Shahid Beheshti University

Researches in Earth Sciences

Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir

Research Article

Modeling the net present value in mining projects using the intelligent models and statistical multivariate regression

Mohammad Rezaei*

Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Received: 08 Dec 2023 Accepted: 27 Apr 2024

Extended Abstract

Introduction

Net present value (NPV) index is one of the most important economic parameters in evaluating the mining investment projects. Considering the inherent uncertainty in effective parameters on the NPV in most of the mining projects, its precise estimation is a difficult process and application of the suitable methods is required. In this paper, fuzzy system, neural network and multivariate regression models are used for NPV determination in the Zarshuran gold mine project. In spite of the metal value, the effects of costs and discount rate on the NPV are also considered as an index for evaluation the Zarshuran gold mine project of Takab using the above models. One of the advantages of this research compared to the previous similar studies is the utilization of two new intelligent algorithms i.e., fuzzy system and neural network for modeling the NPV index with higher accuracy. These algorithms are efficient tools to solve the problems having ambiguity and uncertainty such as the mining investment projects and reduce the investment risks. Considering the management challenges in deciding on the economic justification of various projects and the existence of time and resource limitations, the use of these models helps clarify the economic future of a mineral investment project and make the final decision.

Materials and Methods

In this study, three new models including fuzzy system, neural network and statistical multivariate regression were used to determine the NPV and evaluate the effective parameters on this index in the Zarshuran gold mine investment project of Takab. The obtained results of the above models were compared with each other, with the real data, and with the similar previous studies. Gold price (main element), silver price (byproduct element) and discount rate were considered as input parameters for evaluating the NPV. Application of the fuzzy logic in NPV modeling, which is always accompanied by uncertainty, can lead to more realistic results. Also, the utilization of neural network can be effective due to its high capability in dealing with vague and noisy data that are somehow involved in the evaluation of mining projects.

Citation: Rezaei, M., 2024. Modeling the net present value in mining projects using the intelligent models and statistical multivariate regression, *Res. Earth. Sci:* 15(3), (1-17) DOI: 10.48308/esrj.2024.104718

* Corresponding author E-mail address: m.rezaei@uok.ac.ir

Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Researches in Earth Sciences

Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir

Results and Discussion

Using the trial and error method, triangular and trapezoidal membership functions, Mamdani inference motor and center of gravity decentralization function were determined as the optimum parameters of the proposed fuzzy model. Also, a neural network with training function of Levenberg-Marquardt back-propagation type, transfer function of sigmoid logarithm kind, 3-5-10-1 structure and root mean square error of 0.0032 was found as an optimum network. Moreover, a statistical multivariate linear relation was proposed to predict the NPV. According to the performance evaluation indices including determination coefficient, absolute error and relative error, results of the proposed models were compared with each other, with the actual data, and with the previous similar investigations. The above comparison proved that the performance of both fuzzy and neural models in predicting the NPV is acceptable and they have a much better agreement with real data in comparison with the statistical model. However, the performance of fuzzy model is somewhat better than the proposed neural network models in this research and previous studies and its results are more consistent with the actual data. Finally, the sensitivity analysis of the fuzzy model results (due to its greater accuracy) are conducted using the cosine amplitude method (CAM). Accordingly, it was confirmed that the gold price has the highest effect and the discount rate has the least effect on the NPV index.

Conclusion

The present study proved the successful application of two new intelligent-based models including fuzzy logic and neural network algorithms to predict the NPV in the Zarshuran gold mine investment project. Also, a linear multivariate regression relation proposed to forecast the NPV index with a relative acceptable performance. Evaluation the results of proposed models showed that the fuzzy model performance was somewhat better than the proposed neural network models in this study and previous studies and both were much higher than the statistical model in predicting mining projects NPV. Based on the sensitivity analysis of the fuzzy model results (the most accurate proposed model), it was proved that the gold price and discount rate have the highest and lowest effects on the NPV, respectively. Considering the above results, it can be concluded that the proposed intelligent techniques in this research (especially the fuzzy model) can be used with good reliability in the evaluation of mining investment projects in order to cover their involved uncertainty and reduce the investment risk.

Keywords: Sensitivity analysis, Net present value, Multivariate regression, Fuzzy system, Neural network.

Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

پژوهشهای دانش زمین
Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir

مدل‌سازی ارزش خالص فعلی در پروژه‌های معدنی با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند و رگرسیون چند متغیره آماری

محمد رضائی*

گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

(**پژوهشی**) دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۷ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

چکیده گسترده

مقدمه

شاخص ارزش خالص فعلی یکی از مهم‌ترین پارامترهای اقتصادی برای ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری معدنی است. با توجه به وجود عدم قطعیت در پارامترهای تأثیرگذار بر ارزش خالص فعلی در اکثر پروژه‌های معدنی، تخمین دقیق آن فرآیندی مشکل بوده و نیازمند استفاده از روش‌های مناسب است. در تحقیق حاضر، از سه مدل سیستم فازی، شبکه عصبی و رگرسیون چند متغیره آماری برای تعیین ارزش خالص فعلی در پروژه سرمایه‌گذاری معدن طلای زرشوران تکاب استفاده شده است. علاوه بر قیمت فلز، تأثیر هزینه‌ها و نرخ تنزیل هم در تعیین ارزش خالص فعلی به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی پروژه معدن طلای زرشوران تکاب با استفاده از مدل‌های فوق‌الذکر در نظر گرفته شده است. یکی از مزایای تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات مشابه قبلی، استفاده از دو الگوریتم هوشمند سیستم فازی و شبکه عصبی برای مدل‌سازی ارزش خالص فعلی با دقت بیشتر است. الگوریتم‌های فوق، روش‌هایی کارا در حل مسائل دارای ابهام و عدم قطعیت از جمله پروژه‌های سرمایه‌گذاری معدنی بوده و باعث کاهش ریسک‌های سرمایه‌گذاری می‌شوند. با در نظر گرفتن چالش‌های مدیریتی موجود در تصمیم‌گیری بر سر توجیه اقتصادی پروژه-های مختلف و وجود محدودیت‌های زمان و منابع، استفاده از این مدل‌ها به روشن نمودن آینده اقتصادی یک پروژه سرمایه‌گذاری معدنی و تصمیم‌گیری نهایی کمک شایانی می‌کند.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از سه مدل سیستم فازی، شبکه عصبی و رگرسیون چند متغیره آماری برای تعیین ارزش خالص فعلی و ارزیابی پارامترهای تأثیرگذار بر آن در پروژه سرمایه‌گذاری معدن طلای زرشوران تکاب استفاده و نتایج حاصله با همدیگر، با داده‌های واقعی و با مطالعات مشابه قبلی مقایسه شده است. قیمت طلا (عنصر اصلی)، قیمت نقره (عنصر همراه) و نرخ تنزیل به‌عنوان پارامترهای ورودی جهت ارزیابی ارزش خالص فعلی در نظر گرفته شده است. استفاده از منطق فازی در مدل‌سازی ارزش خالص فعلی که همواره با عدم قطعیت همراه است، می‌تواند به نتایج واقعی‌تری منجر شود. همچنین، استفاده از شبکه عصبی با توجه به قابلیت بالای آن در مواجهه با داده‌های مبهم و دارای نویز که به نوعی در ارزیابی پروژه‌های معدنی دخیل هستند، می‌تواند مثمرثر واقع شود.

استناد: رضائی، م.، ۱۴۰۳. مدل‌سازی ارزش خالص فعلی در پروژه‌های معدنی با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند و رگرسیون چند متغیره آماری، پژوهشهای دانش زمین: ۱۵(۳)، (۱۷-۱)، DOI: 10.48308/esrj.2024.104718

* نویسنده مسئول: E-mail: m.rezaei@uok.ac.ir

Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

پژوهشهای دانش زمین
Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir
Shahid Beheshti University

نتایج و بحث

با استفاده از روش سعی و خطا، توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای، موتور استنتاج ممدانی و تابع غیرفازی‌ساز مرکز ثقل به‌عنوان پارامتراهای بهینه در مدل فازی پیشنهادی انتخاب شد. همچنین، شبکه عصبی با تابع آموزش پس‌انتشار خطا از نوع لونبرگ-مارک کواردت، تابع انتقال لگاریتم سیگموئید با ساختار ۳-۵-۱۰-۱ و متوسط جذر مربعات خطای ۰/۰۰۳۲ به‌عنوان شبکه بهینه انتخاب گردید. به علاوه، یک رابطه آماری چند متغیره خطی برای پیش‌بینی ارزش خالص فعی ارائه شد. براساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد ضریب تصمیم‌گیری، خطای مطلق و خطای نسبی، نتایج حاصل از مدل‌های پیشنهادی با همدیگر و همچنین با داده‌های واقعی و مطالعات مشابه قبلی مقایسه گردید. مقایسه فوق نشان داد که عملکرد دو مدل فازی و عصبی در پیش‌بینی ارزش خالص فعلی قابل قبول بوده و در مقایسه با مدل آماری تطابق بسیار بهتری با داده‌های واقعی دارند. با این حال، عملکرد سیستم فازی تا حدودی بهتر از شبکه عصبی پیشنهادی در این تحقیق و مطالعات قبلی بوده و نتایج حاصل از آن تطابق نسبتاً بهتری با داده‌های واقعی دارد. در نهایت، آنالیز حساسیت نتایج حاصل از مدل فازی با استفاده از روش میدان کسینوسی انجام شد (با توجه به دقت بیشتر آن). نتایج حاصله نشان داد که قیمت طلا دارای بیشترین تأثیر و نرخ تنزیل دارای کمترین تأثیر بر ارزش خالص فعلی است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، کاربرد موفقیت‌آمیز دو مدل هوشمند مبتنی بر منطق فازی و شبکه عصبی در پیش‌بینی ارزش خالص فعلی در پروژه سرمایه‌گذاری معدنی طلای زرشوران ارائه گردید. همچنین، یک معادله رگرسیون چند متغیره خطی با عملکرد نسبتاً قابل قبول برای تخمین ارزش خالص فعلی پیشنهاد شد. ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های پیشنهادی نشان داد که عملکرد مدل فازی در تخمین ارزش خالص فعلی پروژه‌های معدنی تا حدودی بهتر از مدل شبکه عصبی پیشنهادی در این تحقیق و مطالعات قبلی بوده و عملکرد هر دو مدل بهتر از مدل آماری است. براساس نتایج آنالیز حساسیت مدل فازی (دقیق‌ترین مدل پیشنهادی)، اثبات گردید که قیمت طلا و نرخ تنزیل به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر ارزش خالص فعلی دارند. با توجه به نتایج فوق، می‌توان نتیجه گرفت که از تکنیک‌های هوشمند پیشنهادی در این تحقیق (به‌ویژه مدل فازی) می‌توان با قابلیت اطمینان خوبی در ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری معدنی به‌منظور پوشش عدم قطعیت و کاهش ریسک سرمایه‌گذاری استفاده نمود.

واژگان کلیدی: آنالیز حساسیت، ارزش خالص فعلی، رگرسیون چند متغیره، سیستم فازی، شبکه عصبی.

مقدمه

معدن و صنایع معدنی به‌عنوان جایگزینی برای اقتصاد بدون نفت در کشور می‌تواند نقش مؤثری در جذب سرمایه‌گذار و ایجاد اشتغالزایی پایدار ایفا نماید. بنابراین، لازم است توجه بیشتری به این بخش صورت گیرد تا با جذب سرمایه داخلی و خارجی، سرمایه‌گذاری در معادن و صنایع معدنی کشور رونق پیدا کند (Mehregan and Yavari, 2006). از طرف دیگر، سرمایه‌گذاری در پروژه‌های معدنی جزو سرمایه‌گذاری‌های پیچیده است که همواره در بر گیرنده ریسک می‌باشد. به‌عنوان مثال، یک پروژه معدنی تحت تأثیر عدم قطعیت‌های اقتصادی و فیزیکی متعددی از جمله قیمت ماده معدنی (یا فلز)، عیار، هزینه‌ها و فاکتورهای برنامه‌ریزی و زیست محیطی است. بنابراین، ارزیابی یک پروژه معدنی بدون در نظر گرفتن ریسک موجود در فاکتورهای فوق منجر به نتایج نامعتبر و تصمیم‌گیری نادرست مدیران خواهد شد (Dehghani and Ataee-pour, 2012; Kamel et al, 2023). در این راستا، اطمینان از سرمایه‌گذاری در پروژه‌های معدنی بسیار مهم بوده و بایستی پارامترهای مؤثر در سودآوری تعیین و چگونگی تأثیر آنها در ارزش نهایی پروژه مورد بررسی قرار گیرد. به

طور کلی، ارزیابی اقتصادی پروژه‌های سرمایه‌گذاری در بخش معدن با استفاده از روش‌های مرسوم استاتیکی و دینامیکی انجام می‌شود که رایج‌ترین این روش‌ها شامل سه تکنیک ارزش خالص فعلی، نرخ بازگشت داخلی و دوره برگشت سرمایه است (Kavakh, 2015; Banda, 2023; Ronyastra et al, 2024). در بررسی اقتصادی اجرای طرح‌ها، طرحی از لحاظ اقتصادی قابل قبول است که دارای ارزش خالص فعلی مثبت و نرخ بازگشت سرمایه بزرگ‌تر از حداقل نرخ جذب کننده باشد. در ارزیابی اقتصادی و تخمین ارزش خالص فعلی سرمایه‌گذاری در پروژه‌های معدنی، بسیاری از پارامترها مربوط به آینده و غیر قطعی هستند. بنابراین، بررسی این پروژه‌ها و تعیین رفتار پارامترهای غیر قطعی اصولاً بر مبنای پیش‌بینی استوار است. همچنین، درآمد حاصل از پروژه و نرخ تنزیل در نظر گرفته شده جزو پارامترهای تأثیرگذار بر ارزش خالص فعلی بوده که مشمول عدم قطعیت هستند (Yasrebi et al, 2017; Volkmann et al, 2019). از طرف دیگر، تخمین درآمد یکی از بخش‌های مهم در ارزیابی اقتصادی پروژه-هاست که با استفاده از تحلیل روند و روش‌های اقتصادسنجی انجام می‌شود. در صورتی که هدف انتخاب سرمایه‌گذاری بهینه از بین گزینه‌های موجود برای رسیدن به حداکثر سوددهی باشد، نرخ سرمایه‌گذاری مجدد گزینه مناسبی خواهد بود. در بسیاری از موارد، نرخ بازگشت خاصی توسط سرمایه گذاران هدف قرار می‌گیرد. در این روش، نرخ بازگشت سرمایه و سود مطلوب قابل دستیابی خواهد بود. به علاوه، نرخ تنزیل متغیر که در آن موقعیت آینده سرمایه‌گذاری گنجانده می‌شود در مقایسه با نرخ تنزیل ثابت بسیار واقعی‌تر است (Wiesemann et al, 2010; Califf et al, 2008; Oraee et al, 2011). بسیاری از عدم قطعیت‌ها که در بالا اشاره شد از همان آغاز شروع یک پروژه معدنی وجود دارند که شامل سه دسته کلی عدم قطعیت‌های اکتشافی، مهندسی و اقتصادی است. عدم قطعیت‌های اکتشافی در طول مراحل ارزیابی ذخیره کانسار، جمع‌آوری و پردازش داده، طبقه‌بندی ذخیره و گزارش‌دهی اتفاق می‌افتد که محققین زیادی آن را مورد مطالعه قرار داده‌اند (Dimitrakopoulos et al, 2002; Godoy and Dimitrakopoulos, 2004; Dimitrakopoulos et al, 2007; Rendu, 2007; Miranda et al, 2017). عدم قطعیت‌های مهندسی شامل تعیین ارتفاع پله، کنترل عیار برنامه‌ریزی شده، انتخاب روش استخراج، فاکتورهای ترقیق، پارامترهای ژئوتکنیکی و هیدرولوژی و فاکتورهای استحصال معدنی و متالوژیکی است. این نوع عدم قطعیت بر روی محدوده نهایی معدن و دوره‌های برنامه‌ریزی استخراج تأثیرگذار خواهد بود. نوع سوم از عدم قطعیت شامل عدم قطعیت اقتصادی است که موضوع تحقیق حاضر می‌باشد. عدم قطعیت اقتصادی تأثیر بسیار مهمی بر روی ارزیابی یک پروژه معدنی دارد. از دیدگاه اقتصادی، قیمت های آتی فلز یا ماده معدنی و هزینه‌های عملیاتی جزو مهمترین فاکتورهای عدم قطعیت در یک پروژه معدنی هستند. قیمت فلز یک پارامتر نقدی واقعی است که تعادل یا عدم تعادل در بازار فلز را نشان می‌دهد. از آنجا که بازار براساس تقاضا، عرضه و دیگر فاکتورها مانند احتکار، وقایع خبری و نوسانات بورس استوار است، لذا عدم قطعیت در قیمت‌های فلز افزایش می‌یابد (Case and Fair, 1989; MacAvoy, 1998; Taylor et al, 2000). در نهایت، هزینه یکی دیگر از منابع عدم قطعیت در ارزیابی پروژه‌های معدنی است. از آنجا که تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی جزو ضروریات مهم ارزیابی معدن است، لذا عدم قطعیت در هزینه به علت نبود اطلاعات مهندسی یا اقتصادی در ابتدای پروژه افزایش می‌یابد. به‌عبارت ساده‌تر، شرکت‌های معدنکاری با اطمینان مطلق نمی‌دانند که در آینده در دروه های زمانی مختلف چقدر بایستی هزینه کنند تا برای تأمین آن برنامه‌ریزی نمایند (Camus, 2002). تحقیقات متعددی در زمینه عدم قطعیت اقتصادی تاکنون انجام گرفته است (Samis et al, 2006; Shafiee et al, 2009; Giovanni et al, 2017). با این حال، تحقیقات قابل توجهی در زمینه عدم قطعیت در هزینه (سرمایه‌ای و عملیاتی) وجود ندارد. این در حالی است که برای ارزیابی واقعی و دقیق ارزش اقتصادی یک پروژه معدنی، در نظر گرفتن عدم قطعیت در هزینه‌ها (به‌ویژه هزینه‌های عملیاتی) امری ضروری است. همچنین، وقوع خطا در پیش‌بینی پارامترهای دارای عدم قطعیت در نهایت منجر به بروز خطای بیشتر در ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری از قبیل تعیین شاخص‌های ارزش خالص فعلی و نرخ بازگشت سرمایه می‌شود. بنابراین، ممکن است شرایط اقتصادی یا غیر اقتصادی بودن یک پروژه در چنین شرایطی تغییر کرده و باعث هدر رفتن سرمایه و زمان شود. بر این اساس، پیش‌بینی و ارزیابی

دقیق شاخص‌های اقتصادی با در نظر گرفتن ریسک عدم قطعیت در پروژه‌های سرمایه‌گذاری معدنی امری ضروری است. به‌منظور پوشش ضعف‌های فوق، در تحقیق حاضر علاوه بر قیمت فلز، هزینه‌ها و نرخ تنزیل هم در ارزش خالص فعلی به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی پروژه معدن طلای زرشوران تکاب در نظر گرفته شده است. به علاوه، از روش‌های هوشمند مانند سیستم استنتاج فازی که روشی کارا برای حل مسائل درگیر با عدم قطعیت است برای مدل سازی ارزش خالص فعلی در پروژه معدن طلای زرشوران تکاب استفاده شده است تا بتوان به نتایجی نزدیک به واقعیت دست یافت. همچنین، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با توجه به قابلیت بالای آن در مواجهه با داده‌های مبهم و دارای نویز که به نوعی در ارزیابی پروژه‌های معدنی دخیل هستند می‌تواند مثمرثر واقع شود. بنابراین، یکی از مزایای تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات مشابه قبلی، استفاده از دو الگوریتم هوشمند فوق‌الذکر برای مدل‌سازی شاخص ارزش خالص فعلی در پروژه‌های معدنی است که روش‌هایی کارا برای حل مسائل دارای ابهام، نویز و عدم قطعیت هستند. با در نظر گرفتن چالش‌های مدیریتی موجود در تصمیم‌گیری بر سر توجیه اقتصادی پروژه‌های مختلف و با توجه به محدودیت‌های زمان و منابع، استفاده از این روش‌ها کمک مؤثری به پیش‌بینی آینده اقتصادی یک پروژه سرمایه‌گذاری معدنی خواهد کرد.

منطقه مورد مطالعه

کانسار طلای زرشوران یکی از ذخایر مهم طلای کشور است که در ۳۵ کیلومتری شهر تکاب قرار گرفته است. این معدن دارای ذخیره قابل برداشت ۱۲/۵ میلیون تن با عیار ۴/۱۸ گرم در تن و نسبت باطله‌برداری ۱۳/۵۷:۱ است. نرخ تولید سالیانه معدن و کارخانه به ترتیب ۷۵۰۰۰۰ تن کانسنگ و ۳۰۶۰ کیلوگرم شمش طلا تعیین شده است. عمر این پروژه با احتساب سه سال آماده‌سازی معدن و احداث کارخانه حدود ۱۷/۵ سال برآورد شده است. سرمایه‌گذاری اولیه معدن و کارخانه طلا به ترتیب ۲۲۸/۶۶ و ۶۳۲/۰۹ میلیارد ریال، هزینه سرمایه‌گذاری مجدد به ترتیب ۱۴۵/۲۲ و ۳ میلیارد ریال و هزینه عملیاتی سالیانه به ترتیب ۷۵/۸۶ و ۱۶۸/۸۴ میلیارد ریال پیش‌بینی شده است. ارزش خالص فعلی این پروژه با نرخ تنزیل ۱۷ درصد برابر با ۴۷۰/۷۶ میلیارد ریال، نرخ بازگشت داخلی پروژه برابر با ۲۶/۹۹ درصد و دوره بازگشت سرمایه هم سال نهم برآورد گردیده است (Oraee et al, 2011). بر اساس اهیمت پارامترهای تأثیرگذار بر ارزش خالص فعلی (که در بخش مقدمه به صورت مفصل تشریح شد)، پارامترهای قیمت طلا، قیمت نقره و نرخ تنزیل به‌عنوان متغیرهای ورودی برای مدل‌سازی شاخص ارزش خالص فعلی در پروژه معدن طلای زرشوران تکاب با استفاده از مدل‌های سیستم فازی، شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چند متغیره آماری انتخاب شده است. بدین منظور، داده‌های مربوط به قیمت طلا و نقره و نرخ تنزیل به‌عنوان پایگاه داده برای طراحی و ارزیابی مدل‌های پیشنهادی در نظر گرفته شده است. پارامترهای ورودی و خروجی و مشخصات آماری داده‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: خصوصیات آماری پارامترهای ورودی و خروجی در مدل‌سازی

نوع	پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین
	قیمت طلا (دلار بر اونس)	۳۲۸/۲	۱۱۳۵	۶۳۴/۰۴
ورودی	قیمت نقره (دلار بر اونس)	۴/۴۹	۱۹/۵۱	۱۰/۵
	نرخ تنزیل (٪)	۵/۲۷	۲۹/۵۱	۱۵/۷۳
خروجی	ارزش خالص فعلی (۱۰۶دلار)	-۶۶/۹۸	۴۷۱/۰۴	۳۹/۵۶

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از سه تکنیک سیستم فازی، شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چند متغیره آماری به‌منظور پیش‌بینی ارزش خالص فعلی استفاده شده است که در ادامه به صورت مختصر تشریح می‌شوند.

سیستم‌های فازی

تئوری فازی در سال ۱۹۶۵ توسط پروفسور لطفی‌زاده معرفی شد. اساساً سیستم‌های فازی پدیده‌های غیر قطعی و نامشخص را توصیف می‌کنند در حالی که خود تئوری فازی یک تئوری دقیق است. منطق فازی ایده و ابزار

جدیدی است که به عنوان یک جایگزین قوی، می‌تواند در مدل‌سازی پدیده‌های مهندسی، اقتصادی و اجتماعی مورد استفاده قرار گیرد. فرآیند تصمیم‌گیری در محیط فازی مشابه فرآیند تصمیم‌گیری در مغز انسان است به صورتی که انسان روزانه انبوهی از اطلاعات نادقیق (مبهم) را اخذ نموده، تجزیه و تحلیل کرده و تصمیم می‌گیرد. از مجموعه‌های فازی برای مواجهه با ابهام و اثبات منطقی داده‌ها استفاده می‌شود. در تئوری کلاسیک، هر عنصر به یک مجموعه یا تعلق دارد و یا ندارد، اما در مجموعه‌های فازی از روش‌های غیر صریح براساس عدم قطعیت استفاده می‌شود که در آن، عناصر مورد استفاده عددی نبوده بلکه به صورت متغیرهای زبانی (کلامی) هستند. مجموعه‌های کلاسیک براساس قوانین ۰ و ۱ است، در حالی که مجموعه فازی به‌وسیله تابعی در محدوده [۰و۱] تعریف می‌شود (Ghezelbash et ql, 2019) که برای هر عضو در یک مجموعه، درجه عضویتی اختصاص می‌یابد و یک عضو می‌تواند به بیشتر از یک مجموعه با درجه عضویت‌های مختلف تعلق داشته باشد (Klir, 1995). بدین ترتیب، می توان واژه‌هایی مثل خوب، متوسط، کم و ... را به صورت رابطه ریاضی بیان نمود. روش پیاده‌سازی یک سیستم خبره فازی که به وسیله گزاره‌های شرطی «اگر- آنگاه» انجام می‌شود شامل چهار مرحله کلی فازی‌سازی مقادیر عددی ورودی، بیان قواعد سیستم (پایگاه قواعد فازی)، موتور استنتاج فازی و غیرفازی‌سازی است (Wang, 1997). فازی سازی عبارت از تبدیل مقادیر عددی اندازه‌گیری شده به اصطلاحات توصیفی است. این فرآیند در ورودی سیستم به وسیله تابع عضویت انجام می‌شود که در انواع مختلف به صورت توابع مثلثی، ذوزنقه‌ای و زنگوله‌ای وجود دارد. یک پایگاه قواعد فازی از مجموعه‌ای قواعد «اگر-آنگاه» فازی تشکیل شده که توصیف کننده رفتار سیستم است. پایگاه قواعد فازی از این نظر که سایر اجزاء سیستم فازی برای پیاده‌سازی این قواعد به شکل مؤثر و کارا استفاده می‌شوند، قلب یک سیستم فازی محسوب می‌شود. در مرحله استنتاج فازی، از روی متغیرهای ورودی، توابع عضویت و پایگاه قواعد، متغیرهای کیفی خروجی با استفاده از موتورهای استنتاج مختلف از جمله موتور استنتاج ممدانی، سوگنو و ... استخراج می‌شوند. در پایان عملیات و محاسبات استنتاج فازی، حاصل عمل به صورت متغیری توصیفی خواهد بود. برای استفاده از نتایج، باید آن را به مقادیر عددی تبدیل نمود که به این عمل اصطلاحاً غیرفازی‌سازی می‌گویند. انواع مختلف غیرفازی‌ساز وجود دارد که شامل غیرفازی‌ساز مرکز ثقل، میانگین مراکز، ماکزیمم و ... است (Sugeno, 1993; Rezaei et al, 2014, 2015).

شبکه‌های عصبی مصنوعی

توضیح کامل شبکه‌های عصبی و ساختار آنها در منابع مختلف ارائه شده است (Khoshjavan et al, 2010; Majdi and Rezaei, 2014; Sayadi et al, 2014; Rezaei et al, 2017; Rajabi et al, 2017; Rezaei, 2018). لذا در اینجا توضیحات مختصری در این زمینه ارائه می‌شود. شبکه‌های عصبی مدل‌های الکترونیکی از ساختار عصبی مغز انسان هستند که مکانیسم فراگیری و آموزش آنها همانند مغز انسان اساساً بر تجربه استوار است (Ghannadpour et al, 2017). فرآیند ذخیره‌سازی اطلاعات به صورت الگو و تجزیه و تحلیل مربوطه، اساس روش‌های نوین محاسباتی را تشکیل می‌دهد. یک شبکه عصبی، از عناصر پردازش که همان نرون‌های مصنوعی هستند تشکیل شده است که این نرون‌ها به روش‌های مختلف برای شکل دادن ساختار شبکه، سازماندهی شده‌اند. هر یک از این نرون‌های مصنوعی، ورودی‌ها را دریافت کرده و آنها را پردازش می‌کنند و یک سیگنال خروجی را تحویل می‌دهند. ورودی می‌تواند داده خام یا خروجی عناصر پردازش دیگر باشد. خروجی هم می‌تواند محصول نهایی باشد، یا اینکه به‌عنوان ورودی برای نرون دیگر استفاده شود. هر شبکه عصبی مصنوعی از مجموعه‌ای از نرون‌ها در یک یا چند لایه تشکیل شده است. قرار گرفتن این نرون‌ها در لایه‌های مختلف و نحوه اتصال آنها به یکدیگر، تعداد نرون‌ها در هر لایه و تعداد لایه‌ها، ساختار شبکه را تعیین می‌کنند. ارتباط بین سطح فعالیت داخلی و خروجی ممکن است به‌صورت خطی یا غیرخطی باشد. چنین ارتباطی توسط تابع تابع انتقال بیان می‌شود که در چندین شکل مختلف وجود دارد و انتخاب یک تابع خاص، کاربرد شبکه را مشخص می‌کند (Hagan et al, 1996). شبکه‌های عصبی به دلیل داشتن قابلیت‌های بالا به‌خوبی در مسائل و زمینه‌های مختلف استفاده می‌شوند. این شبکه‌ها با موفقیت در بسیاری از مسائل پیش‌بینی و طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Sefidari et al, 2018). شبکه‌های عصبی از نظر عملکرد و با توجه به توابع آموزش مورد استفاده و نحوه کارکرد، دارای روش‌های

مختلفی هستند. از آنجایی که شبکه‌های عصبی به خوبی قادرند تا روابط غیرخطی مجهول بین داده‌ها را تخمین بزنند، امروزه به صورت گسترده‌ای در بسیاری از شاخه‌های علم از جمله رشته‌های مهندسی مورد استفاده قرار می گیرند.

تحلیل رگرسیون چند متغیره

رگرسیون چند متغیره روشی آماری است که برای تجزیه و تحلیل داده و بررسی رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل به کار می‌رود. از مدل رگرسیون چند متغیره می‌توان در پیش‌بینی خروجی (متغیر وابسته) از روی متغیر و یا متغیرهای مستقل و به دست آوردن رابطه بین پارمترهای ورودی و خروجی استفاده کرد (Jennrich, 1995). این روش توسط محققین در زمینه‌های مختلف مهندسی معدن استفاده شده است.

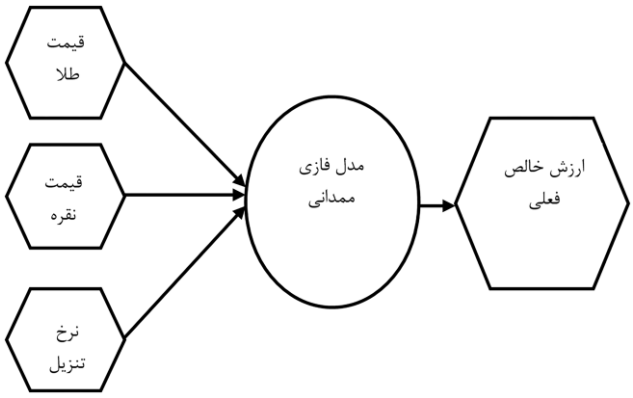
بحث و نتایج

مدل‌سازی

در تحقیق حاضر از سه مدل فازی، شبکه عصبی و آماری برای پیش‌بینی ارزش خالص فعلی استفاده شده است که در ادامه نحوه طراحی و مدل‌سازی آنها تشریح می‌شود.

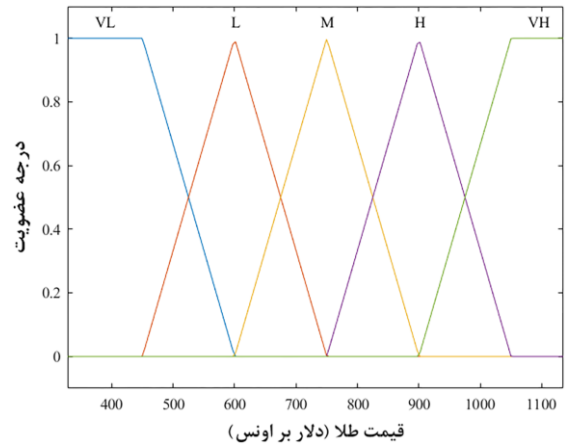
مدل فازی

اولین مرحله در طراحی یک مدل فازی تعیین توابع عضویت پارامترهای ورودی و خروجی است. ساختار مدل فازی برای تعیین ارزش خالص فعلی در شکل ۱ و توابع عضویت پارامترهای ورودی و خروجی در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده است.

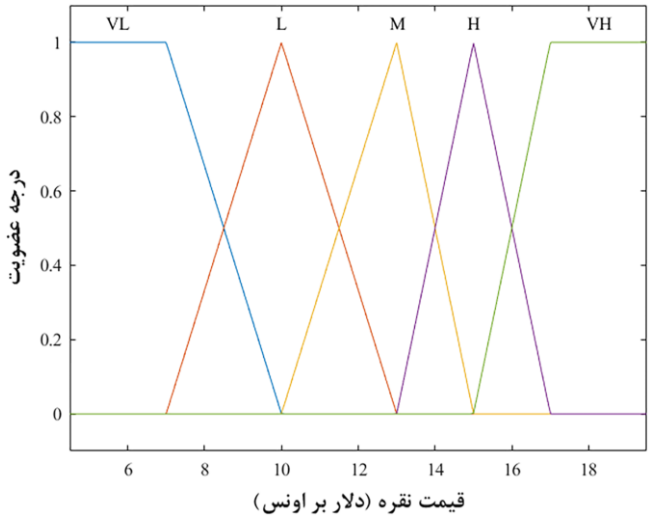


شکل ۱: ساختار مدل فازی به منظور پیش‌بینی ارزش خالص فعلی

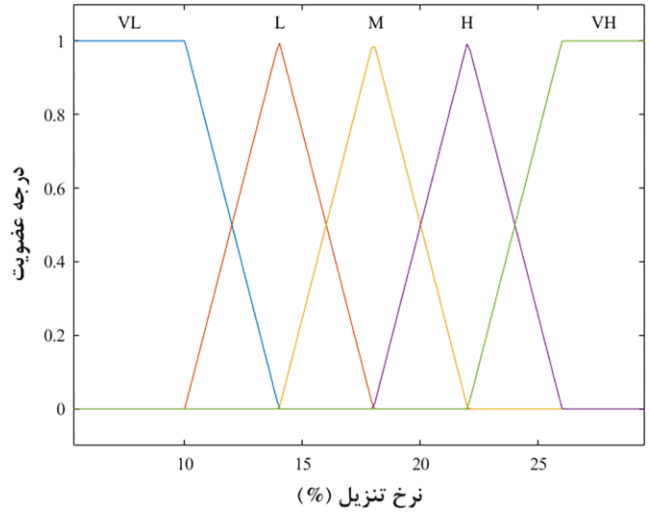
در شکل‌های ۱ تا ۵، نرخ تنزیل بر حسب درصد، قیمت طلا و نقره بر حسب دلار بر اونس و ارزش خالص فعلی بر حسب میلیون دلار است. همچنین، درجه عضویت پارامترهای ورودی و خروجی به‌صورت کم (Low)، متوسط (Medium) و زیاد (High) در نظر گرفته شده است. به‌عنوان مثال، VL، M و VH به ترتیب نشان‌دهنده "خیلی کم"، "متوسط" و "خیلی زیاد" است.



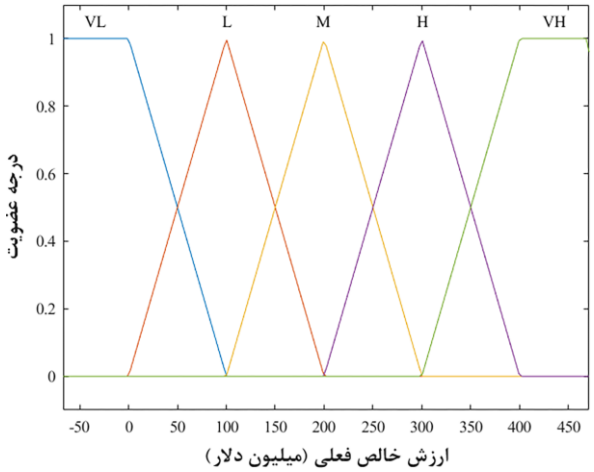
شکل ۲: تابع عضویت قیمت طلا



شکل ۳: تابع عضویت قیمت نقره



شکل ۴: تابع عضویت نرخ تنزیل



شکل ۵: تابع عضویت ارزش خالص فعلی

مرحله بعدی در ساخت مدل، فازی ایجاد پایگاه قواعد فازی است. در این تحقیق، از ۷۵ قاعده اگر-آنگاه برای ساخت پایگاه قواعد مدل فازی به‌منظور دستیابی به مدل فازی بهینه برای پیش‌بینی ارزش خالص فعلی استفاده شده است.

این قواعد براساس داده‌های آموزش و همچنین تجربه محقق طراحی شده است. پس از ایجاد پایگاه قواعد، با انتخاب موتور استنتاج و روش غیرفازی‌سازی مناسب، مدل‌سازی تکمیل می‌شود. به دلیل کارایی بهتر و آسان‌تر بودن تفسیر و تحلیل موتور استنتاج ممدانی در مقایسه با دیگر روش‌های استنتاج، این روش یکی از معمول‌ترین الگوریتم‌های استنتاج مورد استفاده در سیستم‌های فازی برای کاربردهای معدنی است (Rezaei et al, 2015). در این تحقیق هم از موتور استنتاج ممدانی برای ترکیب قواعد فازی استفاده شده است. به منظور تبدیل نتایج فازی حاصل از مرحله استنتاج به مقادیر عددی هم از متداول‌ترین و بهترین غیرفازی‌ساز مورد استفاده در سیستم‌های فازی یعنی روش مرکز ثقل (Rezaei et al, 2015) استفاده شده است. پس از اتمام این مراحل، در صورت اجرا کردن مدل و وارد نمودن هر مقدار عددی از پارامترهای ورودی، مدل قادر به پیش‌بینی ارزش خالص فعلی است. به عنوان مثال، از داده‌های اعتبار سنجی برای ارزیابی مدل فازی پیشنهادی استفاده شده است که نتایج حاصله در بخش ارزیابی عملکرد مدل‌ها بررسی می‌شود.

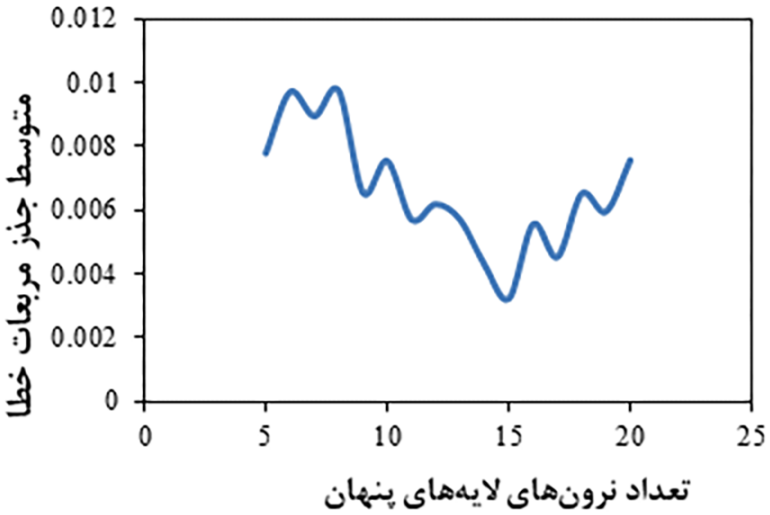
مدل شبکه عصبی

برای تعیین شبکه عصبی بهینه به‌منظور پیش‌بینی ارزش خالص فعلی در تحقیق حاضر از روش سعی و خطا استفاده شده است. بدین منظور، پارامترهای مختلف شبکه از جمله تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نرون‌ها در لایه‌های پنهان، تعداد سیکل‌های آموزش، نرخ یادگیری، تابع آموزش و تابع انتقال را تغییر داده و میزان خطای شبکه‌ها با استفاده از شاخص متوسط جذر مربعات خطا (*RMSE*) اندازه‌گیری شده است. بر این اساس، شبکه با حداقل متوسط جذر مربعات خطا به‌عنوان شبکه بهینه انتخاب می‌شود. شاخص متوسط جذر مربعات خطا با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Tzamos and Sofianos, 2006):

رابطه ۱)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(A_{imeas} - A_{ipred})^2}$$

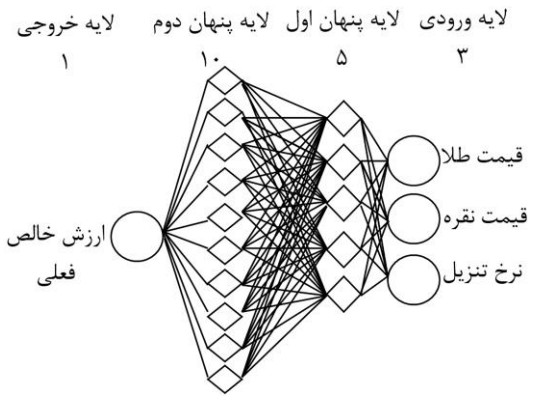
در رابطه فوق، A_{imeas}، A_{ipred} و n به ترتیب iامین عنصر اندازه‌گیری شده، iامین عنصر پیش‌بینی شده و تعداد سری داده است. شکل ۶ میزان خطای متوسط شبکه عصبی برای تعداد نرون‌های مختلف در لایه‌های پنهان را نشان می‌دهد که در آن شبکه‌های با تعداد نرون‌های مختلف برای تعیین تعداد بهینه نرون‌ها با هم مقایسه شده‌اند. همانطور که در شکل فوق هم ملاحظه می‌شود تعداد نرون‌های بهینه در لایه‌های پنهان برابر با ۱۵ نرون است. این تعداد نرون می‌توانند در یک یا دو لایه پنهان قرار گیرند که در مرحله بعد مشخص می‌شود. براساس تعداد بهینه نرون‌ها در لایه‌های پنهان (۱۵ نرون)، متوسط جذر مربعات خطا برای انواع شبکه‌ها شامل یک و دو لایه پنهان و با تغییر دیگر پارامترهای شبکه محاسبه شد که نتایج حاصله در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که در جدول فوق ملاحظه می‌شود، شبکه با ساختار ۳-۵-۱۰-۱ و تابع انتقال لگاریتم سیگموئید دارای کمترین خطا بوده و لذا به‌عنوان شبکه بهینه انتخاب می‌شود (شکل ۷). بر این اساس، اطلاعات کلی شبکه بهینه در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۶: میزان خطای شبکه عصبی با تعداد مختلف نرون در لایه‌های پنهان

جدول ۲: میزان خطای شبکه‌های عصبی با ساختار و توابع انتقال مختلف

شماره	ساختار شبکه	تابع انتقال	متوسط جذر مربعات خطا
۱	۳-۱۵-۱	لگاریتم سیگموئید	۰/۰۹۷
۲	۳-۱۵-۱	تانژانت سیگموئید	۰/۰۹۸
۳	۳-۱۰-۵-۱	لگاریتم سیگموئید	۰/۰۰۵۶
۴	۳-۱۰-۵-۱	تانژانت سیگموئید	۰/۰۰۶۳
۵	۳-۵-۱۰-۱	لگاریتم سیگموئید	۰/۰۰۳۲
۶	۳-۵-۱۰-۱	تانژانت سیگموئید	۰/۰۰۴۴
۷	۳-۷-۸-۱	لگاریتم سیگموئید	۰/۰۰۸۹
۸	۳-۷-۸-۱	تانژانت سیگموئید	۰/۰۰۷۵
۹	۳-۱۲-۳-۱	لگاریتم سیگموئید	۰/۰۰۶۷
۱۰	۳-۳-۱۲-۱	تانژانت سیگموئید	۰/۰۰۷۲

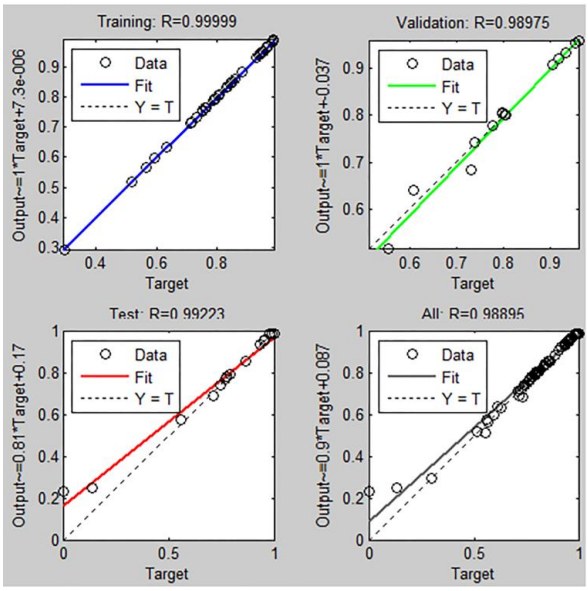


شکل ۷: ساختار شبکه عصبی بهینه برای مدل‌سازی ارزش خالص فعلی

جدول ۳: اطلاعات کلی ساختار شبکه عصبی بهینه برای مدل‌سازی ارزش خالص فعلی

تعداد نرون‌های ورودی	۳
تعداد لایه‌های پنهان	۲
تعداد نرون‌های پنهان	۱۵
تعداد نرون‌های خروجی	۱
تعداد دوره‌های آموزش	۲۰۰
تعداد داده‌های آموزش	۷۵
تعداد داده‌های تست	۱۰
تابع آموزش	لونبرگ- مارک کواردت
تابع انتقال	لگاریتم سیگموئید
نرخ یادگیری	۰/۱
خطای هدف	۰

برای تست و اعتبارسنجی شبکه بهینه، تقریباً از ۲۰٪ داده‌ها (به عنوان داده آزمون) استفاده شده که به صورت تصادفی انتخاب و در آموزش شبکه هم استفاده نشده است. نتایج حاصل از این داده‌ها عملکرد شبکه را نشان داده و ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ارزش خالص فعلی به عنوان عملکرد شبکه عصبی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۸ نتایج حاصل از شبکه عصبی برای مراحل مختلف آموزش، اعتبارسنجی و تست را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی حاصل از شبکه بهینه در تمام مراحل مدل‌سازی بسیار بالا بوده و نشان می‌دهد که شبکه به خوبی آموزش، اعتبارسنجی و تست شده است. بنابراین، می‌توان در ادامه برای پیش‌بینی ارزش خالص فعلی از آن بهره جست.



شکل ۸: عملکرد شبکه عصبی بهینه در مراحل مختلف مدل‌سازی ارزش خالص فعلی

مدل آماری

در این تحقیق از مدل رگرسیون چند متغیره برای پیش-بینی ارتباط بین ارزش خالص فعلی (خروجی) و پارامترهای ورودی شامل قیمت طلا، قیمت نقره و نرخ تنزیل استفاده شده است. براساس داده‌های آموزش، نرم‌افزار آماری SPSS 22 برای تعیین ارتباط فوق مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی آماری در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر ضریب معدنی‌داری حاصله که کمتر از ۰/۰۵ است، می‌توان نتیجه گرفت که هر سه پارمتر ورودی دارای تأثیر معنی‌دار بر پارامتر خروجی (ارزش خالص فعلی) هستند. همچنین، از مقادیر ضریب استاندارد شده (بتا) می‌توان دریافت که قیمت طلا بیشترین و قیمت نقره کمترین تأثیر را بر ارزش خالص فعلی دارند. با توجه به ضرایب حاصل از مدل‌سازی آماری، رابطه آماری رابطه ۲ برای تخمین ارزش خالص فعلی حاصل شده است:

رابطه ۲)

$$NPV = -53.2 - 1095D - 5.5S + 0.522G$$

که در آن، NPV ارزش خالص فعلی (دلار)، D نرخ تنزیل (-)، S قیمت نقره (دلار بر اونس) و G قیمت طلا (دلار بر اونس) است.

جدول ۴: نتایج مدل‌سازی آماری برای تخمین ارزش خالص فعلی

پارامتر	ضریب	ضریب استاندارد شده (بتا)	ضریب معنی‌داری
مقدار ثابت	-۵۳/۲	----	۰
نرخ تنزیل	-۱۰۹۵	-۰/۵۹۵	۰
قیمت نقره	-۵/۵	-۰/۲۲۹	۰/۰۰۶
قیمت طلا	۰/۵۲۲	۱/۱۵۶	۰

ارزیابی عملکرد مدل‌ها

مقایسه نتایج مدل‌های پیشنهادی

برای ارزیابی عملکرد سه مدل پیشنهادی در این تحقیق، نتایج حاصل از آنها با استفاده از سه شاخص ارزیابی عملکرد شامل خطای مطلق (E_a)، خطای نسبی (E_r) و ضریب تصمیم‌گیری (R^2) با همدیگر و با داده‌های واقعی مقایسه شده است. شاخص‌های فوق با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند (Rajabi et al, 2017):

رابطه ۳)

$$E_a = \left| A_{imeas} - A_{ipred} \right|$$

رابطه ۴)

$$E_r = \left(\frac{\left| A_{imeas} - A_{ipred} \right|}{A_{imeas}} \right) \times 100$$

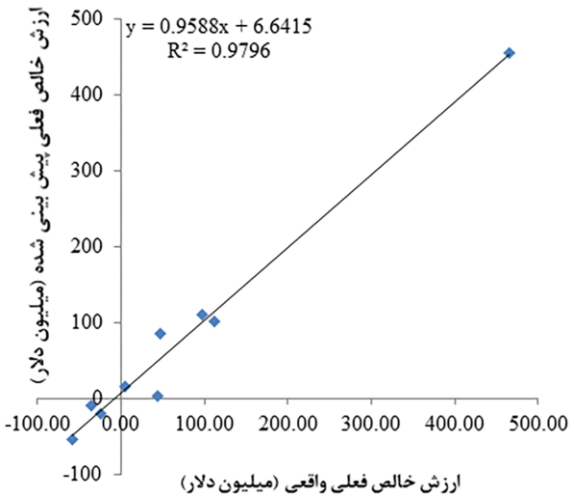
رابطه ۵)

$$R^2 = 100\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(A_{ipred}-\bar{A}_{pred})(A_{imeas}-\bar{A}_{meas})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(A_{ipred}-\bar{A}_{pred})^2\sum_{i=1}^{n}(A_{imeas}-\bar{A}_{meas})^2}}\right]^2$$

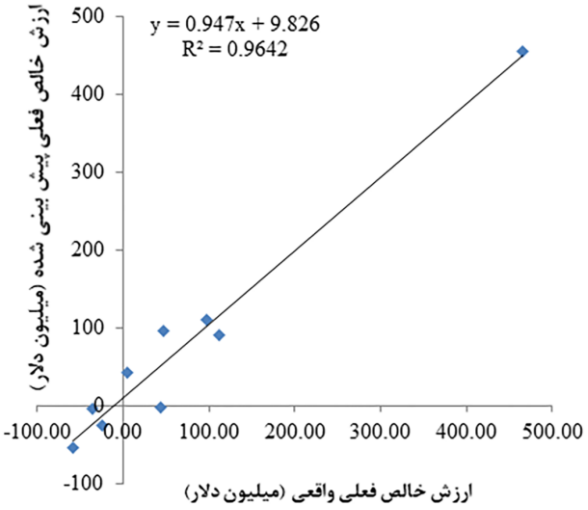
که در آن، $\bar{A}_{meas}$ و $\bar{A}_{pred}$ به ترتیب میانگین مقادیر اندازه-گیری شده و پیش‌بینی شده است. بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. برای ارزیابی مدل‌های پیشنهادی، از ۱۵ سری داده (داده‌های آزمون) استفاده می‌شود که از آنها در آموزش و طراحی مدل‌ها استفاده نشده است. براساس داده-های آزمون، شاخص‌های فوق برای هر سه مدل محاسبه گردید که نتایج به دست آمده در جدول ۵ نشان داده شده است. همچنین، نتایج مقایسه بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده ناشی از مدل‌های فازی، شبکه عصبی و آماری به ترتیب در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که از مقایسه‌های فوق مشاهده می‌شود، عملکرد مدل فازی تا حدودی بهتر از مدل شبکه عصبی و دقت و عملکرد هر دو مدل بسیار بهتر از مدل آماری است. همچنین، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که خروجی حاصل از دو مدل فازی و شبکه عصبی کاملاً نزدیک به مقادیر واقعی است. به‌طور کلی، استفاده از مدل‌های مبتنی بر منطق فازی و سیستم‌های استنتاج فازی در مسائل دارای عدم قطعیت منجر به جواب دقیق‌تری می‌شود. از طرف دیگر، دقت مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی در مسائل قطعی معمولاً بیشتر از دقت مدل‌های فازی است. با این حال، در ارتباط با نتایج نسبتاً بهتر مدل فازی نسبت به مدل عصبی در این تحقیق، ذکر دو نکته ضروری است. اولاً، تفاوت دقت این دو مدل در حد زیادی نیست و تقریباً به هم نزدیک است (ضریب تصمیم‌گیری ۹۷/۹۶ برای مدل فازی در مقابل ضریب تصمیم‌گیری ۹۶/۴۲ برای مدل عصبی). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو مدل فازی و عصبی از قابلیت خوبی در پیش‌بینی ارزش خالص فعلی در پروژه‌های معدنی برخوردار هستند. دوماً، در مدل‌سازی هر دو مدل فازی و عصبی پارامترهای قیمت طلا، قیمت نقره و نرخ تنزیل در نظر گرفته شده است که هر سه پارامتر تا حدودی در دوره‌های زمانی مختلف می‌توانند مشمول عدم قطعیت باشند. بنابراین، دقت نسبتاً بالاتر مدل فازی نسبت به مدل عصبی در این تحقیق (با وجود پارامترهای غیرقطعی) منطقی به‌نظر می‌رسد.

جدول ۵: شاخص‌های عملکرد مدل‌های پیشنهادی برای تخمین ارزش خالص فعلی

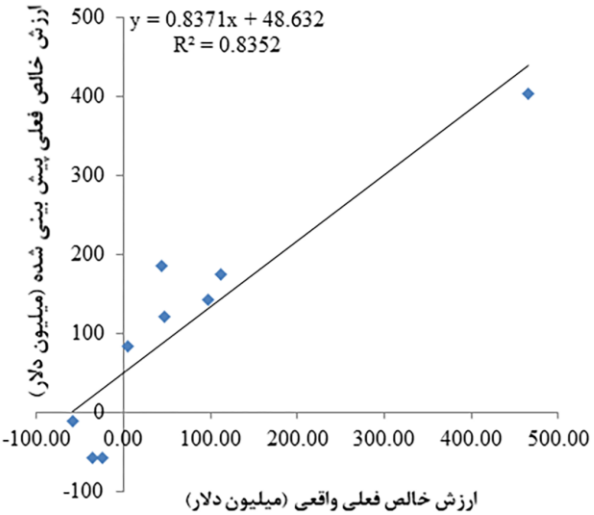
شاخص	مدل فازی	مدل عصبی	مدل آماری
ضریب تصمیم گیری	٪ ۹۷/۹۶	٪ ۹۶/۴۲	٪ ۸۳/۵۲
خطای مطلق (میلیون دلار)	۰/۰۹۵	۰/۱	۰/۴۴
خطای نسبی	٪ ۱/۱۸	٪ ۱/۴۳	٪ ۴/۷۳



شکل ۹: مقایسه بین مقادیر واقعی ارزش خالص فعلی و مقادیر حاصل از مدل فازی



شکل ۱۰: مقایسه بین مقادیر واقعی ارزش خالص فعلی و مقادیر حاصل از مدل عصبی



شکل ۱۱: مقایسه بین مقادیر واقعی ارزش خالص فعلی و مقادیر حاصل از مدل آماری

مقایسه با مطالعات قبلی

با وجود اینکه مطالعات متعددی در زمینه تأثیر ارزش خالص فعلی بر عمر و اقتصاد پروژه‌های معدنی انجام شده است، اما تحقیقات کمتری در زمینه تخمین این پارامتر با استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی صورت گرفته است. تنها تحقیق موجود در این زمینه مربوط به استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین ارزش خالص فعلی در پروژه‌های معدنی می‌باشد که توسط صیادی و همکاران (Sayadi et al, 2014) انجام شده است. مقادیر خطای مطلق و نسبی حاصل از پیش‌بینی ارزش خالص فعلی در مطالعه فوق به ترتیب برابر با ۰/۱ میلیون دلار و ۱/۴٪ به دست آمده است. با مقایسه مقادیر فوق‌الذکر با خطای مطلق و نسبی حاصل از مدل‌های پیشنهادی در این تحقیق (مقادیر جدول ۵)، می‌توان دریافت که خطای مطلق و نسبی حاصل از مدل شبکه عصبی پیشنهادی در این تحقیق تقریباً برابر با خطای مدل شبکه عصبی پیشنهادی توسط صیادی و همکاران (۲۰۱۴) می‌باشد اما خطای مدل فازی پیشنهادی در تحقیق حاضر کمتر از خطای هر دو مدل فوق‌الذکر است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل فازی پیشنهادی در این تحقیق نسبتاً دقیق‌تر از مدل عصبی پیشنهادی توسط صیادی و همکاران (۲۰۱۴) است. همچنین، از مقایسه فوق می‌توان استنباط کرد که استفاده از مدل فازی در مقایسه با مدل شبکه عصبی منجر به نتایج بهتری در تخمین ارزش خالص فعلی در پروژه‌های معدنی می‌شود.

آنالیز حساسیت

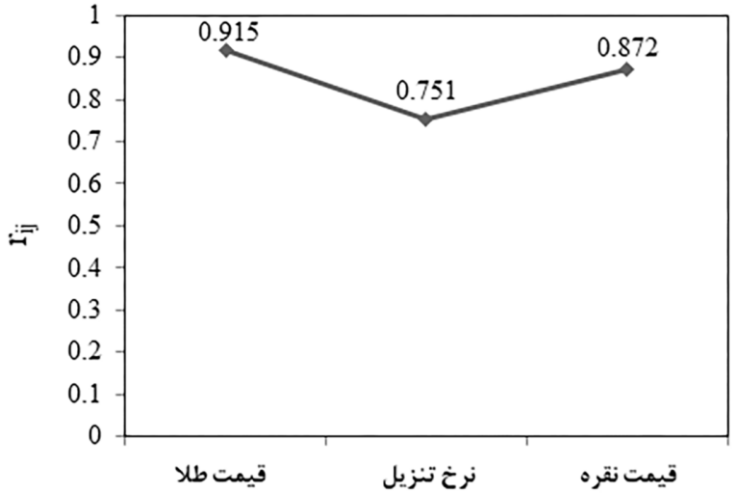
آنالیز حساسیت روشی است که در آن، روابط بین پارامترهای ورودی و خروجی و میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر نتیجه و خروجی یک مدل سنجیده

می‌شود. در این تحقیق، برای انجام آنالیز حساسیت و بررسی ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی از روش میدان کسینوسی استفاده شده است که در آن، تأثیر پارامترهای ورودی بر خروجی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید (Jong and Lee, 2004):

رابطه ۶)

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^{m} x_{ik} x_{jk} \Big/ \sqrt{\sum_{k=1}^{m} x_{ik}^2 \sum_{k=1}^{m} x_{jk}^2}$$

که در آن، r_{ij} مقدار تأثیر هر پارامتر ورودی بر خروجی، x_{ik} ورودی kام و x_{jk} خروجی مدل به ازای مقادیر آن ورودی است. با استفاده از رابطه فوق، تأثیر پارامترهای ورودی بر مقدار ارزش خالص فعلی حاص از مدل فازی (با توجه به دقت بیشتر آن) محاسبه و نتایج به دست آمده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، قیمت طلا بیشترین و نرخ تنزیل کمترین تأثیر را بر ارزش خالص فعلی دارند.



شکل ۱۲: تأثیر پارامترهای ورودی بر ارزش خالص فعلی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از سه مدل سیستم فازی، شبکه عصبی و رگرسیون چند متغیره آماری برای پیش‌بینی ارزش خالص فعلی در پروژه‌های معدنی براساس داده‌های معدن طلای زرشوران استفاده گردید. در مدل فازی پیشنهادی، توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای، موتور استنتاج ممدانی و تابع غیرفازی‌ساز مرکز ثقل به عنوان پارامتراهای بهینه انتخاب شد. همچنین، شبکه عصبی با تابع آموزش پس انتشار خطا از نوع لونبرگ-مارک کواردت، تابع انتقال لگاریتم سیگموئید با ساختار ۳-۵-۱۰-۱ و متوسط جذر مربعات خطای ۰/۰۰۳۲ به عنوان شبکه بهینه انتخاب گردید. به علاوه، یک رابطه آماری چند متغیره خطی برای پیش‌بینی ارزش خالص فعلی ارائه شد. براساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد ضریب تصمیم‌گیری، خطای مطلق و خطای نسبی، نتایج حاصل از مدل‌های پیشنهادی با همدیگر و همچنین با داده‌های واقعی و مطالعات قبلی مقایسه گردید. مقایسه فوق نشان داد که عملکرد دو مدل فازی و عصبی در پیش بینی ارزش خالص فعلی قابل قبول بوده و در مقایسه با مدل آماری تطابق بسیار بهتری با داده‌های واقعی دارند. با این حال، عملکرد سیستم فازی تا حدودی بهتر از شبکه عصبی پیشنهادی در این تحقیق و مطالعات قبلی بوده و نتایج حاصل از آن تطابق بهتری با داده‌های واقعی دارد. در نهایت، آنالیز حساسیت نتایج حاصل از مدل فازی (با توجه به دقت بیشتر آن) با استفاده از روش میدان کسینوسی نشان داد که قیمت طلا دارای بیشترین تأثیر و نرخ تنزیل دارای کمترین تأثیر بر ارزش خالص فعلی است. با در نظر گرفتن نتایج بالا، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های فازی و عصبی پیشنهادی در این تحقیق دارای قابلیت خوبی در تخمین ارزش خالص فعلی بوده و می‌توان از آن‌ها در ارزیابی پروژه-های سرمایه‌گذاری معدنی استفاده نمود.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

References

Banda, W., 2023. A system dynamics model for assessing the impact of fiscal regimes on mining projects, Resources Policy, v. 81, p. 103408.

Califf, R.M., Rasiel, E.B. and Schulman, K.A., 2008. Considerations of net present value in policy making regarding diagnostic and therapeutic technologies, American Heart Journal, v. 156(5), p. 879-885.

Camus, J.P., 2002. Management of mineral resources: Creating value in the mining business, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc, Littleton, 107 p.

Case, K.E. and Fair, R.C., 1989. Principles of microeconomics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 610 p.

Dehghani, H. and Ataee-pour, M., 2012. Determination of the effect of operating cost uncertainty on mining project evaluation, Resources Policy, v. 37(1), p. 109-117.

Dimitrakopoulos, R., Farrelly, C.T. and Godoy, M., 2002. Moving forward from traditional optimization: Grade uncertainty and risk effects in open pit design, Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Mining Technology, v. 111(1), p. 82-88.

Dimitrakopoulos, R., Martinez, L.S. and Ramazan, S., 2007. A maximum upside/minimum downside approach to the traditional optimization of open pit mine design, Journal of Mining Science, v. 43(1), p. 73-82.

Ghannadpour, S.S., Hezarkhani, A. and Roodpeyma, T., 2017. Comparing Neural Networks with Data Mining techniques to simulate Cu; case study: Parkam Kerman. Researches in Earth Sciences, v. 7(4), p. 22-36 (In Persian).

Ghezelbash, R., Maghsoudi, A. and Daviran, M., 2019. Implementation of Fuzzy-AHP and Fuzzy-GAMMA approaches for discovering the prospectivity areas of Au mineralization in Takhte-Soleyman district. Researches in Earth Sciences, v. 10(1), p. 143-162 (In Persian).

Giovanni, F.S., Carlos, C. and Cindy, P., 2017. NPV risk simulation of an open pit gold mine project under the O'Hara cost model by using GAs, International Journal of Mining Science and Technology, v. 27, p. 557-565.

Godoy, M.C. and Dimitrakopoulos, R., 2004. Managing risk and waste mining in long-term production scheduling, SME Transactions, v. 316, p. 43-50.

Hagan, M.T., Demuth, H.B., Beale, M.H. and Jesús, O.D., 1996. Neural network design (2nd Edition), PWS Publishing Co, Boston, MA, USA.

Jennrich, R.I., 1995. An introduction to computational statistics-regression analysis, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.

Jong, Y.H. and Lee, C.I., 2004. Influence of geological conditions on the powder factor for tunnel blasting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 41, p. 533-538.

Kamel, A., Elwageeh, M., Bondua, S. and Elkarmoty, M., 2023. Evaluation of mining projects subjected to economic uncertainties using the Monte Carlo simulation and the binomial tree method: Case study in a phosphate mine in Egypt, Resources Policy, v. 80, p. 103266.

Kavakh, N., 2015. Evaluation of mining investment projects with a new software, Arabian Journal of Geosciences, v. 8(8), p. 6353-6362.

Khoshjavan, S., Mazlumi, M., Rezai, B. and Rezai, M., 2010. Estimation of hardgrove grindability index (HGI) based on the coal chemical properties using artificial neural networks, Oriental Journal of Chemistry, v. 26(4), p. 1271-1280.

Klir, G., 1995. Fuzzy set theory, foundations and applications, Plenum Press, New York.

MacAvoy, P.W., 1988. Explaining metal prices: Economic analysis of markets in the 1980s and 1990s, Kluwer Academic, Boston, 132 p.

Majdi, A. and Rezaei, M., 2013. Application of artificial neural networks for predicting the height of destressed zone above the mined panel in longwall coal mining, 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA, p. 1665-1673.

Mehregan, N. and Yavari, K., 2006. Explaining the capital flow of mine & industry sector in Iran, The Economic Research (Sustainable Growth and Development), v. 5(4), p. 71-88 (In Persian).

Miranda, O., Brandão, L.E. and Lazod, J.L., 2017. A dynamic model for valuing flexible mining exploration projects under uncertainty, Resources Policy, v. 52, p. 393-404.

Oraee, K., Sayadi, A.R. and Tavassoli, S.M.M., 2011. Economic evaluation and sensitivity-risk analysis of Zarshuran gold mine project, SME Annual Meeting February, Denver, Colorado, USA.

Rajabi, M., Rahmannejad, R., Rezaei, M. and Ganjalipour, K., 2017. Evaluation of the maximum horizontal displacement around the power station caverns using artificial neural network, Tunnelling and Underground Space Technology, v. 64, p. 51-60.

Rendu, J.M., 2007. Orebody modeling, mine planning, reserve evaluation and the regulatory environment, Orebody Modeling and Strategic Mine Planning, p. 219-226.

Rezaei, M., 2018. Development of an intelligent model to estimate the height of caving–fracturing zone over the longwall gobs, Neural Computing and Applications, v. 30, p. 2145-2158.

Rezaei, M., Asadizadeh, M., Majdi, A. and Hossaini, M.F., 2015. Prediction of representative

deformation modulus of longwall panel roof rock strata using Mamdani fuzzy system, International Journal of Mining Science and Technology, v. 25, p. 23-30.

Rezaei, M., Hossaini, M.F., Majdi, A. and Najmoddini, I., 2017. Determination of the height of destressed zone above the mined panel: An ANN model, International Journal of mining and Geo-Engineering, v. 51, p. 1-7.

Rezaei, M., Majdi, A. and Monjezi, M., 2014. An intelligent approach to predict unconfined compressive strength of rock surrounding access tunnels in longwall coal mining, Neural Computing and Applications, v. 24, p. 233-241.

Ronyastra, I.M., Saw, L.H. and Low, F.S., 2024. Monte Carlo simulation-based financial risk identification for industrial estate as post-mining land usage in Indonesia, Resources Policy, v. 89, p. 104639.

Samis, M., Davis, G.A., Laughton, D. and Poulin, R., 2006. Valuing uncertain asset cash flows when there are no Options: A real options approach, Resources Policy, v. 30, p. 285-298.

Sayadi, A.R., Tavassoli, S.M.M., Monjezi, M. and Rezaei, M., 2014. Application of neural networks to predict net present value in mining projects, Arabian Journal of Geosciences, v. 7, p. 1067-1072.

Sefidari, E., Zamanzadeh, S.M., Dashti, A., Tavakol, M.H. and Yasmi, S., 2018. Estimation and modeling of the TOC using hybrid neural network and geostatistical approaches in the one of the Iranian fields. Researches in Earth Sciences, v. 9(3), p. 94-109 (In Persian).

Shafiee, S., Topal, E. and Nehring, M., 2009. Adjusted real option valuation to maximize mining project value - A case study using century mine, In: Project Evaluation Conference, p. 125-134.

Sugeno, M., 1993. A fuzzy–logic based approach to qualitative modeling, IEEE Transaction on fuzzy systems, v. 1, p. 7-31.

Taylor, J., Moosa, I. and Cowling, B., 2000. Micro economics, John Wiley & Sons, 508 p.

Tzamos, S. and Sofianos, A.I., 2006. Extending the Q system's prediction of support in tunnels employing fuzzy logic and extra parameters, International Journal of Mining Science and Technology, v. 43, p. 938-949.

Volkmann, S.E., Lehnen, F. and Kukla, P.A., 2019. Estimating the economics of a mining project on seafloor manganese nodules, Mineral Economics, v. 32, p. 287-306.

Wang, L.X., 1997. A course in fuzzy system and control, Prentice Hall.

Wiesemann, W., Kuhn, D. and Rustem, B., 2010. Maximizing the net present value of a project under uncertainty, European Journal of Operational Research, v. 202, p. 356-367.

Yasrebi, A.B., Hezarkhani, A. and Afzal, P., 2017. Application of Present Value-Volume (PV-V) and NPV-Cumulative Total Ore (NPV-CTO) fractal modelling for mining strategy selection, Resources Policy, v. 53, p. 384-393.