

پیش بینی عقب زدگی حاصل از انفجار معادن روباز به روش بهینه سازی ازدحام ذرات

محمدرضا مقدسی^۱، دکتر عباس آقاجانی بزازی^۲، محبوبه کوچکی بیدگلی^۳، بنفشه سادات لاجوردی قمصری^۴

^۱ دانش آموخته ارشد مهندسی معدن، دانشگاه کاشان m.moghaddassi@grad.kashanu.ac.ir

^۲ عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، a_aghajani_bazzazi@kashanu.ac.ir

^۳ دانش آموخته ارشد مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

^۴ دانش آموخته ارشد مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

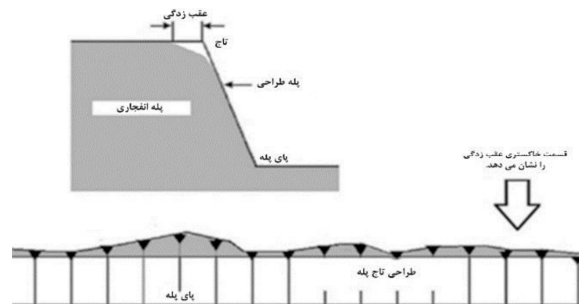
چکیده

عقب‌زدگی یکی از چالش برانگیزترین مشکلات عملیات انفجار معادن روباز است. بروز این پدیده علاوه بر مشکلات ایمنی، سبب تحمیل هزینه‌های اضافی پایدارسازی بر پروسه‌ی معدن‌کاری و به‌طور غیرمستقیم موجب افزایش هزینه‌های خردایش می‌شود. بررسی ویژگی‌های ساختمانی و زمین‌شناسی توده‌سنگ، مشخصات خرج، هندسه‌ی پله و نحوه‌ی اجرای توالی دور-های انفجار از مهم‌ترین عوامل در بهبود نتایج انفجار هستند. متخصصین انفجار با در نظر گرفتن عوامل فوق و ارزیابی اقتصادی پروژه اقدام به مهار کامل عقب‌زدگی و یا بهبود و تعدیل آن می‌نمایند. در این مقاله با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Particle swarm optimization) با پارامترهای ورودی شامل بارسنگ، فاصله‌داری، گل‌گذاری و خرج ویژه، پارامتر خروجی (عقب‌زدگی) پیش‌بینی شده است. روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات به دو صورت معادلات خطی و غیرخطی درجه دوم انجام شده و ضرایب محاسبه شده با روش مذکور با نتایج رگرسیون خطی و غیر خطی مقایسه شده است. نتایج حاصله از این مقایسه نشان می‌دهد مدل درجه دو ازدحام ذرات با ضریب همبستگی ۰/۹۷ برای پیش‌بینی عقب‌زدگی در مقایسه با روش‌های بکار گرفته شده در این مطالعه از عملکرد بهتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: انفجار، بهینه سازی، رگرسیون، عقب زدگی، بهینه سازی ازدحام ذرات

۱. مقدمه

جیمنو و همکاران در سال ۱۹۹۵ عقب‌زدگی را به شکستگی‌های ناخواسته‌ای که در حین انفجار در پشت آخرین ردیف چال-ها منتشر می‌گردند، تعریف کردند (Jimeno, ۱۹۹۵). پیش بینی دقیق عقب‌زدگی می‌تواند در طراحی یک الگوی انفجار مناسب و کاهش اثرات نامطلوب آن موثر باشد. به طور کلی عقب‌زدگی، ناشی از طراحی نامناسب انفجار است. عقب‌زدگی در عملیات انفجار یکی از مسایل مهم در زمینه‌های ایمنی و فنی و اقتصادی است که اگر کنترل نشود، زاویه‌ی شیب پله‌ها کم-تر از مقدار واقعی در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه کاهش قابل ملاحظه‌ای به صورت تحمیلی در شیب نهایی پیت رخ می‌دهد. این امر موجب افزایش باطله برداری و در نهایت افزایش هزینه‌های تولید می‌گردد. عقب‌زدگی همچنین موجب عدم توزیع مناسب انرژی خرج و به طبع آن خردایش نامناسب می‌شود. این امر نیز موجب افزایش هزینه‌های خردایش، دانه‌بندی و گاهی فرآوری می‌گردد (Bhandari, ۱۹۹۷). شکل ۱ نمایی از یک پله انفجاری و عقب‌زدگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمایی از عقب زدگی در یک پله معدن روباز

تاکنون مطالعات بسیاری به منظور پیش بینی عقب زدگی صورت گرفته است. جنکیس در سال ۱۹۸۱ و کونیا و والتر در سال ۱۹۹۱ جز پیشگامان مطالعه در این زمینه می باشند. امروزه روش های جدید زیادی از جمله هوش مصنوعی وجود دارند که با دقت مناسبی عقب زدگی را پیش بینی می کند (Mohamad، ۲۰۱۲؛ Atici، ۲۰۱۱). علت اصلی توسعه روش های جدید، پیچیدگی تحلیل عقب زدگی و عملکرد پایین روش های تجربی می باشد. روش های مختلفی چون تحلیل رگرسیون چندگانه (Monjezi و همکاران، ۲۰۱۳)، شبکه عصبی مصنوعی (Esmaili و همکاران، ۲۰۱۴)، سیستم استنتاج فازی (Monjezi و همکاران، ۲۰۱۰؛ Faramarzi و همکاران، ۲۰۱۳؛ Sari و همکاران، ۲۰۱۴) در پیش بینی عقب زدگی به کار برده شده است.

۲. داده ها و روش تحقیق

هدف از این مقاله پیش بینی عقب زدگی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی تراکم ذرات (Particle swarm optimization) در نرم افزار متلب است. مدل ازدحام ذرات به دو شکل معادلات درجه یک و دو انجام شده و با دو مدل رگرسیون خطی و غیرخطی مقایسه گردیده و در نهایت بهترین روش برای پیش بینی عقب زدگی تعیین شده است. داده های مورد استفاده در الگوریتم برگرفته از معدن مس سنگان در ایران است (Faradonbeh و همکاران، ۲۰۱۶؛ Monjezi و همکاران، ۲۰۰۹). شکل ۲ نمایی از معدن سنگان را نشان می دهد.



شکل ۲. نمایی از معدن سنگان در ایران



تعداد داده‌های حاصل از این معدن ۶۸ مورد است که میانگین، بیشترین و کمترین مقدار این داده‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق

نوع داده	پارامتر	حروف اختصاری	کمینه	بیشینه	میانگین
ورودی	بارسنگ	B	۲	۵	۳/۹۵۸
	فاصله داری	S	۳	۶/۰۹۷	۳/۱۷۷
	گل گذاری	T	۱/۸	۴/۵	۰/۴۸۱
	خرج ویژه	PF	۱/۱۵	۱	۲/۵۴۰
خروجی	عقب زدگی	BB	۱/۵۱۹	۹	۲/۴۷۴

PSO یکی از روش‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت است که برای حل مسایل بهینه‌سازی عددی با فضای جستجوی بسیار بزرگ بدون نیاز به اطلاع از گرادیان تابع هدف ابداع شده است. این روش اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط دو نفر به نام‌های کندی (Kennedy) و ابرهارت (Eberhart) ابداع شد و در آغاز برای شبیه‌سازی پرواز دسته‌جمعی پرندگان مورد استفاده قرار می‌گرفت. تاکنون از این الگوریتم برای حل بسیاری از مسایل بهینه‌سازی کاربردی از جمله آموزش شبکه عصبی، پرتاب سنگ، لرزش زمین، عقب‌زدگی در معادن و ... با موفقیت استفاده شده است. به‌طور خلاصه مهم‌ترین نقاط قوت الگوریتم PSO عبارتند از: عدم حساسیت به مقیاس متغیرهای مساله، پیاده‌سازی بسیار ساده و سراسر، قابلیت پیاده‌سازی به‌صورت موازی برای انجام پردازش همزمان، عدم نیاز به مشتق تابع هدف، تعداد کم پارامتر، توانایی انجام یک جستجوی سراسری کاملاً موثر

۳. تحلیل داده‌ها

در این بخش دو مدل PSO به وسیله چهار پارامتر ورودی حاصل از انفجار (فاصله‌داری، بارسنگ، گل‌گذاری و خرج ویژه) و پارامتر خروجی (عقب‌زدگی) برای پیش‌بینی عقب‌زدگی در معدن مس‌سنگان معرفی می‌شود. در ابتدا به‌منظور محدود کردن داده‌ها در یک بازه و در نتیجه آن افزایش سرعت محاسبات، مقادیر پارامترهای ورودی و خروجی باید نرمال شوند. از معادله ۱ برای نرمال‌سازی پارامترها در محدوده‌ی بین صفر و یک استفاده شده است.

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$



X_n استاندارد شده و X_{\min} و X_{\max} بترتیب کمترین و بیشترین مقدار داده‌ها می‌باشند.

در این مطالعه برای مدل کردن پیش‌بینی عقب‌زدگی با الگوریتم PSO از دو معادله خطی و غیرخطی استفاده شده است. رابطه خطی بین چهار پارامتر ورودی و عقب‌زدگی به شرح زیر است:

$$BB_{n-linear} = w_1 B_n + w_2 S_n + w_3 T_n + w_4 PF_n + w_5 \quad (2)$$

همچنین رابطه‌ی غیر خطی بین پارامترها بشرح زیر می‌باشد:

$$BB_{n-quadratic} = w_1 B_n + w_2 S_n + w_3 T_n + w_4 PF_n + w_5 B_n^2 + w_6 S_n^2 + w_7 T_n^2 + w_8 PF_n^2 + w_9 B_n S_n + w_{10} B_n T_n + w_{11} B_n PF_n + w_{12} T_n S_n + w_{13} S_n PF_n + w_{14} T_n PF_n + w_{15} \quad (3)$$

که در آن مقادیر B بارگذاری، S فاصله‌داری، T گل‌گذاری، PF خرج ویژه، w_i عامل وزن مربوطه و N نماد مقدار استاندارد شده می‌باشد. درگام بعدی تابع هدف براساس اختلاف بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده بدست می‌آید. تابع هدف به شرح زیر می‌باشد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (A_i - P_i)^2} \quad (4)$$

A_i ، P_i و m بترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده بک بریک و مقادیر پیش‌بینی شده عقب‌زدگی و تعداد داده می‌باشد. این رابطه نشان دهنده آن است که هر چه مربع میزان خطا به صفر نزدیکتر باشد مدل پیش‌بینی صحیح‌تر خواهد بود. پارامترهای استفاده شده در مدل برای الگوریتم ژنتیک شامل: ۱۰۰ ذره با ۱۰۰۰ تکرار، وزن اینرسی ۰/۹ و ضریب شناختی و اجتماعی هر یک ۲ در نظر گرفته شده‌اند.

۴. بحث و بررسی

مدل ارائه شده برای پیش‌بینی عقب‌زدگی در نرم افزار اجرا و نتایج وزن برای مدل خطی و غیرخطی داده‌ها در روابط زیر نشان داده شده است.

$$BB_{n-linear} = -0.3665 B_n - 0.3696 S_n + 1.2176 T_n + 0.3497 PF_n - 0.1845 \quad (6)$$

$$BB_{n-quadratic} = -0.8325 B_n + 1.0898 S_n - 0.6811 T_n - 0.1379 PF_n - 0.3935 B_n^2 - 1.0652 S_n^2 + 1.5538 T_n^2 - 0.4985 PF_n^2 + 0.9732 B_n S_n - 0.1103 B_n T_n + 1.2332 B_n PF_n - 0.3231 T_n S_n - 0.6215 S_n PF_n + 0.5166 T_n PF_n + 0.0627 \quad (7)$$

از آنجا که پاسخ‌های به‌دست آمده به‌صورت نرمال شده اند با استفاده از معادله زیر بصورت غیر نرمال خود بازمی‌گردند.



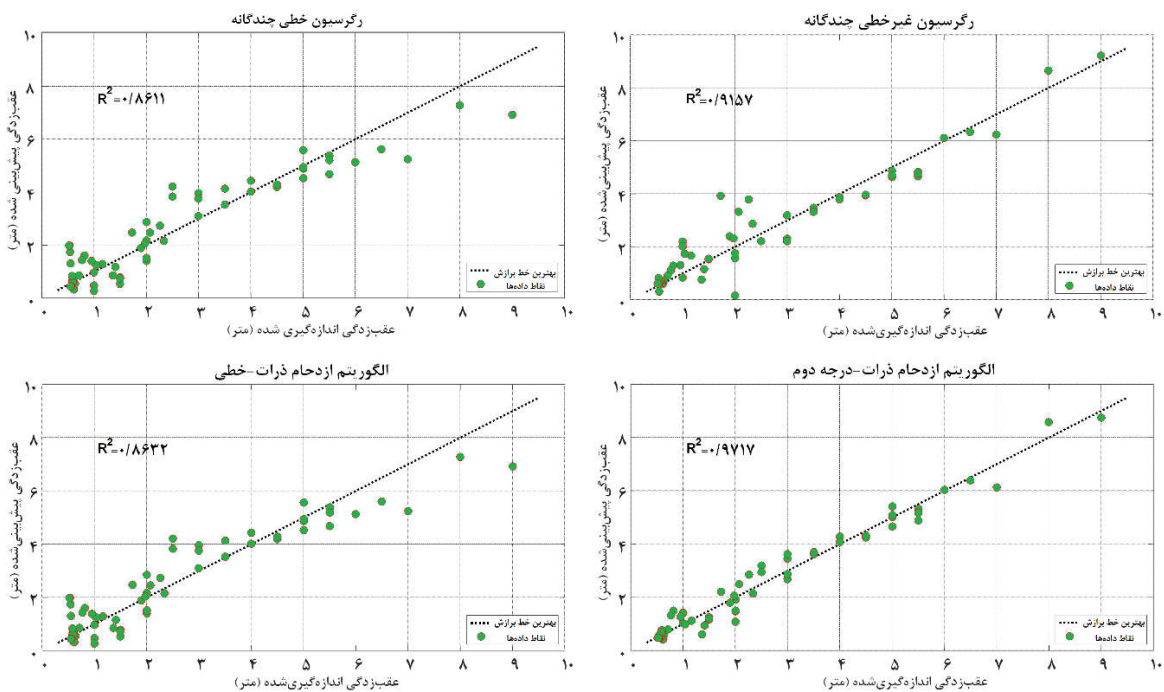
$$X = (X_n \times (X_{\max} - X_{\min})) + X_{\min} \quad (8)$$

همچنین معادلات رگرسیون خطی و غیرخطی که به منظور مقایسه با پاسخ های حاصل الگوریتم PSO انجام شده است، به شرح زیر می باشد:

$$BB_{n-linear} = -1.036 B_n - 1.012 S_n + 3.825 T_n + 3.489 PF_n - 3.345 \quad (9)$$

$$BB_{n-quadratic} = -3.895 B_n + 0.0689 B_n^3 + 7.786 S_n - 0.102 S_n^3 - 2.101 T_n^2 + 0.486 T_n^3 - 0.376 PF_n + 0.516 PF_n^2 + 0.56 PF_n^3 - 15.17 \quad (10)$$

در شکل ۳ نتایج حاصل از مدل ها بصورت نمودار نشان داده شده است.



شکل ۳. نمودار حاصل از مدل های رگرسیون و PSO به دو صورت خطی و غیرخطی

رتبه بندی مدل های PSO و رگرسیون بر اساس مقادیر R^2 و پراکندگی و خطا انجام و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است.

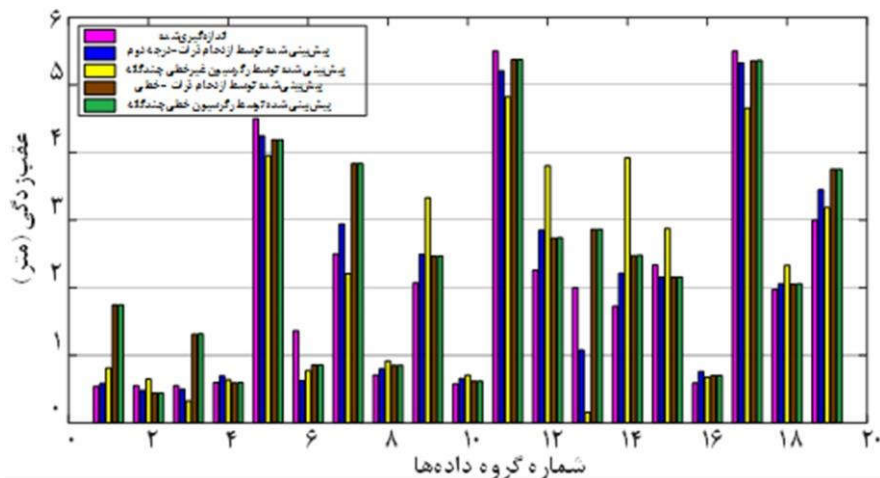


جدول ۲. مقایسه نتایج حاصل از روشهای مختلف

رتبه	R^2	RMSE	VAF	رابطه
۴	۰/۸۶۱۱	۰/۷۸۷۳	۸۶/۱۱	رگرسیون خطی
۲	۰/۹۱۵۷	۰/۶۰۹۱	۹۱/۵۶	رگرسیون غیر خطی
۳	۰/۸۶۳۲	۰/۷۷۵۵	۸۶/۳۲	خطی PSO
۱	۰/۹۷۱۷	۰/۳۵۷۹	۹۷/۱۷	PSO غیر خطی

۵. نتیجه گیری

در این مقاله میزان عقب زدگی معدن مس سونگون با استفاده از دو روش PSO و رگرسیون خطی و غیر خطی پیش بینی گردیده است. تعداد داده های استفاده شده در این مطالعه ۶۸ مورد می باشد. نتایج حاصل از این مدل ها براساس میزان خطا، پراکندگی و R^2 با یکدیگر مقایسه شده اند. هر دو مدل خطی و غیر خطی با خطای قابل قبولی، پیش بینی را انجام داده ولی میزان خطای PSO غیر خطی کمتر می باشد. با توجه به مقایسه ای انجام شده در جدول ۴ مدل ازدحام ذرات غیر خطی با میزان R^2 و پراکندگی و خطای برابر با ۰/۹۷۱۷ و ۹۷/۱۷ و ۰/۳۵۷۹ بهترین نتیجه را دارد و نتایج آن به واقعیت نزدیک تر بوده است. نوزده داده از بین ۶۸ داده به طور کاملاً تصادفی انتخاب و میزان عقب زدگی پیش بینی شده و واقعی آنها با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل ۴ نتایج حاصل از این مقایسه نشان داده شده است.



شکل ۴. مقایسه مدل های پیش بینی عقب زدگی با میزان واقعی عقب زدگی



۷. مراجع

- 1-Jimeno CL, Jimeno EL, Carcedo FJA (1995) *Drilling and blasting of rocks*. Balkema, Rotterdam
- 2-Bhandari, S. (1997). *Engineering rock blasting operations*. A. A. Balkema. 388, 388.
- 3-Mohamad, T. (2012). Simulation of blasting-induced air overpressure by means of artificial neural networks. *International Review on Modelling and Simulations*, 5(6), 2501-2506.
- 4-Atici, U. (2011). Prediction of the strength of mineral admixture concrete using multivariable regression analysis and an artificial neural network. *Expert Systems with applications*, 38(8), 9609-9618.
- 5-Monjezi, M., Ahmadi, Z., Varjani, A. Y., & Khandelwal, M. (2013). Backbreak prediction in the Chadormalu iron mine using artificial neural network. *Neural Computing and Applications*, 23(3-4), 1101-1107.
- 6-Esmaeili, M., Osanloo, M., Rashidinejad, F., Bazzazi, A. A., & Taji, M. (2014). Multiple regression, ANN and ANFIS models for prediction of backbreak in the open pit blasting. *Engineering with computers*, 30(4), 549-558.
- 7-Monjezi, M., Rezaei, M., & Yazdian, A. (2010). Prediction of backbreak in open-pit blasting using fuzzy set theory. *Expert Systems with Applications*, 37(3), 2637-2643.
- 8-Faramarzi, F., Farsangi, M. E., & Mansouri, H. (2013). An RES-based model for risk assessment and prediction of backbreak in bench blasting. *Rock mechanics and rock engineering*, 46 (4), 877-887.
- 9-Sari, M., Ghasemi, E., & Ataei, M. (2014). Stochastic modeling approach for the evaluation of backbreak due to blasting operations in open pit mines. *Rock mechanics and rock engineering*, 47 (2), 771-783.
- 10-Faradonbeh, R. S., Monjezi, M., & Armaghani, D. J. (2016). Genetic programming and non-linear multiple regression techniques to predict backbreak in blasting operation. *Engineering with Computers*, 32 (1), 123-133.
- 11-Monjezi, M., Rezaei, M., & Varjani, A. Y. (2009). Prediction of rock fragmentation due to blasting in Gol-E-Gohar iron mine using fuzzy logic. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46 (8), 1273-1280.