

طراحی الگوی انفجار با استفاده از بسامد غالب و بیشینه مجاز سرعت ذرات

حسن بخشنده امنیه^{۱*} و علی سیامکی^۱

^۱گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۲/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۱۶)

چکیده

همه انرژی حاصل از انفجار صرف خرد شدن توده سنگ نمی شود و بخش زیادی از آن صرف ایجاد لرزش زمین، انفجار هوا، پرتاب سنگ و مانند آن می شود. لرزش زمین حاصل از انفجار، همواره تهدیدی جدی برای سازه ها و منازل مسکونی اطراف محل انفجار به شمار می رود. از پارامترهای مهم در ارزیابی میزان لرزش زمین و خسارات وارده حاصل از انفجار، حداکثر سرعت ذرات و بسامد است. روابط عرضه شده برای طراحی الگوی انفجار براساس ویژگی های توده سنگ یا ماده منفجره است و در آنها تاثیر موج انفجار نادیده گرفته می شود. در این مقاله با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی داده های ثبت شده در معدن مس سرچشمه مورد آموزش قرار گرفت. در این شبکه پارامترهای فاصله از محل انفجار، حداکثر سرعت ذرات، بسامد غالب، چگالی ماده منفجره و حجم بلوک استخراجی درحکم ورودی و پارامترهای الگوی انفجار (فاصله ردیفی چال ها، فاصله چال ها در یک ردیف و وزن کل خرج مصرفی) خروجی شبکه هستند. شبکه با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا و با آرایش $3 \times 10 \times 12 \times 14 \times 16$ آموزش داده شده است. به منظور کسب اطمینان از آموزش، شبکه براساس داده های کنترل، مورد آزمایش قرار گرفت و دستیابی به ضریب همبستگی $0/82$ ، $0/71$ و $0/76$ به ترتیب برای وزن کل خرج، فاصله ردیفی چال ها و فاصله چال ها در یک ردیف ممکن شد.

واژه های کلیدی: حداکثر سرعت ذرات، بسامد غالب، الگوی انفجار، شبکه عصبی مصنوعی

Blasting pattern design using dominant frequency and permissible peak particle velocity

Hassan Bakhshandeh Amnieh^{1*} and Ali Siamaki¹

¹Dept. of Mining Eng., University of Kashan, Iran

(Received: 21 May 2011, accepted: 6 March 2012)

Summary

The energy released from an explosion propagates through the surrounding rock-mass in wave forms, causing structural vibrations in the vicinity of the explosion blocks. The waves are spread as body as well as surface waves. Resonance occurs when the frequency of the explosion wave is the same as the associated structures, leading to increase the damage to them. Hence, in designing the explosion patterns, the allowable peak particle velocity of these structures should be considered. Several correlations (Pears, 1955;

*Corresponding author:

bakhshandeh@kashanu.ac.ir

*نگارنده رابط:

Allsman, 1960; Speath, 1960) presented in the literature, express the parameters involved in evaluating the explosion effects including the explosive characteristics and the rock-mass strength. Ash (1968), proposed a simple relation based on the diameter of blast-hole to determine the burden required and Livingston (1956) suggested a relation on the basis of "crater theory" to determine the spacing. However, the influence of blast-wave has not been considered in the conventional explosion design patterns. In this study, a neural network was trained in order to design a explosion pattern based on the maximum allowable vibration. This network tried to design a blasting pattern by special attention to the allowable peak particle velocity and the natural frequencies of the buildings adjacent to blasting area. For this purpose, the ground vibration data from 11 blasts were recorded by PDAS-100 digital seismographs and 3-C L-4C seismometers. Seismographs were installed in three vertical, tangential and radial directions. 47 of the recorded vibrations were employed in a neural network training which used a back propagation algorithm for training. The network consisted of four hidden layers and one output layer composed of three neurons. The training algorithm of each hidden layer was a Levenberg- Marquardt designed to approach a second-order training speed without having to compute the Hessian matrix; Tan-sigmoid transfer function was employed for the hidden layers and a linear transfer function pureline was used for the output layer. For adequate network training process, a series of appropriate response should be ensued. During the training, in order to minimize the performance, the network weights and biases were corrected. In this study the network performance was evaluated using a mean-square error when compared to the output and the real data. The input parameters included the peak particle velocity, frequency, volume of the extraction block and the explosive density, while the outputs included the burden, spacing and the total charge weight. The other parameters of the blasting pattern such as stemming, sub-drilling were calculated by empirical equations and the blasting delay was determine by the blasting designer. The network was trained successfully at the 8920th epoch with a mean square error of 6.19×10^{-16} . To ensure correct training, the network was tested using the test data and was able to achieve the total charge weight, burden and spacing with coefficient correlations of 0.65, 0.77 and 0.96, respectively.

Key words: Peak particle velocity, dominant frequency, blasting pattern, artificial neural network

۱ مقدمه

لرزش زمین حاصل از انفجار همواره یکی از نتایج نامطلوب و مشکلات مهم در عملیات معدن کاری و طرح‌های عمرانی است. لرزش ایجاد شده علاوه بر ایجاد نارضایتی در بین ساکنان نزدیک به محل انفجار، می‌تواند باعث آسیب‌هایی به سازه‌های اطراف محل انفجار شود. میزان خسارت وارد شده به میزان لرزش زمین، بسامد و فاکتورهای سازه و محیط بستگی دارد (سینگ و روی، ۲۰۱۰).

امواج لرزه‌ای به هنگام انتشار درون زمین بر اثر تبدیل بخشی از انرژی کشسان آن به گرما میرا و موجب القای لرزش در سازه‌ها می‌شود. در صورتی که بسامد ارتعاش با بسامد طبیعی سازه برابر باشد، باعث ایجاد پدیده تشدید می‌شود و در نتیجه، دامنه لرزش افزایش می‌یابد. از جمله پارامترهای کاربردی در ارزیابی میزان ارتعاش زمین و پیش‌بینی خسارت حاصل از آن حداکثر سرعت ذرات و بسامد است (خان‌دلول و سینگ، ۲۰۰۹؛ روشندل کاهو و سیاه‌کوهی، ۱۳۸۸).

۲ موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی معدن مس

سرچشمه

معدن مس سرچشمه در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غربی کرمان و ۵۰ کیلومتری جنوب رفسنجان و در ناحیه مرکزی رشته کوه زاگرس قرار گرفته است. شکل ۱ نشان‌دهنده محل معدن مس سرچشمه کرمان است. معدن مس سرچشمه یکی از بزرگ‌ترین مجتمع‌های صنعتی معدنی جهان محسوب می‌شود و بزرگ‌ترین تولیدکننده مس ایران است. ذخیره زمین‌شناسی معدن بالغ بر یک میلیارد و دویست میلیون تن سنگ سولفوری با عیار متوسط ۰/۷٪ برآورد شده است. معدن مس سرچشمه از دیدگاه زمین‌شناسی روی کمربند جهانی مس قرار دارد و پهنه گسترش آن از جنوب شرقی تا شمال غربی به صورت یک محدوده بیضی شکل با ابعاد ۱۲۰۰×۲۳۰۰ متر و ژرفای ۱۶۱۲ متر است. ساختار معدنی در این منطقه به صورت پورفیری و نوع سنگ منطقه از نوع گرانودیوریت و زمان تشکیل آن حدود ۲۵ میلیون سال پیش است. بخش‌های تولیدی مجتمع مس سرچشمه عبارت از معدن، تغلیظ، ذوب، پالایشگاه و ریخته‌گری‌ها و لیچینگ است. جدول ۱ نشان‌دهنده ویژگی‌های ژئومکانیکی معدن مس سرچشمه است.

استخراج در معدن مس سرچشمه بدین شرح است که پس از عملیات انفجار، سنگ معدن براساس نوع و مشخصات مربوط، با کامیون به محل مناسب انتقال می‌یابد و از آنجا با توجه به برنامه تولید معدن بارگیری و به سنگ‌شکن اولیه (از نوع ژیراتوری) منتقل می‌شود. پس از خردایش، مواد معدنی با دانه بندی ۱۰۰٪ زیر ۸ اینچ در انبار درشت با ظرفیت ۱۵۰ هزار تن ذخیره می‌شود. در حال حاضر و پس از انجام فاز اول توسعه معدن، میزان سنگ سولفوری قابل انتقال به سنگ‌شکن اولیه به سقف ۶۰ هزار تن در روز با عیار متوسط ۰/۹٪ رسیده است که

عواملی که بر نتایج یک انفجار تاثیر می‌گذارند بر فرایند لرزش زمین در یک منطقه نیز تاثیر می‌گذارند. این عوامل به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول را فاکتورهای طراحی همچون فاصله ردیفی چال‌ها، فاصله چال‌ها در یک ردیف، اضافه حفاری، انسداد، زمان تاخیر، وزن ماده منفجره مصرفی به‌ازای هر تاخیر و جهت انفجار تشکیل می‌دهند. گروه دوم نیز فاکتورهای منطقه همچون خصوصیات زمین‌شناسی و موقعیت سازه از محل انفجار است (جواهریان و بخشنده، ۱۳۸۱). لازم به ذکر است که با مدل‌سازی انتشار موج در محیط‌های پیچیده می‌توان از نحوه رفتار جبهه موج در مواجهه با ساختارهای پیچیده آگاهی یافت (امینی و جواهریان، ۱۳۸۹).

در روابط داده شده برای طراحی پارامترهای الگوی انفجار، فقط به پارامترهای ژئومکانیکی سنگ، نوع ماده منفجره و قطر چال توجه شده و پارامترهایی از جمله میزان لرزش حاصل از انفجار در نظر گرفته نشده است. از این رو، طراحی الگوهای انفجار با توجه به پارامتر حداکثر لرزش حاصل از انفجار از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از لرزش‌های ثبت شده در معدن مس سرچشمه شبکه‌ای آموزش داده شد که قابلیت عرضه پارامترهای الگوی انفجار را با توجه به سازه‌های اطراف ناحیه انفجار و حدود مجاز لرزش دارد.

جدول ۱. ویژگی‌های ژئومکانیکی کانسنگ معدن مس سرچشمه کرمان.

ردیف	واحد	پارامتر	مقدار
۱	kN/m^3	وزن مخصوص	۱۹/۶
۲	درجه	زاویه اصطکاک	۳۰
۳	---	نسبت پواسون	۰/۳
۴	kN/m^3	مدول یانگ	۳۹۲۲۴۰۰

شده‌اند. مقدار وزن ماده منفجره به‌ازای هر تاخیر بین ۶۹۶ و ۷۱۰۰ کیلوگرم متغیر است. در شکل ۲ منحنی‌های هم‌تراز سرعت ذرات نشان داده شده است. این انفجار در توده‌سنگ‌های آندزیتی و عملیات برداشت داده‌ها در توده‌سنگ‌های آندزیت و دایک صورت گرفته است. باتوجه به بررسی اثر حداکثر سرعت ذرات بر طراحی الگوی انفجار، حداکثر سرعت ذرات با رابطه (۱) تحلیل شده‌اند (نجم و همکاران، ۲۰۰۲؛ بخشنامه امنیه، ۱۳۷۸):

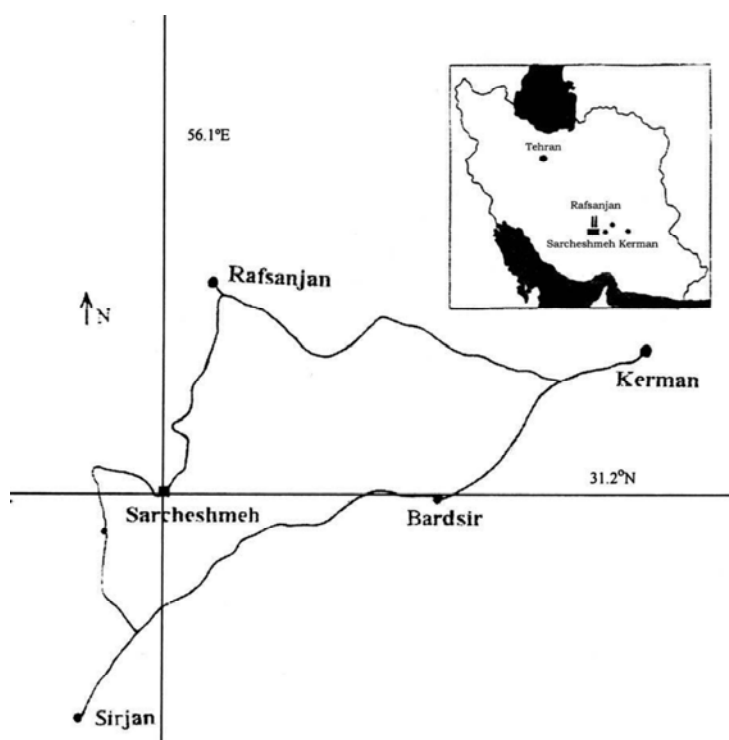
$$PPV = \sqrt{(PPV_v)^2 + (PPV_r)^2 + (PPV_t)^2}, \quad (1)$$

که PPV_v ، PPV_r ، PPV_t به‌ترتیب مولفه عمودی، شعاعی و مماسی حداکثر سرعت ذرات است. نمودار حداکثر سرعت ذرات - بسامد داده‌های ثبت شده با تفکیک ماده منفجره مصرفی در شکل ۳ نشان داده شده است.

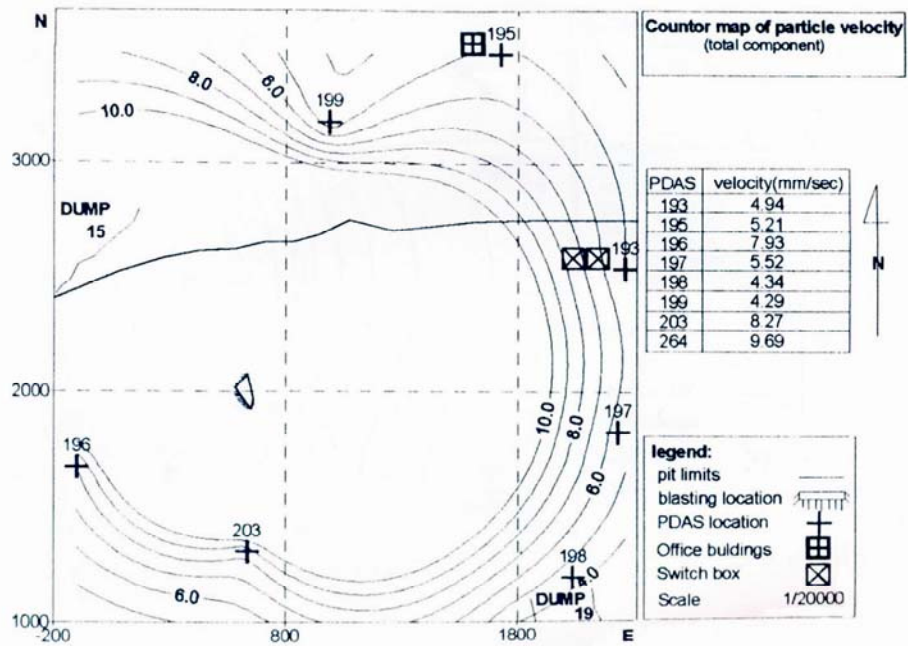
با اجرای فاز دوم توسعه، این میزان به حدود ۸۰ هزار تن در روز با عیار ۸/۵۰٪ خواهد رسید.

۳ روش تحقیق

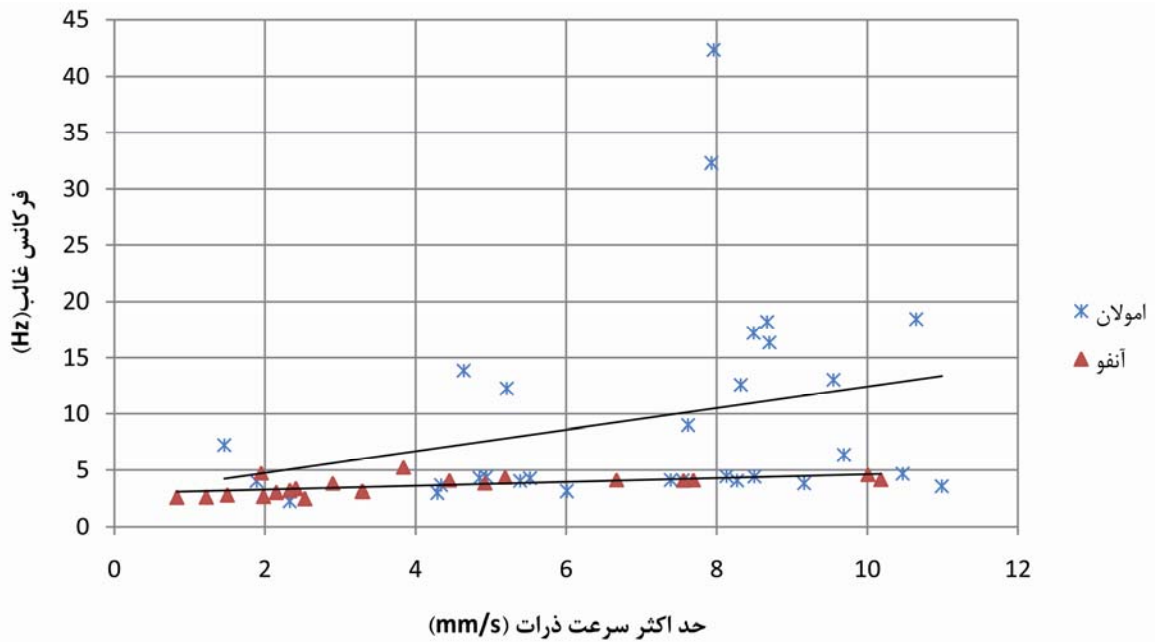
آموزش شبکه عصبی مصنوعی برای طراحی الگوی انفجار، نیازمند ثبت لرزش زمین و بسامد متناظر با آن است. بدین‌منظور داده‌های لرزش زمین حاصل از ۱۱ مرحله انفجار با استفاده از لرزه‌نگارهای سه مولفه‌ای PDAS-100 و لرزه‌سنج‌های 3-C و L-4C ثبت شد. لرزه‌سنج‌ها در سه جهت شعاعی، مماسی و عمودی نصب شدند. نوع ماده منفجره آنفو و امولان و کمترین و بیشترین مقدار ماده منفجره ۱۲۹۰ کیلوگرم و ۲۶۰۰۰ کیلوگرم است. کمترین و بیشترین تعداد چال در هر عملیات انفجار ۱۹ و ۷۳ عدد است. دورترین و نزدیک‌ترین لرزه‌نگار به‌ترتیب در فاصله ۴۱۰ و ۳۸۲۵ متری از محل انفجار واقع



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی معدن مس سرچشمه کرمان.



شکل ۲. منحنی‌های هم‌تراز برآیند حداکثر سرعت ذرات حاصل از انفجار شماره ۱۸۷، ۱۸۲ معدن مس سرچشمه کرمان.



شکل ۳. نمودار حداکثر سرعت ذرات- بسامد داده‌های ثبت شده در معدن مس سرچشمه کرمان.

۴ شبکه عصبی مصنوعی

در دهه ۱۹۴۰ با روشن شدن قابلیت محاسبه هر تابع منطقی و حسابی از سوی مک کلاش و پیتز، نگاهی تازه به شبکه‌های عصبی مصنوعی مطرح شد. اولین کاربرد عملی شبکه عصبی مصنوعی در اواخر دهه ۱۹۵۰ با اختراع شبکه‌های پرسپترون از سوی روزنبلت عملی شد. روزنبلت و همکاران شبکه‌ای پرسپترون ساختند و قابلیت آن را در تشخیص دادن الگو اثبات کردند (محمد، ۲۰۰۹).

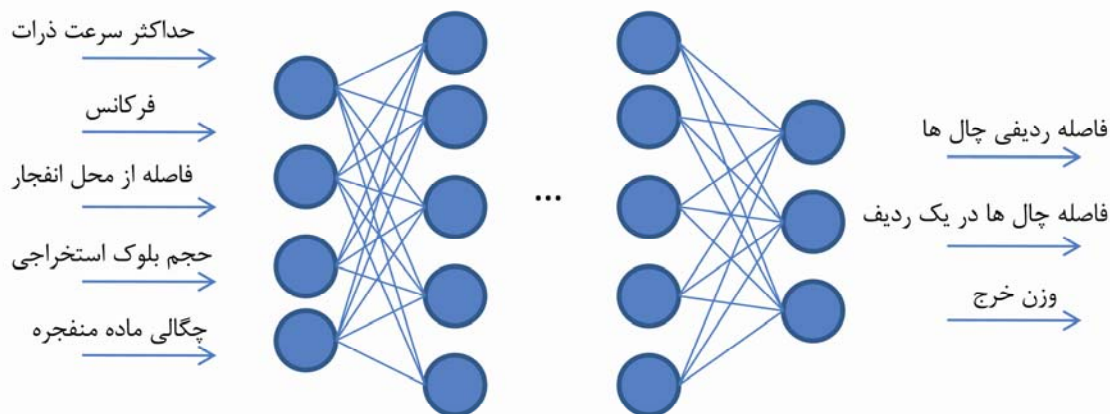
شبکه پیش از تفسیر اطلاعات جدید نیاز به آموزش دارد. الگوریتم‌های متعددی برای آموزش شبکه عصبی وجود دارد. در این میان الگوریتم پس انتشار شیوه تطبیق‌پذیر و توانمندی است که قابلیت آموزش مناسب برای شبکه‌های چندلایه را فراهم می‌کند. از طرفی قابلیت این الگوریتم در حل مسائل برآورد، بر محبوبیت آن افزوده است (خان‌دلول و سینگ، ۲۰۰۷).

شبکه پیش‌خور با n واحد ورودی و m خروجی با فرض سری آموزشی $\{(x_1, t_1), \dots, (x_p, t_p)\}$ متشکل از P جفت بردار $m \times n$ بُعدی، به‌منزله الگوی ورودی و خروجی موجود است. این شبکه ممکن است از چند لایه

پنهان تشکیل شده باشد و هر الگوی ارتباطی پیش‌خور مناسب را به‌دست دهد. وزن هر ارتباط‌دهنده عددی است که به‌صورت تصادفی انتخاب شده است. هنگامی که ورودی x_i از سری آموزشی به شبکه اعمال می‌شود، شبکه خروجی O_i تولید می‌کند که با مقدار هدف t_i متفاوت است. O_i و t_i نیاز به برابر شدن برای $i=1,2,\dots,P$ با یک الگوریتم آموزش دارند. برای مثال، تابع خطا شبکه که به‌صورت رابطه (۲) تعریف شده است باید کمینه شود (بخشنامه و همکاران، ۲۰۱۰):

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^P \|O_i - t_i\|^2, \quad (2)$$

که E خطای شبکه، O_i خروجی شبکه، t_i مقدار هدف یا خروجی واقعی و P تعداد سری ورودی شبکه است. پس از کمینه کردن این تابع برای داده‌های آموزشی، داده‌های جدید به‌منظور بررسی به شبکه عرضه می‌شود. شبکه ورودی‌های جدید را مانند الگوی آموزش داده شده بررسی و خروجی آن را تولید می‌کند (بخشنامه و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل ۴. نمایی از شبکه عصبی آموزش داده شده الگوی انفجار معدن مس سرچشمه کرمان.

۱-۴ آموزش شبکه

ایجاد شده و الگوی انفجار، باعث کاهش هزینه‌های جانبی انفجار و افزایش کیفیت آن می‌شود. به منظور آموزش شبکه طراحی الگوی انفجار از ۴۱ سری داده ثبت شده از انفجارهای معدن سرچشمه در حکم ورودی استفاده شده است.

پارامترهای ورودی شبکه شامل حداکثر سرعت

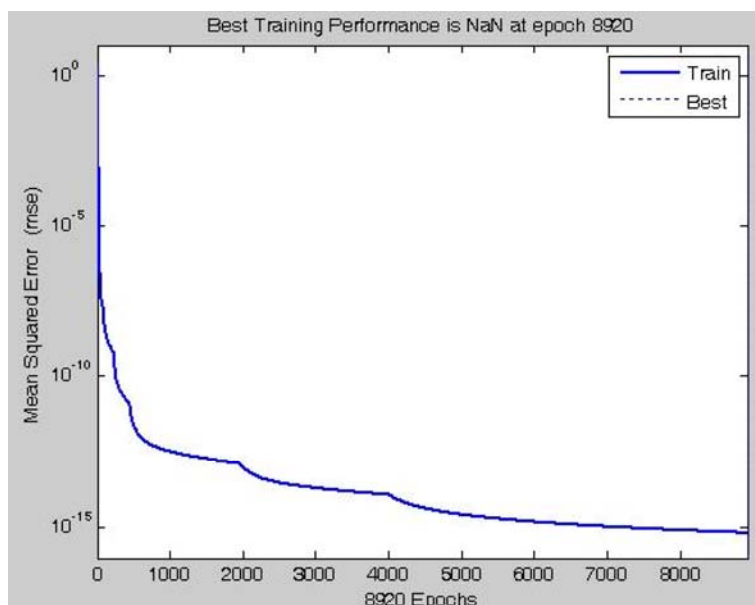
هدف از آموزش شبکه عصبی مصنوعی دست‌یافتن به الگویی برای تعیین پارامترهای طراحی الگوی انفجار با توجه به سازه‌های اطراف محل انفجار است. طراحی الگوی انفجار با توجه به حداکثر سرعت ذرات و بسامد ارتعاش مناسب سازه به کاهش خسارات و نارضایتی‌ها کمک می‌کند. همچنین درک دقیق‌تر از ارتباط ارتعاش

جدول ۲. محدوده تغییرات پارامترهای آموزش شبکه طراحی الگوی انفجار معدن مس سرچشمه کرمان.

ردیف	واحد	پارامترهای آموزش	محدوده تغییرات
۱	mm/s	حداکثر سرعت ذرات	۱۰/۹۹ - ۰/۸۳
۲	m	فاصله از محل انفجار	۳۸۲۵ - ۷۴۰
۳	m ³	حجم بلوک انفجاری	۱۰۲۰۰۰ - ۲۹۷۶۰
۴	kg/m ³	چگالی ماده منفجره	۱/۵ - ۰/۸
۵	m	فاصله ردیفی چال‌ها	۷/۵ - ۷
۶	m	فاصله چال‌ها در هر ردیف	۹/۵ - ۷
۷	ton	وزن خرج	۲۷/۱۴ - ۷
۸	Hz	بسامد	۴۲/۴ - ۲/۲۸

جدول ۳. خطای نسبی پاسخ شبکه برای داده‌های آزمایشی در معدن مس سرچشمه کرمان.

ردیف	فاصله ردیفی چال‌ها (%)	فاصله چال‌ها در هر ردیف (%)	وزن کل خرج (%)
۱	0	0	0/008666667
۲	0	0	0/016666667
۳	0	0	-0/006666667
۴	-7/02286	-5/92556	0
۵	0	0	-16/40665647
۶	0/024	0/081053	0/003125
۷	0/078667	0/254737	0/011538462
۸	-0/00571	-0/00556	-0/25
خطای نسبی میانگین	-0/76954	-0/6217	-1/84703626



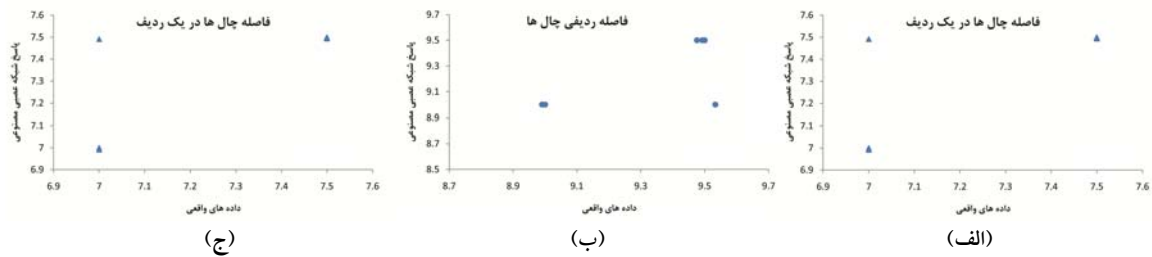
شکل ۵. خطای شبکه در حین آموزش شبکه طراحی الگوی انفجار معدن مس سرچشمه کرمان.

یکی از پارامترهای کنترل آموزش، خطای شبکه یا به عبارتی اختلاف بین خروجی شبکه و مقدار واقعی است. در این شبکه از تابع عملکرد میانگین مربعات خطا به منظور کنترل خطای شبکه استفاده شد. در نهایت شبکه توانست در دوره ۸۹۲۰ به خطای $10^{-16} \times 19/6$ دست یابد. در شکل ۵ تغییرات خطا در حین آموزش نشان داده شده است.

یکی از معایب شبکه‌های عصبی مصنوعی دست نیافتن به کمینه مطلق در حین آموزش و گرفتار شدن در کمینه محلی است. از این رو آزمایش شبکه جهت اطمینان از صحت روند آموزش امری ضروری است. شبکه توسط ۹ سری داده مورد آموزش قرار گرفت. جهت بررسی پاسخ شبکه برای داده‌های آزمایش شده، بر روی آن‌ها تحلیل رگرسیون انجام گرفت. شکل‌های ۶-الف، ۶-ب و ۶-ج به ترتیب نشان دهنده نتایج تحلیل رگرسیون پاسخ شبکه برای فاصله چال‌ها در یک ردیف، فاصله ردیفی چال‌ها و وزن کل خرج داده‌های آزمایشی عملیات انفجار در معدن

ذرات، بسامد غالب، چگالی ماده منفجره، حجم بلوک استخراجی و فاصله از محل انفجار است. به علت تغییرات کم چگالی سنگ، این پارامتر به منزله ورودی در نظر گرفته نشده است. از طرفی همه انفجارها دارای قطر چال، ارتفاع پله، اضافه حفاری یکسان هستند و تاخیرهای انفجار با توجه به نظر مهندس طراح و شماره چاشنی‌های موجود در انفجار مواد ناریه انتخاب می‌شود. جدول ۲ نشان‌دهنده محدوده تغییرات پارامترهای ورودی و خروجی شبکه است.

شبکه متشکل از ۴ لایه پنهان و لایه خروجی با آرایش $\{3 \times 10 \times 12 \times 14 \times 16\}$ است. به منظور افزایش کیفیت آموزش، داده‌های ورودی در بازه $[0,1]$ مقیاس شده‌اند. الگوریتم آموزش، الگوریتم لوبنرگ-مارکواردت است. این الگوریتم همانند روش شبه‌نیوتن سعی در افزایش دادن سرعت آموزش بدون محاسبه ماتریس هسیان دارد (MATLAB، ۲۰۰۲). در شکل ۴ نمایی از الگوریتم شبکه آموزش داده شده است.



شکل ۶. تحلیل رگرسیون بر روی پاسخ شبکه برای داده‌های آزمایشی عملیات انفجار در معدن مس سرچشمه کرمان. (الف) رگرسیون فاصله چال‌ها در یک ردیف، (ب) رگرسیون فاصله ردیفی چال‌ها، (ج) رگرسیون وزن کل خرج.

۵ نتیجه‌گیری

طراحی الگوهای انفجار یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی استخراج معادن و فعالیت‌های عمرانی است. طراحی مناسب علاوه بر افزایش کیفیت انفجار، باعث کاهش هزینه‌های ناشی از آن نیز می‌شود. یکی از این هزینه‌های جانبی، خسارات ناشی از لرزش زمین حاصل از انفجار و ایجاد نارضایتی است. در این تحقیق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، شبکه‌ای به‌منظور تعیین پارامترهای انفجار آموزش داده شد. شبکه توانست به خطای $10^{-16} \times 6/19$ برای داده‌های آموزشی دست یابد. همچنین شبکه مورد آزمایش قرار گرفت و توانست به ضریب همبستگی $0/82$ ، $0/71$ و $0/76$ به ترتیب برای وزن کل خرج، فاصله ردیفی چال‌ها و فاصله چال‌ها در یک ردیف دست یابد. همچنین مقادیر $1/84$ ٪، $0/76$ ٪ و $0/62$ ٪ به ترتیب برای وزن کل خرج، فاصله ردیفی چال‌ها و فاصله چال‌ها در یک ردیف به دست آمد.

منابع

امینی، ن. و جواهریان، ع.، ۱۳۸۹، مدل‌سازی انتشار امواج در محیط اکوستیکی دو بُعدی به روش تفاضل محدود متناهی در حیطه فرکانس، مجله ژئوفیزیک ایران، ۴(۱)، ۱-۱۶.

مس سرچشمه کرمان هستند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، پاسخ شبکه با داده‌های واقعی همبستگی بالایی دارد و شبکه توانست به ضریب همبستگی $0/82$ ، $0/71$ و $0/76$ به ترتیب برای وزن کل خرج، فاصله ردیفی چال‌ها و فاصله چال‌ها در یک ردیف دست یابد.

همان‌طور که از شکل ۶ ملاحظه می‌شود، شبکه قابلیت ارائه برخی از پارامترهای طراحی از جمله فاصله ردیفی چال‌ها را داراست. بقیه پارامترهای طراحی مانند قطر چال، تاخیر زمانی چال‌ها و ... را می‌توان با استفاده از روابط تجربی ارائه شده و برپایه پاسخ شبکه بدست آورد. از طرفی با در دست داشتن فاصله سازه مورد نظر از محل انفجار و میزان لرزش مجاز متناظر با آن سازه می‌توان حداکثر خرج بر تاخیر را بدست آورد.

از آنجاییکه تغییرات فاصله ردیفی چال‌ها و فاصله چال‌ها در یک ردیف در این معدن کم است، شبکه برای دو پارامتر مذکور به پاسخ بهتری رسیده است. با توجه به جدول ۳ خطای متوسط نسبی برای این دو پارامتر به ترتیب برابر $0/76$ ٪ و $0/62$ ٪ است. مقادیر وزن کل خرج در انفجارهای انجام شده در معدن مس سرچشمه دارای تنوع بیشتری نسبت به دو پارامتر دیگر است، از این رو خطای نسبی میانگین به دست آمده برای این پارامتر برابر $1/84$ ٪، و از دو پارامتر دیگر بیشتر، ولی دارای مقدار قابل قبولی است.

- Najm, K., Javaherian, A. and Bakhshandeh Amnieh, H., 2002, Study of blasting vibrations in Sarcheshmeh copper mine: *Acta Seismologica Sinica*, **15**, 683-690.
- Khandelwal, M. and Singh, T. N., 2007, Evaluation of blast induced ground vibration predictors: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**, 116-125.
- Khandelwal, M. and Singh, T. N., 2009, Prediction of blast induced ground vibration using artificial neural network: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, **46**, 1214-1222.
- Mohammad, M. T., 2009, Artificial neural network for prediction and control of blasting vibrations in Assiut (Egypt) limestone quarry: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, **46**, 426-431.
- Singh, P. K. and Roy, M. P., 2010, Damage to surface structures due to blast vibration: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, **47**, 949-961.
- The Math Works Inc, 2002, *Statistics Toolbox for use with MATLAB, User's Guide Version 4*.
- بخشنامه امنیه، ح.، ۱۳۷۸، پیش‌بینی اثرات ناشی از انفجار معادن روباز بر روی سازه‌های سطحی مجاور، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- جواهریان، ع. و بخشنامه امنیه، ح.، ۱۳۸۱، بررسی روابط تجربی پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات در انفجارهای معدن سنگ آن گل گهر، نشریه علمی پژوهشی فیزیک زمین و فضا، **۲۸**(۱)، ۲۱-۳۰.
- روشندل کاهو، ا. و سیاه‌کوهی، ح.، ۱۳۸۸، تعیین فاکتور کیفیت با تبدیل‌های زمان-مقیاس و زمان-فرکانس، *مجله ژئوفیزیک ایران*، **۳**(۱)، ۱۹-۳۲.
- Bakhshandeh Amnieh, H., Mozdianfard, M. R. and Siamaki, A., 2010, Predicting of blasting vibrations in Sarcheshmeh copper mine by neural network: *Safety Science*, **48**, 319-325.