی (شیب، فاصله داری، بازشدگی<sup>۲</sup>، تداوم<sup>۳</sup>، و ...)
- ۱۰- پارامترهای ناپیوستگی های ثانویه
- ۱۱- ...

در نظر گرفتن این پارامترها در مدل های تجربی محدودیت های بسیاری دارد، از جمله اینکه هر چه تعداد متغیرها افزایش می یابد تعداد بسیار زیادی مدل می توان پیشنهاد نمود. همچنین حذف یا اضافه کردن پارامترهای جدید مستلزم ساخت مدل های تجربی جدید است که امری وقتگیر و نامطلوب است. به جز موارد فوق، روابط تجربی گاهی برآزش خوبی ارائه نمی دهند زیرا شکل کلی مدل ثابت است و تنها ضرایب آن تغییر داده می شود. به همین دلیل است که بسیاری از روابط تجربی تنها برای یک منطقه کاربرد دارند. شبکه های عصبی مشکلات فوق را ندارند. انعطاف پذیری این شبکه ها موجب می شود که در صورت نیاز بتوان هر تعداد عامل را حذف یا اضافه نمود. به عنوان مثال وقتی که تحلیل حساسیت نشان بدهد که یک متغیر تاثیر کمی در خروجی دارد می توان آن را به راحتی از ورودی شبکه حذف کرد و آموزش را دوباره تکرار کرد. بدیهی است از میان پارامترهای پیشنهاد شده برای ورودی شبکه، چندین عامل نقش مهمتری دارند که از آن جمله می توان به فاصله تا محل انفجار، پارامترهای ناپیوستگی و مقاومت سنگ اشاره کرد [۱]. احتمالاً عواملی چون جهت تونل اهمیت کمی در پیش بینی PPV دارند که می توان آن ها را در صورت تمایل از روند بررسی ها حذف کرد. با توجه به جمیع جهات می توان ادعا نمود که اساساً شبکه عصبی راه حل مناسب مساله پیش بینی حداکثر سرعت ذرات است.

ترتیب مقدار تخمینی PPV در سطح اعتماد ۹۵٪ بدست می‌آید.

### نتیجه گیری

- ۱- برای پیش‌بینی لرزش ناشی از انفجار در فضاهای زیرزمینی سد مسجدسلیمان از روابط تجربی و شبکه عصبی می‌توان استفاده نمود و با توجه به حد مجاز لرزش، طراحی عملیات آتشفکری را به گونه‌ای انجام داد که آسیبی به سازه‌ها و تجهیزات نیروگاه فاز یک سد نرسد.
- ۲- میزان ارتعاشات اندازه‌گیری شده در سازه‌های فاز یک سد مسجدسلیمان مقادیر کمتر از حد مجاز داشته و مشکلی ایجاد نمی‌کند.
- ۳- نتایج پنج رابطه تجربی بررسی شده تقریباً مشابه می‌باشند. با این حال از بین آن‌ها رابطه لانگفوردس - کیلستروم پاسخ‌های نسبتاً مناسب‌تری ارائه می‌کند.
- ۴- مزیت روابط تجربی سادگی و سرعت محاسبات است اما در عوض به دلیل اینکه برخی از فرضیات آنها غیرواقعی است و برخی از عوامل مهم در نظر گرفته نمی‌شوند جواب‌های پرخاطا ارائه می‌کنند.
- ۵- شبکه عصبی به دلیل غیرخطی بودن، انعطاف‌پذیری زیاد، خطای کم و همچنین قابلیت حذف و اضافه نمودن هر تعداد از عوامل بدون نیاز به کار گسترده، قابلیت‌های بسیار بیشتری نسبت به روابط تجربی دارد. با توجه به کاربردهای وسیع و موفقیت‌آمیز شبکه‌های عصبی در علوم زمین پیشنهاد می‌شود از این به بعد از این تکنیک برای پیش‌بینی میزان لرزش ناشی از انفجار استفاده شود.
- ۶- در کاربردهای عملی باید از حداکثر سرعت ذرات در سطح اعتماد ۹۵٪ استفاده نمود نه از مقدار تخمینی مدل پیش‌بینی کننده لرزش.

نکته مهم دیگری که باید به آن توجه کرد این است که استفاده مستقیم از مدل‌ها برای پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات و به کار بردن مقدار پیش‌بینی شده برای مقاصد عملی کار چندان صحیحی نیست. مقدار پیش‌بینی شده در حقیقت محتمل‌ترین مقدار یا به عبارت دیگر میانگینی از مقادیر مشاهده شده PPV (تحت شرایط تخمین) است. در صورتی که ماهیت حداکثر سرعت ذرات ایجاب می‌کند که حداکثر مقدار مشاهده شده برای کاربردهای عملی به کار برده شود (نه میانگین آن‌ها). به عنوان یک مثال می‌توان به مدل‌های ساخته شده در این مقاله اشاره کرد. مطابق جداول (۳) و (۴) با توجه به مقادیر کم مقدار واریانس توجیه شده توسط مدل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که بازماندها مقادیر بزرگی دارند. علت این امر این است که تنها از دو عامل در پیش‌بینی استفاده شده است و در واقع مدل‌های برازش یافته اثر هموارشدگی زیادی دارند. هنگامی که بازماندها مقادیر بزرگی داشته باشند بعید نیست که در بعضی حالات مقدار پیش‌بینی شده PPV نسبت به مقدار واقعی بسیار کمتر باشد. در واقع اگر مقدار پیش‌بینی شده را به کار بریم به احتمال ۵۰٪ مقدار PPV را کم تخمین خواهیم زد و این امر در موارد خاصی (که مقدار تخمینی کمتر از حد مجاز لرزش ولی مقدار واقعی لرزش بیشتر از حد مجاز باشد) ممکن است خسارات و پیامدهای ناگواری در پی داشته باشد.

به منظور برطرف نمودن این مسأله، باید از مقادیر بازماند کمک گرفت. مقادیر بازماند ناشی از یک برازش مناسب از نظر آماری جامعه‌ای نرمال را تشکیل می‌دهند. انحراف معیار این جامعه معیاری از پراکندگی داده‌های مشاهده‌ای نسبت به مدل برازش داده شده است. اگر دو برابر انحراف معیار بازماندها به مقدار پیش‌بینی شده اضافه شود عددی بدست می‌آید که در ۹۵٪ موارد از مقادیر مشاهده شده بیشتر است. به عبارت دیگر به احتمال ۹۵٪، حداکثر سرعت ذرات به درستی تخمین می‌خورد. به این

### مراجع

- 1 - Yonghun, J. and Chungin, L. (2002). "Application of neural networks to prediction of powder factor and peak particle velocity in tunnel blasting." *International Society of Explosives Engineers 2002*, Vol. 2, PP. 67-76.



- 
- 2 - Jimeno, C. L., Jimeno, E. L. and Carceda, J. F. A. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. A. A. Balkema, Rotterdam.
- 3 - Haykin, S. (1999). *Neural network: A comprehensive foundation*. Prentice Hall.
- ۴ - حسنی پاک، ع. و شرف الدین، م. "تحلیل داده های اکتشافی." انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۸۰).
- ۵ - مشانیر و لامیر. "گزارش بازنگری طرح نیروگاه آبی گدارلندر." سازمان آب و برق خوزستان، (۱۳۶۸).
- 6 - Singh S. P. (2000). "The role of joints and rock mass quality in perimeter control." *Explosive and Blasting Technique*, A. A. Balkema, Rotterdam, PP. 371-375.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 -Peak Particle Velocity
- 2 - Noise
- 3 - Separation
- 4 - Persistence