

Data-driven Simulation and Forecasting of Option Pricing: A Particle Swarm Optimization Approach

Hedyeh Mir¹, Amirhossein Taebi Noghondari² and Seyyed Abdolmajid Jalaei Esfandabadi³

1. Department of Accounting, Ke.C., Islamic Azad University, Kerman, Iran. **Email:** hedyeh.mir@iau.ac.ir

2. **Corresponding Author** Department of Accounting, Ke.C., Islamic Azad University, Kerman, Iran.

Email: amirtaebi@iau.ac.ir

3. Department of Economic, Faculty of Management and Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Email: jalaei@uk.ac.ir

Article Info

Article Type:

Original Research Article

Article History:

Received: 24 June 2025

Received in revised form: 16 November 2025

Accepted: 1 December 2025

Available online:

Keywords:

Option Contract,
Particle Swarm Optimization (PSO),
Multilayer Perceptron (MLP),
Bid-Ask Price Prediction,
Machine Learning.

JEL Classification:

G13, C53.

A B S T R A C T

Objective: This study aims to design and propose a novel framework for option pricing using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. The framework focuses on separately predicting bid and ask prices to overcome the limitations of traditional analytical models such as the Black–Scholes model and to utilize machine learning capabilities for more accurate modeling of price behavior.

Method: The research is data-driven and based on a machine learning approach. A Multilayer Perceptron (MLP) neural network was designed and trained to predict option prices, while the network weights and linear regression coefficients were optimized using the PSO algorithm to enhance prediction accuracy and minimize error. The dataset includes 840 observations from 42 stocks with traded options during the 2014–2023 period. Model performance was evaluated using the Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE), and coefficient of determination (R^2).

Results: Results indicate that PSO-based optimization significantly reduces prediction errors and improves the model's stability compared to traditional methods.

Conclusion: The proposed PSO–MLP framework serves as an effective tool for option market participants, enabling more accurate, data-driven forecasts and better-informed investment decisions while reducing transaction risk.

Cite this article: Mir, H., Taebi Noghondari, A., & Jalaei Esfandabadi, S.A. (2025). Data-driven simulation and forecasting of option pricing: A particle swarm optimization approach. *Journal of Accounting Knowledge*, *(*)*, *-*.



Publisher: Shahid Bahonar University of Kerman.

©The Author(s).

Introduction

The valuation of option contracts has long been recognized as a central challenge in financial economics, given the complex and nonlinear relationships that characterize the behavior of derivative prices. Traditional analytical models such as the Black–Scholes model rely on simplifying assumptions including constant volatility, frictionless markets, and continuous trading—assumptions that rarely hold in emerging markets. In markets such as Iran’s capital market, where price dynamics are influenced by information asymmetry, low liquidity, investor heterogeneity, and abrupt volatility shifts, analytical pricing models often fail to accurately capture market realities. Consequently, there is a growing need for data-driven modeling approaches capable of adapting to nonlinear patterns and evolving market conditions.

A review of previous studies—both domestic and international—indicates substantial advancements in the use of machine learning and metaheuristic optimization techniques for pricing financial derivatives. International literature highlights the successful application of neural networks, support vector regression, genetic algorithms, and swarm-based optimization techniques in improving prediction accuracy. However, domestic research remains limited, with many studies relying on hypothetical or simulated datasets and lacking comprehensive integration of machine learning with metaheuristic optimization for real-market options. Moreover, few studies have simultaneously modeled bid and ask prices, despite their importance for understanding market microstructure and trading behavior. These gaps highlight the need for a more robust, data-oriented framework tailored to the characteristics of Iran’s option market.

To address these limitations, this study proposes a hybrid framework that integrates a Multilayer Perceptron (MLP) neural network with the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm for option price prediction. In the proposed structure, the MLP model is responsible for learning nonlinear relationships between input variables—including underlying price, strike price, time to maturity, historical volatility, risk-free rate, and expected return—while the PSO algorithm optimizes the network weights and linear regression coefficients to minimize prediction error. This combination leverages the learning capacity of neural networks and the global search capability of PSO, offering an effective approach for improving pricing accuracy. The dataset encompasses 840 observations from 42 option-active stocks over the 2014–2023 period, ensuring that the model is trained on real and representative market behavior.

The primary objective of this research is to develop and empirically evaluate a PSO-enhanced machine learning framework for option pricing based on real transaction data from the Iranian market. The study’s contribution lies in (1) separately forecasting bid and ask prices using a unified optimization-driven architecture, (2) calibrating the network and analytical parameters simultaneously through PSO, and (3) demonstrating the superiority of the hybrid MLP–PSO model compared with conventional analytical methods. The remainder of the article is structured as follows: Section 2 reviews the related literature, Section 3 presents the methodology, Section 4 reports the empirical findings, and Section 5 concludes the study with implications and suggestions for future research.

Method

This study employed a quantitative, empirical, and data-driven research design to develop an enhanced predictive model for option pricing in the Iran capital market. The investigation was based entirely on secondary financial data, and no human or animal subjects were involved; therefore, institutional ethical approval and informed consent were not required.

Research Design

The methodological approach was an observational and analytical modeling study using real historical market data. A hybrid architecture combining a Multilayer Perceptron (MLP) neural network with Particle Swarm Optimization (PSO) was designed to forecast bid and ask option

prices. The predictive performance of the hybrid model was compared with the Black–Scholes analytical model and a standard linear regression model.

Sample Size

The dataset consisted of 840 observations extracted from 42 stocks with active option contracts during the period 2014–2023. All observations were retained after preprocessing for use in training, validation, and testing.

Materials and Outcome Measures

The materials included daily option contract prices, underlying asset prices, strike prices, time to maturity, historical volatility, risk-free rate data, and expected returns. Computational implementation was performed in MATLAB/Python. Model performance was evaluated using MAE, RMSE, R^2 , and Volume-Weighted MAE.

Data-Gathering Procedures

Data were gathered from publicly available market databases (TSETMC, Iran financial market repositories). Outliers were identified and removed using the 3-sigma rule. Missing values were imputed with a moving-average temporal method. All variables were normalized using Min–Max scaling. Historical volatility was calculated from 30-day rolling returns and annualized using the standard $\sqrt{252}$ factor. Option and underlying data were time-aligned before modeling. Because the study used preexisting records, it constitutes a secondary data analysis.

Procedure

The modeling steps were as follows:

- (1) preprocessing, cleaning, and normalization of all variables;
- (2) constructing the MLP with two hidden layers (20 and 10 neurons) using Tansig and Linear activation functions;
- (3) optimizing network weights and regression coefficients with PSO ($w = 0.8$, $c1 = 1.5$, $c2 = 1.5$, 300 particles, 1,000 iterations, 10 repetitions);
- (4) splitting the dataset chronologically into 70% training and 30% testing;
- (5) computing performance metrics for all models;
- (6) benchmarking results against Black–Scholes and linear regression models to determine comparative accuracy.

Ethical Statement

This study used aggregated, publicly available financial data and did not involve human participants or personal information. Accordingly, ethical review board approval and informed consent were not required.

Sampling Procedures

This study did not involve human participants; instead, the sample comprised secondary market data on option contracts traded in the Iran capital market. A purposive sampling approach was applied, selecting all stocks with active option contracts over the 2014–2023 period. Final data consisted of 840 observations from 42 underlying assets.

Data were obtained from official and publicly accessible repositories of the Iran capital market, primarily the TSETMC database. No systematic sampling plan involving participant recruitment was implemented, and no self-selection occurred.

Data collection was conducted entirely online, extracting transaction records, underlying asset prices, and associated parameters (strike price, time-to-maturity, volatility, risk-free rate) from the aforementioned resources. The collection process covered trades executed between March 2014 and September 2023.

No agreements, incentives, or payments were made to participants, as the data were fully public. The study complies with all applicable ethical standards for secondary data analysis.

4/ Data-driven simulation and forecasting of option pricing: A particle swarm optimization approach

Institutional review board and ethics committee approval was not required because no personal or sensitive information was used. Safety monitoring was not applicable.

Sample Size, Power, and Precision

The intended and achieved sample size were identical, consisting of 840 valid observations obtained from 42 underlying assets with active option contracts traded in the Iran capital market during 2014–2023. Because the study employed complete market data available for the defined period, no sampling error or participant attrition occurred.

As the research is based on secondary quantitative data, traditional statistical power analysis was not directly applicable. Instead, model precision and adequacy were evaluated through the magnitude and consistency of error metrics across repeated PSO runs and dataset partitions. Stability of results, reflected by a mean RMSE of 0.0347 with a standard deviation of 0.0010, indicated sufficient sample size and robust model convergence. Consequently, the dataset was deemed large enough to ensure high estimation accuracy and generalizability of results.

Mixed Methods Research

Although the present research integrates multiple analytical and computational techniques, it does not employ a traditional “mixed methods” approach that combines qualitative and quantitative empirical data. Instead, the study uses a **multi-method quantitative design**, integrating both *statistical analysis* and *computational intelligence modeling* to achieve higher precision in option pricing.

The rationale for adopting this integrated quantitative framework is to leverage the strengths of two complementary methodologies:

- (1) the analytical modeling capability of the Black–Scholes framework, which captures theoretical market dynamics; and
- (2) the adaptive nonlinear learning capacity of the MLP–PSO hybrid model, which empirically fits market observations.

This integration allows the generation of new insights into the price-formation mechanism of option contracts—insights that neither traditional econometric methods nor standalone machine learning models could achieve alone. The study is therefore **multi-method quantitative** rather than **qualitative-quantitative mixed methods**, and all data used are secondary market records collected from publicly available sources.

Results

The results of the empirical analysis are presented in this section. The study utilized 840 market observations obtained from 42 option-underlying assets traded on the Tehran Stock Exchange between 2014 and 2023. Data were divided chronologically into training (70%) and test (30%) subsets. The proposed hybrid model was trained ten times using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to optimize the Multilayer Perceptron (MLP) network parameters.

The average Root Mean Square Error (RMSE) across these independent PSO runs was **0.0347**, with a standard deviation of **0.0010**, indicating high robustness and stable convergence of the algorithm. The small dispersion of errors across runs demonstrates that the optimization results are reproducible and not influenced by random initialization.

A comparative assessment of predictive performance among three pricing frameworks—Black–Scholes, Bootstrap, and the proposed MLP–PSO hybrid—revealed meaningful differences. As shown in Table 1.

Table 1. Normalized Mean Squared Error (MSE) of Option Pricing Models
(Values are computed based on normalized and aggregated data for all option contracts)

Model	MSE Normalized Mean Squared Error (Aggregated)	Description
Black–Scholes	0.046	Classical analytical pricing model
Bootstrap	0.044	Statistical benchmark model
Proposed Model (MLP + PSO)	0.031	PSO-optimized neural network model

Source: Research findings

The proposed model achieved the lowest overall Normalized Mean Squared Error (0.031), outperforming the Black–Scholes (0.046) and Bootstrap (0.044) benchmarks. This improvement reflects the model’s capacity to capture nonlinear dependencies between underlying and option prices that classical analytical models fail to represent. Overall, the results confirmed that the PSO-optimized neural network can effectively model and predict option contract values in emerging markets with relatively high accuracy. The model’s stability across multiple training iterations suggests strong generalizability and reliability for application in real market scenarios.

Conclusions

This study introduced a hybrid predictive framework combining the multilayer perceptron (MLP) neural network with the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to improve the accuracy of option pricing in emerging markets. The findings demonstrated that the PSO-optimized neural model consistently achieved lower prediction errors and higher stability than traditional pricing methods such as the Black–Scholes and Bootstrap models. These results emphasize the practical relevance of integrating metaheuristic optimization with data-driven learning techniques, enabling more adaptive and dynamic valuation under volatile market conditions. From a theoretical perspective, the findings validate the capability of hybrid AI models to approximate nonlinear financial relationships that classical analytical models fail to capture. In applied terms, the model offers valuable tools for portfolio managers, institutional investors, and risk analysts to estimate fair option prices and improve hedging strategies. The study also highlights that accurate forecasting can enhance market transparency and contribute to reducing pricing inefficiencies in developing financial systems. Nevertheless, the research leaves room for future extensions—particularly incorporating real-time trading signals, volatility clustering effects, and comparative testing with deep learning architectures such as LSTM or CNN models. Addressing these aspects could expand the robustness and generalizability of the model across different market environments. Ultimately, the results support the broader proposition that merging evolutionary optimization with neural computation constitutes a viable and scalable direction for improving financial decision-support systems.

Author Contributions

Conceptualization: Hedyeh Mir; **Methodology:** Hedyeh Mir., Dr. Amirhossein Taebi Noghondari and Dr. Seyyed Abdolmajid Jalaee Esfandabadi; **Validation:** Dr. Amirhossein Taebi Noghondari and Dr. Seyyed Abdolmajid Jalaee Esfandabadi; **Formal Analysis:** Hedyeh Mir; **Writing—Original Draft Preparation:** Hedyeh Mir; **Writing—Review and Editing:** Dr. Amirhossein Taebi Noghondari and Dr. Seyyed Abdolmajid Jalaee Esfandabadi; **Supervision:** Dr. Amirhossein Taebi Noghondari and Dr. Seyyed Abdolmajid Jalaee Esfandabadi; **Project Administration:** Dr. Amirhossein Taebi Noghondari. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study were obtained from the official databases of the Tehran Stock Exchange and the TSETMC (Tehran Securities Exchange Technology Management Company). Due to licensing restrictions and confidentiality agreements, these

6/ Data-driven simulation and forecasting of option pricing: A particle swarm optimization approach

data are not publicly available. However, the processed datasets and model outputs that support the conclusions of this article are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors received no specific support and wish to thank all individuals who provided general guidance and feedback during the development of this research.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

شبیه‌سازی و پیش‌بینی داده‌محور ارزش‌گذاری قرارداد اختیار معامله: رهیافت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

هدیه میر^۱، امیر حسین تائبی نقندری^{۲*} و سید عبدالمجید جلائی اسفندآبادی^۳

۱. گروه حسابداری، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران. hedyeh.mir@iau.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه حسابداری، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران. amirtaebi@iau.ac.ir
۳. گروه اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. jalace@uk.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: هدف این پژوهش طراحی و ارائه چهارچوبی نوین برای ارزش‌گذاری قراردادهای اختیار معامله با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) است. در این چهارچوب، تمرکز بر پیش‌بینی جداگانه قیمت‌های پیشنهادی خرید و فروش قرار گرفت تا محدودیت مدل‌های تحلیلی سنتی مانند بلک-شولز برطرف و از ظرفیت روش‌های یادگیری ماشین برای مدل‌سازی دقیق‌تر رفتار قیمتی استفاده شود.

روش: پژوهش حاضر داده‌محور و مبتنی بر رویکرد یادگیری ماشین است. در این راستا، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) برای پیش‌بینی قیمت اختیار معامله طراحی و آموزش داده شد و وزن‌های شبکه به همراه ضرایب مدل رگرسیون خطی توسط الگوریتم PSO تنظیم گردیدند. داده‌ها شامل ۸۴۰ مشاهده از ۴۲ سهم دارای سابقه اختیار معامله در دوره زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ بود و شاخص‌های MAE، RMSE و R^2 برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها به کار رفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌ها با الگوریتم PSO موجب کاهش معنادار خطای پیش‌بینی و افزایش ثبات عملکرد در مقایسه با مدل‌های سنتی شد.

نتیجه‌گیری: چارچوب پیشنهادی می‌تواند ابزار کارآمدی برای فعالان بازار اختیار معامله محسوب شود تا با اتکا به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر، تصمیم‌های بهینه‌تری اتخاذ کرده و ریسک معاملات خود را کاهش دهند.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی.

تاریخ‌ها:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱۰

تاریخ انتشار برخط:

واژه‌های کلیدی:

قرارداد اختیار معامله، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، پیش‌بینی قیمت اختیار، یادگیری ماشین.

طبقه‌بندی JEL:

C53, G13.

استناد: میر، هدیه؛ تائبی نقندری، امیرحسین و جلائی اسفندآبادی، سید عبدالمجید (۱۴۰۵). شبیه‌سازی و پیش‌بینی داده‌محور ارزش‌گذاری قرارداد اختیار معامله: رهیافت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات. *مجله دانش حسابداری*، (*). <https://doi.org/10.29253/2008-8914>.



ناشر: دانشگاه شهید باهنر کرمان.

© نویسنده/ نویسندگان.

۱- مقدمه

قراردادهای اختیار معامله به‌عنوان ابزارهای مشتقه، نقش مهمی در افزایش عمق، نقدشوندگی و کارایی بازارهای مالی ایفا می‌کنند. این ابزارها با فراهم‌سازی امکان پوشش ریسک، سفته‌بازی و کشف قیمت، به انتقال بهینه ریسک و بهبود عملکرد بازار کمک می‌نمایند. در این میان، دقت در قیمت‌گذاری این قراردادها برای تصمیم‌گیری آگاهانه سرمایه‌گذاران، معامله‌گران و بازارسازان از اهمیت حیاتی برخوردار است. مدل‌های ارزش‌گذاری، نظیر مدل **بلک-شولز**^۱ (۱۹۷۳)، علی‌رغم کاربرد گسترده، بر مفروضاتی مانند نوسان‌پذیری ثابت، بازارهای بدون اصطکاک، و توزیع لگاریتمی نرمال بازده دارایی‌ها استوارند؛ مفروضاتی که در عمل و به‌ویژه در بازارهای نوظهور، به‌سختی تحقق می‌یابند (باکشی، کائو و چن، ۱۹۹۷^۲). یکی از مهم‌ترین کاستی‌های مدل‌های سنتی، بی‌توجهی به تفکیک میان قیمت‌های پیشنهادی خرید و درخواستی فروش است؛ در حالی که این تفکیک می‌تواند حاوی اطلاعات ارزشمند درباره ساختار بازار، میزان نقدشوندگی، ریسک‌های معاملاتی و رفتارهای اطلاعاتی معامله‌گران باشد (بولن و والی، ۲۰۰۴^۳) مطالعات جدید نشان داده‌اند که اختلاف قیمت خرید و فروش، افزون بر آنکه شاخصی از وضعیت نقدینگی بازار است، می‌تواند در پیش‌بینی نوسانات بازار نیز نقش داشته باشد (ناگل، ۲۰۱۲^۴ و بنوس و زایکس، ۲۰۱۶^۵).

در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی روی ارزش‌گذاری این اوراق انجام شده است. از دهه ۱۹۷۰ فیشربلک، رابرت مرتون و میرون شولز روشی نوآورانه برای تعیین قیمت اختیار معامله پیشنهاد کردند امروزه به‌عنوان الگوی قیمت‌گذاری بلک، شولز و مرتون شناخته می‌شود. این مدل پارامترهایی مانند قیمت توافقی، نوسانات دارایی پایه، زمان تا سررسید و نرخ بهره بدون ریسک را در نظر می‌گیرد. با وجود این، مشکلاتی مانند عدم تطابق مدل با توزیع آماری قیمت سهام، عدم وجود هزینه‌های معاملاتی و فرضیات بازار کامل مطرح است. همچنین، فعالان بازار مالی همواره تلاش می‌کنند تا فرضیات غیرواقعی مدل را کاهش دهند. یکی از فرضیات مهم این مدل، نوسان ثابت دارایی پایه است که در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌های پارامتریک، نحوه مدل‌سازی نوسان‌ها و فرایند تصادفی پیوسته یا فرایند انتشار پرش نقش مهمی در موفقیت آنها دارد ولی به دلیل پیچیدگی‌های ریاضی، استفاده این مدل‌ها توسط فعالان بازار محدود است. در چنین شرایطی، تفکیک مدل‌سازی قیمت‌های خرید و فروش به‌جای فرض یک قیمت تعادلی واحد، می‌تواند نمایی واقعی‌تر از فرایند کشف قیمت ارائه کند. با گسترش استفاده از روش‌های داده‌محور در علوم مالی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی، به دلیل توانایی در تقریب توابع پیچیده و روابط غیرخطی، جایگاه ویژه‌ای در پیش‌بینی قیمت دارایی‌ها یافته‌اند (هاچینسون، لو و پوجیو، ۱۹۹۴^۶). با این حال، عملکرد مطلوب این مدل‌ها در گرو تنظیم دقیق ابرپارامترهایی چون وزن‌ها، نرخ یادگیری و ساختار لایه‌هاست. برای حل این چالش، پژوهشگران رو به تلفیق شبکه‌های عصبی با الگوریتم‌های فراابتکاری آورده‌اند. در این میان، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به دلیل سادگی ساختاری، همگرایی سریع و قابلیت گریز از بهینه‌های محلی، در بهینه‌سازی مسائل مالی توجه فراوانی جلب کرده است (کندی و ابرهارت، ۱۹۹۵^۷ و چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۱۹^۸). در حوزه‌ی کاربرد داده‌های حسابداری در مدل‌های پیش‌بینی اقتصادی، نقدی و همکاران (۱۳۹۸) نشان دادند ادغام اطلاعات حسابداری با روش‌های ترکیبی مبتنی بر هوش

^۱ Black & Scholes,^۲ Bakshi, Cao & Chen^۳ Bollen & Whaley^۴ Nagel^۵ Benos & Zikes^۶ Hutchinson, Lo & Poggio^۷ Kennedy & Eberhart^۸ Chakraborty et al

مصنوعی (از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری) سبب بهبود معنادار دقت مدل‌های پیش‌بینی کلان مانند تورم می‌شود. اگرچه ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی مالی نتایج موفقی به همراه داشته است، عمده پژوهش‌ها صرفاً بر برآورد یک قیمت نظری واحد برای قراردادهای اختیار تمرکز داشته‌اند (چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۱)، درحالی‌که بررسی مجزای قیمت‌های پیشنهادی خریدوفروش، به‌ویژه در بازارهای نوظهور، می‌تواند درک دقیق‌تری از رفتار بازار فراهم آورد.

عدم اطمینان نسبت به آینده و نوسانات بازارهای مالی باعث شده است که فعالان اقتصادی با مشکلات جدی مواجه شوند و حتی خروج سرمایه و کاهش رقابت در بازارها را به همراه داشته باشد. به همین دلیل، ابزارهای مالی مانند اوراق اختیار معامله طراحی شده‌اند تا به‌عنوان راهکاری برای پاسخ به مسائل بازار عمل کنند (کیمیاگری و همکاران، ۱۳۹۶). این اوراق با ویژگی‌های اصلی خود که شامل اهرم مالی و مدیریت ریسک است، به سرمایه‌گذاران امکان می‌دهد تا با سرمایه کمتری معامله کنند و ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش دهند، ضمن اینکه هزینه خرید اختیار معامله نیز کمتر است. علاوه بر این، اختیار معامله سهام فرصت کسب درآمد را برای سرمایه‌گذار فراهم می‌کند بدون اینکه نیاز به تقسیم سود داشته باشد و می‌تواند محدودیت‌های فروش استقرای در بازار ایران را پوشش دهد. همچنین، فرد می‌تواند بدون داشتن سهام پایه، از نوسانات قیمت این اوراق به نفع خود بهره‌مند شود.

بازار اختیار معامله ایران به‌عنوان بازاری نوپا با ویژگی‌هایی چون نقدشوندگی محدود و نوسانات بالا، زمینه‌ای مناسب برای آزمون مدل‌های پیشرفته فراهم کرده است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از ترکیب شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، مدلی نوین برای پیش‌بینی جداگانه قیمت‌های پیشنهادی خریدوفروش طراحی شده است. این مدل ضمن لحاظ ویژگی‌های خاص بازار ایران، تلاش دارد تا دقت پیش‌بینی را ارتقا داده و نمایی واقع‌گرایانه‌تر از فرایند قیمت‌گذاری ارائه کند. هدف این پژوهش پاسخ به این سؤال است که تعیین قیمت فروش و خرید در قراردادهای اختیار معامله و بهینه‌سازی مدل با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چگونه است؟ برای پاسخ به سؤال پژوهش چهارچوب مقاله به این صورت است که پس از مقدمه، مبانی نظری و پیشینه پژوهش توضیح داده شده و به همین ترتیب در بخش بعدی برآورد مدل تحلیل و بررسی شده است. در پایان به نتیجه‌گیری و پیشنهادها پرداخته خواهد شد.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱- مبانی نظری

پس از ورود هر سرمایه‌گذار به بازار اوراق اختیار معامله، مهم‌ترین سؤالی که در پی یافتن پاسخ آن خواهد بود، چگونگی ارزش‌گذاری این اوراق است. در طول سالیان گذشته، مدل‌های گوناگونی برای تعیین قیمت اوراق اختیار معامله مطرح شده است که عبارت‌اند از: مدل بلک، شولز و مرتون، درخت دوجمله‌ای. از سایر مدل‌های تکمیلی نیز می‌توان به روش شبیه‌سازی مونت کارلو، مدل انتشار پرش، روش تفاضلات متناهی و.. اشاره کرد. از دیگر روش‌های ارزش‌گذاری اوراق اختیار معامله، می‌توان الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و الگوریتم ازدحام ذرات را نام برد. یادگیری ماشین، امروزه در صنایع و کسب و کارهای زیادی استفاده می‌شود. با تأثیرهای مهم یادگیری ماشین در حوزه دانش مالی، امروزه شاهد کم‌رنگ شدن ساختارهای سنتی در این حوزه هستیم. قرارداد

اختیار معامله^۱ یکی از مهم‌ترین ابزارهای مالی مشتقه است که به دارنده آن حق خرید یا فروش دارایی پایه را با قیمت مشخصی (قیمت اعمال) در یا قبل از تاریخ معین (تاریخ سررسید) می‌دهد، بدون اینکه دارنده ملزم به انجام معامله باشد (هال^۲، ۲۰۱۸). این ابزارها به سرمایه‌گذاران امکان مدیریت ریسک، سفته‌بازی و آربیتراژ را می‌دهند و نقش مهمی در بهبود نقدشوندگی و کارایی بازارهای مالی ایفا می‌کنند (بلک و شولز، ۱۹۷۳). از منظر نظری، قیمت‌گذاری اختیار معامله عمدتاً بر پایه فرضیه‌ها نظریه بازارهای کارا و مدل‌های احتمالاتی بنا شده است. مدل **بلک-شولز** (۱۹۷۳) که مبتنی بر حرکت براونی هندسی، نرخ بهره بدون ریسک و نوسان ثابت است، نخستین مدل استاندارد و مشهور برای قیمت‌گذاری اختیار معامله اروپایی به شمار می‌رود. این مدل با هدف یافتن قیمت منصفانه قرارداد با استفاده از فرض پوشش ریسک و عدم وجود فرصت‌های آربیتراژ طراحی شده است (مرتین^۳، ۱۹۷۳). علاوه بر این مدل، مدل‌های **مرتین** (۱۹۷۳)، نوسانات تصادفی هستون (هستون، ۱۹۹۳) و مدل‌های پرش (مرتین، ۱۹۷۶) توسعه یافته‌اند تا محدودیت‌های مدل اولیه را رفع کنند. نظریه و مدل‌های قیمت‌گذاری اختیار معامله از دهه ۱۹۷۰ و با انتشار مدل **بلک-شولز** (۱۹۷۳) و مدل **مرتین** (۱۹۷۳) شکل گرفت. مدل **بلک-شولز** که بر فرض بازارهای کارا، حرکت براونی هندسی با نوسان ثابت و نرخ بهره بدون ریسک استوار است، به سرعت به عنوان استاندارد جهانی قیمت‌گذاری اختیار معامله پذیرفته شد (بلک و شولز، ۱۹۷۳). با این حال، این مدل دارای محدودیت‌هایی است؛ از جمله فرض نوسان ثابت، بازار بدون اصطکاک، نبود هزینه معامله و توزیع لگاریتمی بازده‌ها که در بازارهای واقعی محقق نمی‌شوند (باکشی، کائو و جن، ۱۹۹۷).

مدل‌های قیمت‌گذاری اختیار معامله در ابتدا با مدل‌های تحلیلی کلاسیکی مانند **بلک-شولز** و **مرتین** شکل گرفتند که با استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی و فرض نوسان‌پذیری ثابت و بازارهای بدون اصطکاک، قیمت اختیار معامله را محاسبه می‌کردند (بلک و شولز، ۱۹۷۳ و مرتین، ۱۹۷۳). با این حال، این مدل‌ها محدودیت‌هایی دارند؛ مانند فرض نوسان ثابت که در واقعیت بازار متغیر است (باکشی و همکاران، ۱۹۹۷)، نادیده گرفتن هزینه‌های معاملاتی و شکاف قیمت خرید و فروش که نقش مهمی در بازار دارند (بولن و ویلی، ۲۰۰۴) و ناتوانی در مدل‌سازی پیچیدگی‌ها و رفتار غیرخطی بازار (فیش و کراوس، ۲۰۱۸). به‌طور کلی، مدل‌هایی معرفی شدند که نوسانات تصادفی یا پرش‌های قیمت را در نظر می‌گیرند تا واقعیت بازار بهتر شبیه‌سازی شود (هستون، ۱۹۹۳ و مرتین، ۱۹۷۶) اما مشکلاتی همچون پیچیدگی محاسباتی و نیاز به پارامترهای زیاد، کاربردشان را محدود ساخته است (کریستوفرسن، ۲۰۱۲).

با پیشرفت تحلیل داده‌ها، مدل‌های داده‌محور مبتنی بر هوش مصنوعی، مانند شبکه‌های عصبی چندلایه، به دلیل توانایی‌شان در کشف الگوهای پیچیده و غیرخطی، وارد عرصه شدند (هاچینسون و همکاران، ۱۹۹۴). موفقیت این مدل‌ها البته تا حد زیادی وابسته به بهینه‌سازی دقیق پارامترهای شبکه است؛ در این راستا، الگوریتم‌های فراابتکاری همچون الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات که از رفتار جمعی موجودات زنده الهام گرفته‌اند، توانسته‌اند به عنوان روش‌های کارآمد در بهینه‌سازی مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرند (کندی و ابرهارت، ۱۹۹۵). این الگوریتم‌ها علاوه بر سرعت همگرایی و سادگی پیاده‌سازی، قابلیت فرار از بهینه‌های محلی را دارند که اهمیت آن در مدل‌سازی مالی بسیار زیاد است (چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۱۹).

¹ Option Contract

² Hull

³ Merton

ضرورت استفاده از مدل‌های ترکیبی هوش مصنوعی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری خصوصاً در بازارهای نوظهوری که با ویژگی‌هایی چون نوسانات بالا، شکاف قیمت خرید و فروش و ناکارآمدی‌های ساختاری مواجه‌اند، بیشتر احساس می‌شود. این رویکردها می‌توانند دقت پیش‌بینی را ارتقا داده و ابزار بهتری برای تصمیم‌گیری فعالان بازار فراهم کنند (ناگل، ۲۰۱۲ و بیکارت و همکاران، ۲۰۲۲).

۲-۱-۱- مدل بلک شولز

در سال ۱۹۷۳، فیشر بلک، مایرون شولز و رابرت مرتون مدل ارزش‌گذاری اوراق اختیار معامله را ارائه دادند که به مدل بلک-شولز و مرتون مشهور است و هنوز هم کاربرد گسترده‌ای دارد. این مدل با طراحی نسبتاً ساده و فرمولی واضح، امکان ارزش‌گذاری اوراق اختیار معامله را برای فعالان دنیای مالی فراهم ساخت و تأثیر زیادی بر قیمت‌گذاری آن‌ها گذاشت.

این پژوهشگران پیشنهاد کردند که با تشکیل یک سبد مالی بدون آریترآژ می‌توان ارزش اوراق اختیار معامله را مشخص کرد؛ بدین معنا که اگر کسی در بازار بتواند اختیار را با سهام یا ورقه قرضه جایگزین کند، همان عایدی را بدون ریسک کسب خواهد کرد. آن‌ها با حذف عوامل نوسان‌پذیر و استفاده از حرکت براونی هندسی، توانستند رابطه مشهور بلک، شولز و مرتون را استخراج کنند (نسی، ملکی و رضاییان، ۱۳۹۵). استانداردترین مدل برای معامله‌گران اختیار معامله به شمار می‌رود و در آن متغیرهایی نظیر قیمت سهم، قیمت اعمال، زمان باقی‌مانده تا سررسید، نرخ بهره بدون ریسک و انحراف معیار بازدهی لگاریتمی سهم (نوسان)، وارد فرمول ارزش‌گذاری می‌شوند. معامله‌گران قیمت حاصل از این مدل را معیار خرید و فروش خود قرار می‌دهند و گاهی در شرایط خاص، بالاتر یا پایین‌تر نسبت به فرمول معامله می‌کنند (وو، ۲۰۱۹).

فرمول قیمت‌گذاری قرارداد اختیار خرید:

$$c = SN(d_1) - Ke^{-rt}N(d_2) \quad (1)$$

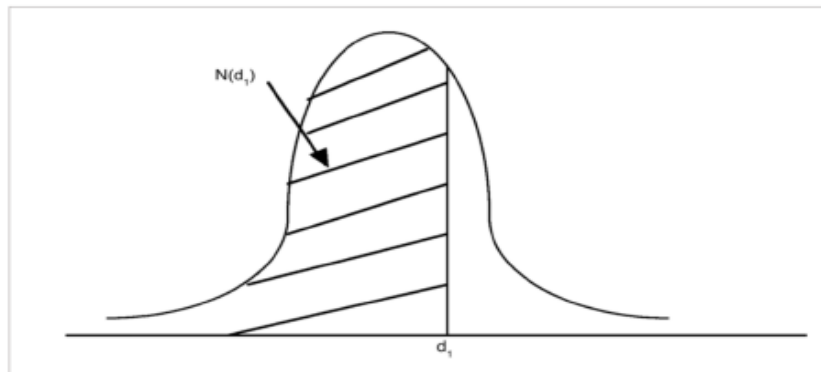
فرمول جهت قیمت‌گذاری قرارداد اختیار فروش اروپایی عبارت است از:

$$P = ke^{-rt}N(-d_2) - SN(-d_1) \quad (2)$$

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + \left(r + \frac{\delta^2}{2}\right)(T)}{\delta\sqrt{T}} \quad (3)$$

$$d_2 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + \left(r - \frac{\delta^2}{2}\right)(T)}{\delta\sqrt{T}} = d_1 - \delta\sqrt{T} \quad (4)$$

جمله Ke^{-rt} قیمت توافقی تنزیل شده برای رسیدن به ارزش فعلی آن است. در این فرمول $N(d_1)$ و $N(d_2)$ فاکتورهای احتمال هستند. $N(d_2)$ احتمال برابر و یا بیشتر شدن قیمت سهم از قیمت توافقی در زمان منقضی شدن اختیار معامله است. به عبارت دیگر $N(d_2)$ احتمال اعمال شدن اختیار معامله است. بنابراین $Ke^{-rt}N(d_2)$ نشان‌دهنده احتمال اعمال اختیار معامله ضربدر ارزش فعلی قیمت توافقی است (وو، ۲۰۱۹).



شکل ۱. توزیع نرمال تجمعی

$N(d_1)$ محدوده زیر نمودار زنگوله ای شکل تا مرز d_1 را در بر می گیرد. جمله $S_t N(d_1)$ قیمت موردانتظار سهام در یک دنیای ریسک خنثی در زمان T است که اگر قیمت سهم از قیمت توافقی کمتر باشد، این ارزش برابر با صفر خواهد بود. قیمت توافقی تنها در صورتی پرداخت خواهد شد که قیمت سهم از قیمت توافقی بیشتر باشد (هال، ۲۰۱۸). به طور کلی جمله $S_t N(d_1)$ ، میزان بازدهی به دست آمده از اعمال اختیار معامله را نشان می‌دهد و جمله $Ke^{-rt} N(d_2)$ نیز نشان‌دهنده هزینه اعمال اختیار معامله است.

از محدودیت‌های اصلی مدل‌های بلک، شولز و مرتون، می‌توان به فرض صفر بودن مالیات و هزینه‌های معاملاتی، فرض پیوسته و بدون پرش بودن فرایند حرکت قیمت دارایی پایه، و عدم در نظر گرفتن اثر اهرمی و خوشه‌ای پیروی حرکت سهام از توزیع لگ نرمال اشاره کرد. همچنین، این مدل‌ها نرخ سود بدون ریسک ثابت و نوسان‌های اشاره کردنی و پیمانی را فرض می‌کنند که در عمل کامل نیستند. با توجه به این محدودیت‌ها، لازم است راهکارهایی برای بهبود و توسعه این مدل‌ها دنبال شود تا آن‌ها را با واقعیت‌های بازار هماهنگ‌تر و سازگارتر کرد. ظهور مفاهیم نوینی مانند یادگیری ماشین و استفاده از الگوریتم‌هایی همچون شبکه‌های عصبی، امکان بهینه‌تر کردن قیمت‌گذاری اختیار معامله‌ها را فراهم آورده است. یادگیری ماشین به این صورت عمل می‌کند که فرضیات غیرعملی مدل‌های سنتی بلک، شولز و کالیبراسیون ناپایدار آن‌ها کنار گذاشته شده و با فرضیات کمتر و واقع‌بینانه‌تر به حل مسائل جزئی‌تر می‌پردازد. افزون بر این، **اسدی و نقدی (۱۳۹۷)** نیز در مجله دانش حسابداری با استفاده از مدل‌های یادگیری هوشمند مبتنی بر داده‌های حسابداری نشان دادند که روش‌های فراابتکاری می‌توانند دقت پیش‌بینی متغیرهای اقتصادی را نسبت به مدل‌های کلاسیک به شکل معناداری افزایش دهند. در ادامه، به بررسی نقش یادگیری ماشین و الگوریتم ازدحام ذرات در این زمینه خواهیم پرداخت که ضمن رفع نواقص مدل‌های قبلی، چارچوبی کارا برای قیمت‌گذاری دقیق‌تر ارائه می‌دهد.

۲-۲- پیشینه پژوهش

۲-۲-۱- پژوهش‌های خارجی

هناروار و همکاران (۲۰۲۰) الگوریتم PSO را برای حل مسائل قیمت‌گذاری و زمان‌بندی در زنجیره تأمین دو کاناله با رقابت قیمت به کار بردند. این الگوریتم توانست راهکارهای بهینه‌ای نزدیک به بهترین جواب واقعی ارائه دهد و از نظر کارایی نسبت به الگوریتم‌های مشابه بهتر عمل کرد. کاربرد این روش در بهینه‌سازی مسائل مالی، از جمله قیمت‌گذاری اختیار معامله، قابل تعمیم است. مطالعه اهمیت PSO را در مدیریت مسائل مالی و اقتصادی تأکید کرد.

هی، هوانگ، ما، لو و وو (۲۰۱۴) الگوریتم PSO را با افزودن سازوکار جهش تصادفی بهبود دادند. این تغییر به جلوگیری از گیر افتادن در بهینه‌های محلی کمک کرد و دقت پیش‌بینی قیمت اختیار معامله را افزایش داد. این نوآوری منجر به افزایش کارایی و تعادل بهتر بین جستجو و بهره‌برداری در الگوریتم شد. بنابراین الگوریتم اصلاح شده عملکرد پیشرفته‌تری در مدل‌های مالی پیچیده داشت.

شارما، ثولاسیرام و ثولاسیرامان (۲۰۱۳) الگوریتم PSO نرمال‌شده را بر روی واحد پردازش گرافیکی (GPU) پیاده‌سازی کردند که موجب افزایش سرعت و دقت در قیمت‌گذاری اختیارهای پیچیده شد. این الگوریتم قابلیت پردازش بلادرنگ را دارد و برای کاربردهای مالی با حجم داده بزرگ بسیار مناسب است. استفاده از سخت‌افزار موازی، گامی مهم در توسعه کاربردهای عملی الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. نتایج بیانگر توانمندی بالا در محیط‌های مالی است.

هی و همکاران (۲۰۱۴) نسخه اصلاح شده PSO را با بهینه‌سازی جهشی معرفی کردند که دقت بیشتری در مدل‌های غیرخطی مسائل مالی پیچیده نشان داد. این نسخه اصلاحی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های سنتی PSO داشت. افزایش دقت پیش‌بینی و حل مسائل مالی از دستاوردهای این پژوهش است. این الگوریتم قابلیت کاربرد گسترده‌تری در مالی یافت.

پراسین، جها و تولاسیرامان (۲۰۱۰) نسخه موازی‌شده PSO را برای قیمت‌گذاری اختیار معامله اروپایی ارائه دادند. این نسخه سرعت محاسباتی تا ۲۰ برابر افزایش یافته و دقتی مشابه مدل بلک-شولز داشت. بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندپردازنده‌ای، موجب افزایش کارایی پردازش داده‌های مالی شد. این مطالعه گامی اساسی در توسعه الگوریتم‌های موازی در مالی محسوب می‌شود.

جها، کومار، پراسین و تولاسیرامان (۲۰۰۹) کاربرد PSO را در تخمین پارامترهای مدل بلک-شولز بررسی کردند. این الگوریتم پارامترهای کلیدی را با دقت بالاتر و زمان اجرای کمتر تخمین زد. عملکرد بهبود یافته نسبت به روش‌های تحلیلی نشان از کارایی چشمگیر PSO داشت. این تحقیق نقطه عطفی در کاربرد PSO برای قیمت‌گذاری اختیار معامله بود.

لی، لی، شیم و جون (۲۰۰۷) الگوریتم PSO باینری را برای قیمت‌گذاری اختیارات اروپایی توسعه دادند. نتایج نشان داد این الگوریتم نسبت به روش‌های عددی سنتی پایداری و دقت بیشتری دارد. توانمندی نسخه باینری PSO در بهینه‌سازی مسائل گسسته مالی را اثبات کرد. این مطالعه پیشرو در کاربرد PSO در داده‌های گسسته قیمت‌گذاری است.

۲-۲-۲ پژوهش‌های داخلی

در پژوهش‌های اخیر، پیمانی فروشانی و همکاران (۱۴۰۳) ارزش‌گذاری اوراق اختیار معامله در بورس اوراق بهادار تهران را با استفاده از شبکه‌های عصبی ماژولار بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدل شبکه‌های عصبی توسعه یافته با در نظر گرفتن نوسان‌های ضمنی در ارزش‌گذاری اوراق اختیار خرید، کمترین خطا براساس معیار (RMSPE) را در تمام موقعیت‌های پولی و دوره‌های زمانی ارائه کرده است. همچنین، عملکرد مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه توسعه یافته با نوسان‌های ضمنی اندکی بهتر از مدل ماژولار بوده است.

سینی و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی و مقایسه خطای قیمت‌گذاری دو مدل بارلزسونر و باکستین-هاویسون در بازار اختیار معامله شاخص S&P500 پرداختند. در آزمون شبکه‌های عصبی، پرسپترون چندلایه ۶۰ درصد داده‌های آزمون و

شبکه عصبی احتمالی تمامی داده‌ها را به گروه مدل بارلز-سونر تخصیص دادند. در محاسبه اختلاف مدل‌ها با داده‌های واقعی، ۸۰ درصد داده‌ها اختلاف کمتری با مدل بارلز-سونر داشتند و بنابراین قیمت واقعی اختیار معامله در بازار به مدل بارلز-سونر نزدیک‌تر بود. این نشان می‌دهد مدل بارلز-سونر خطای کمتری نسبت به مدل باکستین-هاویسون دارد.

سعدایی جهرمی (۱۴۰۱) در پژوهشی دیگر به ارزش‌گذاری اختیار معامله با استفاده از یادگیری ماشین در بازار بورس اوراق بهادار تهران پرداخته است. او در این پژوهش از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند شبکه عصبی، رگرسیون بردار پشتیبان و LightGBM برای پیش‌بینی قیمت اختیار معامله استفاده کرده است. این پژوهش در نهایت به این نتیجه دست یافت که خطای پیش‌بینی در روش‌های یادگیری ماشین نسبت به مدل بلک-شولز مرتون کمتر است و در این بین شبکه عصبی کمترین میزان خطا را در پیش‌بینی قیمت اختیار معامله دارد.

با مرور پژوهش‌های صورت گرفته در داخل و خارج از کشور می‌توان به این نکته پی برد که در تحقیقات داخلی، مطالعات کمی بر روی موضوع مورد نظر صورت گرفته و کمتر مورد توجه بوده است. همچنین پژوهش‌های داخلی بیشتر بر روی داده‌های غیر واقعی صورت گرفته است.

۳- روش شناسی پژوهش

۳-۱- داده‌ها و پیش‌پردازش

داده‌های مربوط به قراردادهای اختیار معامله در بازار سرمایه ایران در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ از منابع رسمی گردآوری گردید. داده‌های پرت بر اساس معیار فاصله بیش از سه انحراف معیار شناسایی و حذف شدند. مقادیر مفقود نیز با استفاده از روش جایگزینی میانگین زمانی نزدیک برآورد شدند. به منظور هم‌مقیاس‌سازی متغیرهای ورودی و افزایش پایداری در فرآیند آموزش مدل، کلیه داده‌ها با استفاده از روش نرمال‌سازی مینیمم-ماکزیمم در بازه [0,1] استاندارد شدند. هم‌ترازی زمانی بین قیمت قراردادهای اختیار معامله و دارایی پایه نیز براساس تاریخ و ساعت معامله انجام گرفت تا تطبیق زمانی کامل برقرار شود. نوسان تاریخی دارایی پایه بر اساس بازده‌های روزانه در پنجره ۳۰ روزه متحرک محاسبه شد و سپس با استفاده از رابطه زیر به صورت سالانه‌سازی تبدیل گردید:

$$\sigma_{year} = \sigma_{daily} \times \sqrt{252} \quad (5)$$

این مرحله مبنای محاسبه شاخص‌های ورودی به مدل ترکیبی و نیز کالیبراسیون مدل مرجع (بلک-شولز) قرار گرفت.

۳-۲- متغیرهای ورودی و مبانی نظری

متغیرهای ورودی مدل شامل موارد زیر است: قیمت نقدی دارایی پایه، قیمت اعمال، زمان باقی‌مانده تا سررسید، نوسان تاریخی، نرخ بهره بدون ریسک، حجم معاملات روزانه، اختلاف قیمت خرید و فروش روز قبل، و نسبت حجم معاملات به میانگین حجم. انتخاب این متغیرها مبتنی بر مبانی نظری ابزارهای مشتقه و چارچوب‌های قیمت‌گذاری اختیار معامله انجام شده است. طبق نظریه‌های مالی، عواملی چون قیمت نقدی، نرخ سود بدون ریسک، نوسان‌پذیری دارایی و زمان تا سررسید از مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر ارزش اختیار معامله به‌شمار می‌آیند. از دیدگاه نظری، ابزارهای مشتقه اوراقی هستند که ارزش آن‌ها از دارایی پایه یا شاخصی مرجع مشتق می‌شود. قرارداد اختیار معامله توافقی است که طی آن، فروشنده در ازای دریافت مبلغی مشخص (صرف اختیار)، حق خرید یا فروش دارایی معین را در زمان مشخص و به قیمتی

معین به خریدار واگذار می‌کند. اختیار خرید (Call) به دارنده اجازه‌ی خرید و اختیار فروش (Put) اجازه‌ی فروش دارایی پایه را می‌دهد.

۳-۳- طراحی مدل ترکیبی شبکه عصبی و الگوریتم PSO

مدل اصلی پژوهش از ترکیب شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) تشکیل شده است. شبکه‌ی عصبی طراحی شده دارای یک لایه ورودی (برابر با تعداد متغیرهای ورودی)، دو لایه پنهان با ۲۰ و ۱۰ نورون و یک لایه خروجی برای پیش‌بینی قیمت پیشنهاد خرید و فروش می‌باشد. توابع فعال‌سازی لایه‌های پنهان از نوع Tansig و تابع خروجی خطی انتخاب گردید. تابع هدف برای آموزش مدل، میانگین مربعات خطا (MSE) است. به‌منظور بهینه‌سازی وزن‌ها و پارامترهای شبکه، از الگوریتم PSO استفاده شد. جمعیت اولیه شامل ۳۰۰ ذره بوده و فرآیند در ۱۰۰۰ نسل تکرار گردید. نرخ اینرسی (w) برابر ۰/۸ و ضرایب یادگیری فردی و اجتماعی (c_1, c_2) برابر ۱/۵ تنظیم شدند. معیار توقف الگوریتم رسیدن به خطای هدف 10^{-5} یا تحقق حداکثر تعداد نسل بود. برای حصول اطمینان از پایداری الگوریتم، هر آزمایش ده بار به‌صورت مستقل اجرا شد و میانگین خطای RMSE حاصل از تکرارها به‌عنوان مبنای انتخاب راه‌حل نهایی مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش تنها وزن‌ها و پارامترهای شبکه توسط PSO بهینه شدند و ساختار لایه‌ها ثابت نگه داشته شد.

۳-۴- کالیبراسیون مدل مرجع (بلک-شولز)

به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد مدل ترکیبی با مدل‌های کلاسیک، از مدل بلک-شولز به‌عنوان الگوی مرجع استفاده گردید. در فرآیند کالیبراسیون، نوسان تاریخی ۳۰ روزه، نرخ بدون ریسک اوراق خزانه‌داری یک‌ساله و قیمت میانه‌ی خرید و فروش دارایی پایه به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل لحاظ گردیدند. نتایج مدل بلک-شولز به‌عنوان شاخص معیار ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها استفاده شد.

۳-۵- تقسیم داده‌ها

به‌منظور ارزیابی منصفانه‌ی عملکرد مدل، داده‌ها به‌صورت زمانی تقسیم شدند؛ به این ترتیب که ۷۰ درصد نخست داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد پایانی برای آزمون به‌کار رفت. این تقسیم‌بندی از نشت اطلاعات به بخش آزمون جلوگیری کرده و وضعیت واقعی بازار را بازتاب می‌دهد.

۳-۶- معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

کارایی مدل با استفاده از شاخص‌های آماری زیر اندازه‌گیری گردید: میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2). برای سنجش دقت مدل در سطح کل بازار، خطاهای پیش‌بینی هر قرارداد با وزن‌دهی بر اساس حجم معاملات جمع شدند و میانگین وزنی خطاها محاسبه گردید. در نهایت، نتایج مدل ترکیبی MLP-PSO با نتایج مدل‌های بلک-شولز و رگرسیون خطی مقایسه شد تا میزان بهبود دقت برآورد مشخص گردد. به‌منظور ارزیابی پایداری و قابلیت تکرار الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، این الگوریتم ۱۰ بار به‌صورت مستقل اجرا شده است. در هر اجرا، معیار خطای RMSE محاسبه شده و نتایج به شرح جدول زیر آمده است.

جدول ۱. مقدار خطا

مقدار خطای RMSE	اجرای PSO
۰/۰۳۵	۱
۰/۰۳۴	۲
۰/۰۳۶	۳
۰/۰۳۴	۴
۰/۰۳۵	۵
۰/۰۳۳	۶
۰/۰۳۶	۷
۰/۰۳۵	۸
۰/۰۳۴	۹
۰/۰۳۵	۱۰

میانگین خطای RMSE برابر با ۰/۰۳۴۷ و انحراف معیار خطا برابر با ۰/۰۰۱۰ محاسبه شده است. این مقادیر نشان می‌دهد نتایج PSO پایدار بوده و الگوریتم نتایج مشابه و قابل اتکایی در هر بار اجرا ارائه می‌دهد؛ بنابراین، می‌توان اطمینان داشت که راه‌حل‌های بهینه یافت شده تصادفی نیستند و قابلیت بازتولید دارند.

۴- برآورد مدل

۴-۱- یادگیری ماشین

پیشرفت‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، تحولات عمیقی در جنبه‌های مختلف زندگی انسان ایجاد کرده‌اند. امروزه شاهد حضور گسترده محصولات مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در زندگی روزمره خود هستیم؛ از سیستم‌های جستجوگر و توصیه‌گر گرفته تا فناوری‌های بینایی ماشین و ترجمه ماشینی روی رایانه‌ها و تلفن‌های همراه. ماشین‌ها قادرند کارهایی را انجام دهند که پیش‌ازاین تنها توسط انسان‌های متخصص امکان‌پذیر بود.

یادگیری ماشین، شاخه‌ای از هوش مصنوعی است که به سامانه‌ها اجازه می‌دهد به صورت مستمر و برخط، پارامترها و عملکرد خود را به صورت اتوماتیک تنظیم و بهبود دهند. این فرایند، به شکل یک چرخه تکرارشونده عمل می‌کند و سیستم‌های یادگیرنده با کسب تجربه و تنظیم خودکار، کارآمدی بیشتری پیدا می‌کنند. این قابلیت به سامانه‌ها امکان تعالی مستمر را می‌دهد تا در مواجهه با تغییرات محیطی و داده‌ای، خود را به روزرسانی کرده و عملکرد بهینه‌تری داشته باشند.

یکی از بخش‌های کلیدی یادگیری ماشین، تشخیص و یافتن الگوها و ارتباط میان عناصر یک مجموعه داده است. ماشین با استخراج روابط پیچیده در داده‌ها، از این الگوها برای پیش‌بینی و تصمیم‌گیری استفاده می‌کند. این فرایند به صورت مستمر، خودکار و پویا انجام می‌شود و سامانه به مرور زمان، با توجه به داده‌ها و تجربیات جدید، پارامترهای خود را تنظیم می‌کند. در نتیجه، حتی در شرایطی که داده‌ها ناایستا و متغیر باشند، یادگیری ماشین توانایی تطبیق و به روزرسانی دارد.

در سال‌های اخیر، کاربرد یادگیری ماشین و علم داده در حوزه‌های مالی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این فناوری‌ها موجب تحولی بنیادین در صنعت مالی شده و به بانک‌ها، صندوق‌های پوشش ریسک، شرکت‌های سرمایه‌گذاری و فناوری‌های مالی کمک کرده‌اند تا تصمیمات بهینه‌تری بگیرند و ریسک‌ها را مدیریت کنند. با ورود

حجم‌های عظیمی از داده‌های مالی و افزایش توان محاسباتی، یادگیری ماشین به ابزاری محوری برای تحلیل داده‌های مالی و پیش‌بینی روندهای بازار تبدیل شده است.

برای بهره‌مندی مؤثر از یادگیری ماشین در امور مالی، علاوه بر داده‌های مناسب و باکیفیت، لازم است از الگوریتم‌های درست و بهینه استفاده شود. الگوریتم‌هایی مانند درخت تصمیم، ماشین بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی عمیق و یادگیری تقویتی در این زمینه کاربرد فراوانی دارند و به کمک آن‌ها می‌توان به نتایج دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تری دست یافت (هاستی، تیب‌شیرانی و فریدمن، ۲۰۰۹ و گودفلو، بنجیو و کورویل، ۲۰۱۶).

به طور خلاصه، یادگیری ماشین فرایندی تکاملی و پویاست که به سامانه‌ها اجازه می‌دهد در مواجهه با داده‌های جدید، خود را بهبود دهند و عملکرد بهینه داشته باشند. این فناوری که اکنون جزئی جدایی‌ناپذیر از صنعت مالی و زندگی روزمره ما شده است، آینده‌ای روشن و نویدبخش را در حوزه‌های مختلف تضمین می‌کند.

۴-۲- الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک روش سراسری بهینه‌سازی است که برای حل مسائلی طراحی شده است که پاسخ آن‌ها به صورت یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی تعریف می‌شود. در این الگوریتم، ذراتی در فضای جستجو قرار داده می‌شوند که هر ذره دارای یک سرعت اولیه است و بین این ذرات، کانال‌های ارتباطی برقرار می‌شود. این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند و در هر بازه زمانی، نتایجشان بر اساس معیاری به نام «مالک شایستگی» ارزیابی می‌شود. به مرور زمان ذرات به سمت ذراتی که دارای مالک شایستگی بالاتری هستند و در همان گروه ارتباطی قرار دارند، سمت‌گیری و شتاب می‌گیرند. این الگوریتم علی‌رغم محدودیت‌هایی که هر روش بهینه‌سازی دارد، در حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته عملکرد بسیار موفقی از خود نشان داده است. الگوریتم PSO الگوریتمی جستجوی جمعی است که بر اساس رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل‌سازی شده است. در ابتدا این الگوریتم برای کشف الگوهای حاکم بر پرواز هم‌زمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آن‌ها و شکل بهینه دسته توسعه یافته است. در این الگوریتم، ذرات همچون اعضای یک گله پرندگان در فضای جستجو حرکت می‌کنند و نحوه تغییر موقعیت هر ذره تحت تأثیر تجربه خود و همچنین دانش و تجربه همسایگانش است؛ بنابراین موقعیت دیگر ذرات در این گله بر روند جستجوی هر ذره اثر می‌گذارد. این تعامل منجر به فرایند جستجویی می‌شود که در آن ذرات تمایل دارند به سمت نواحی موفق در فضای جستجو حرکت کنند. ذرات از یکدیگر می‌آموزند و بر اساس دانش کسب شده، به سمت بهترین همسایگان خود حرکت می‌کنند. اساس کار این الگوریتم بر این قرار دارد که در هر لحظه، هر ذره موقعیت خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین موقعیتی که تاکنون در آن قرار گرفته (بهترین موقعیت شخصی) و بهترین موقعیتی که در کل همسایگانش وجود دارد (بهترین موقعیت گروهی) تنظیم می‌کند (کاویاری و همکاران، ۱۳۹۶).

این الگوریتم به دلیل سادگی و کارایی مناسب، در بسیاری از حوزه‌ها از جمله بهینه‌سازی تابع‌های پیچیده، مسائل مهندسی، شبکه‌های عصبی و کنترل سیستم‌ها به کار گرفته می‌شود و همگرایی مناسبی را در حل مسائل بهینه‌سازی فراهم می‌کند. در پژوهش حاضر، به منظور برآورد قیمت‌های خرید و فروش اختیار معامله سهام منتخب از مدل بلک-شولز استفاده شده است. ابتدا داده‌های قیمت‌های خرید و فروش در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲، شامل ۸۴۰ نمونه از ۴۲ سهم دارای سابقه معامله اختیار جمع‌آوری گردید. برای افزایش دقت در پیش‌بینی قیمت‌های اختیار، یک شبکه عصبی

طراحی و آموزش داده شد به‌طوری که خطای میانگین مربعات (MSE) به‌عنوان معیار اصلی برای ارزیابی دقت مدل به کار گرفته شد. پس از حصول اطمینان از صحت پیش‌بینی شبکه عصبی، مدل رگرسیون خطی جهت برآورد دقیق‌تر قیمت اختیار خرید و اختیار فروش ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور بهبود کارایی مدل رگرسیونی و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در فرایند بهینه‌سازی پارامترهای مدل به کار گرفته شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی، بهبود قابل توجهی در مقایسه با مدل پایه نشان داد که در متن مقاله به تفصیل تحلیل و تشریح شده است.

۳-۴- مجموعه داده و معیار ارزیابی

داده‌ها به بخش آموزش، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم شده و در همه مراحل برای ارزیابی مدل تاحدامکان یکسان بوده‌اند. معیار ارزیابی اصلی، میانگین توان دوم خطا (MSE) و ریشه میانگین توان دوم خطا (RMSE) است که همراه با انحراف معیار خطا گزارش شده‌اند.

جدول ۲. پارامترهای کالیبراسیون مدل بلک-شولز

توضیحات	مقدار/روش	پارامتر
سالانه شده با ۲۵۲	۳۰ روز پنجره، داده روزانه	نوسان تاریخی
داده‌های بازار مالی روزانه	نرخ اوراق خزانه‌داری یک‌ساله	نرخ بدون ریسک
	لحاظ نشده	سود تقسیمی
	قیمت میانه خرید و فروش دارایی پایه	قیمت ورودی
داده‌ها یکنواخت در همه مدل‌ها	آموزش، اعتبارسنجی، آزمون	بخش‌های داده

جدول ۳. آمار توصیفی داده‌های مورد استفاده خرید و فروش

پارامترها	شاخص	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	میانه
قیمت دارایی پایه (ریال)	فروش	۳۹۴۷/۶۳	۱۰۸۴/۹۲	۱۹۰۱/۸۱	۵۶۹۳/۷۵	۳۸۸۳/۵۳
	خرید	۴۰۸۷/۹۳	۵۹۹۳/۴۲	۲۰۰۱/۹۱	۱۱۳۷/۴۲	۴۱۵۵/۴
قیمت توافقی	فروش	۳۵۵۲/۸۶	۹۷۶/۴۳	۱۷۱۱/۶۳	۵۱۲۴/۳۷	۳۴۹۵/۱۸
	خرید	۳۶۷۹/۱۴۳	۵۳۹۴/۰۸۱	۱۸۰۱/۷۲	۱۰۲۳/۶۸۲	۳۷۳۹/۸۶
نرخ بهره بدون ریسک	فروش	۶/۴۰	۲/۴۸	۱/۹۱	۱۰/۴۰	۶/۴۸
	خرید	۶/۸۲	۱۰/۹۵	۲/۰۱۵	۲/۶۰	۶/۷۴
نوسانات سهم	فروش	۱۵/۲۳	۱۵/۰۲	۶/۳۶	۴/۸۲	۲۶/۵۶
	خرید	۱۶/۰۴	۲۷/۹۶	۵/۰۷	۶/۶۷	۱۵/۸۱
قیمت بازار	فروش	۳۷۹۳/۰۹	۳۸۴۸/۳۵	۱۰۸۵/۷۹	۱۷۹۳/۹۰	۵۶۲۹/۴۴
	خرید	۳۹۹۸/۶۶	۵۹۴۴/۶۶	۱۸۸۰/۳۶	۱۱۳۷/۶۷	۴۰۴۴/۴۸

منبع: یافته‌های پژوهشگر

جدول ۳، آمار توصیفی داده‌های مورد استفاده در پژوهش را که شامل قیمت دارایی پایه، قیمت توافقی، نرخ بهره بدون ریسک، نوسان سهم و قیمت بازار برای هر دو حالت خرید و فروش است، نشان می‌دهد. بعد از اجرای ۱۰۰ مورد از مقادیر مختلف بهترین مقادیر مطابق جدول (۴) به دست آمد. همان‌طور که گفته شد جهت تعریف شبکه عصبی می‌بایست متغیرهای مختلفی تنظیم شود که در پژوهش حاضر بعد از اجرای ۱۰۰ مورد از مقادیر مختلف بهترین مقادیر مطابق جدول ۴ به دست آمد.

جدول ۴. تنظیمات شبکه عصبی طراحی شده

متغیر	مقدار	متغیر	مقدار
تعداد لایه‌های خروجی	۲۹	ضریب آموزش	۰/۱ و ۱۰۰
تعداد لایه‌های پنهان	۲۰	تعداد اپوک	۳۰۰۰
دسته‌بندی لایه‌های پنهان	۲	حداکثر تعداد عملیات	۱۰۰۰
تابع تصمیم‌گیری	Tansig, Tansig, Pourelin	ضریب هدف	1e-5
تابع آموزش	Traingdx, Learngdm	ضریب آموزشی مونتوم	۰/۸
	تابع خطا	MSE	

منبع: یافته‌های پژوهشگر

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی شده با استفاده از تابع اندازه‌گیری خطا از نوع میانگین توان دوم خطا به منظور ارزیابی دقت شبکه عصبی طراحی شده مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، مقدار خطا در شرایط ثابت با تغییر تعداد لایه‌ها دستخوش تغییر می‌شود. در این پژوهش، حالت‌های مختلفی از تعداد لایه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج مربوط به آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. محاسبه خطای شبکه عصبی طراحی شده در شرایط مختلف

ردیف	MSE	تعداد لایه‌های خروجی	تعداد لایه‌های پنهان	دسته‌بندی لایه‌های پنهان
۱	۱۰۰۶۲	۲۹	۲۰	۲
۲	۱۰۰۵۰	۳۰	۳۰	۲
۳	۱۰۰۳۸	۳۵	۴۰	۲
۴	۱۰۰۴۵	۴۰	۵۰	۲
۵	۱۰۰۲۹	۴۵	۵۵	۵
۶	۱۰۰۱۴	۵۰	۶۰	۱۰

منبع: یافته‌های پژوهشگر

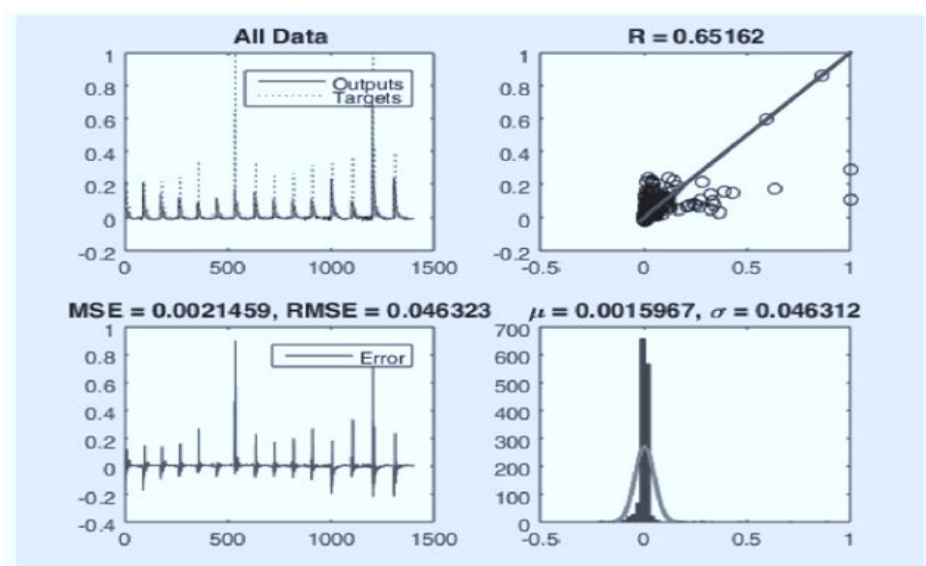
جدول ۵ نتایج مربوط به ۱۰ اجرای مستقل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) را در پیش‌بینی معیار خطای RMSE نشان می‌دهد. هدف از ارائه این جدول، نمایش میزان پایداری و قابلیت اطمینان عملکرد الگوریتم است. هر اجرا نمایانگر یک نمونه از فرایند بهینه‌سازی وزن‌های شبکه عصبی و ضرایب مدل رگرسیون است. مشخص است که میانگین خطا و انحراف معیار بسیار پایین بوده و افت و خیز نتایج در محدوده کمی قرار دارد؛ این موضوع نشانه‌ای قوی از ناپایداری کم و قابلیت بازتولید بالای الگوریتم است. نتایج به دست آمده از اجرای چندباره PSO نشان می‌دهد که الگوریتم قادر است به راه‌حل‌های بهینه‌ای با عملکرد یکسان یا بسیار نزدیک دست یابد و نتایج تصادفی یا متغیر بزرگی ارائه نمی‌دهد. این پدیده به دلیل طراحی بهینه پارامترهای PSO نظیر تعداد ذرات، ضرایب یادگیری فردی و اجتماعی و تعداد تکرارها است که در بخش روش تحقیق توضیح داده شده‌اند. بدین ترتیب می‌توان اطمینان داشت که نتایج ارائه شده در این مقاله از ثبات و اعتبار بالایی برخوردار بوده و اجرای مجدد الگوریتم PSO شاهد نتایجی مشابه و حتی بهتر خواهد بود. با توجه به مقادیر کم MSE به دست آمده در جدول ۵ و همچنین ضریب همبستگی مناسب بین خروجی مدل و خروجی هدف، شبکه‌های عصبی توانسته‌اند داده‌ها را به طور مطلوب مدل‌سازی کنند.

جدول ۶. معیار خطای میانگین توان دوم (MSE) مدل‌های پیش‌بینی قیمت قرارداد اختیار معامله (مقادیر بر اساس داده‌های نرمال‌شده و تجمیعی کل قراردادها محاسبه شده است)

توضیحات	MSE نرمال‌شده (تجمیعی)	مدل
مدل کلاسیک قیمت‌گذاری	۰/۰۴۶	بلک-شولز
مدل آماری مرجع	۰/۰۴۴	بوت‌استرپ
شبکه عصبی بهینه‌شده با PSO	۰/۰۳۱	مدل پیشنهادی (MLP + PSO)

منبع: یافته‌های پژوهشگر

جدول ۶ معیار خطای میانگین توان دوم برای پیش‌بینی قیمت قراردادهای اختیار معامله را نشان می‌دهد. در این جدول، مقادیر MSE به صورت تجمیعی و بر اساس داده‌های نرمال‌شده برای تمامی قراردادهای سررسیدها و روزهای معاملاتی مرتبط با ۴۲ شرکت منتخب محاسبه شده‌اند. تفکیک مجزا بین قیمت خرید و فروش در این محاسبات لحاظ نشده است. در جدول، کارایی مدل‌های مرجع کلاسیک مانند بلک-شولز و بوت‌استرپ با عملکرد مدل پیشنهادی که شامل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه بهینه‌شده با الگوریتم PSO است، مقایسه شده است. نتایج نمایش داده شده بیانگر بهبود قابل توجه دقت پیش‌بینی در مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های کلاسیک است. این گزارش جامع امکان مقایسه دقیق و مستدل مدل‌ها را فراهم ساخته و نشان می‌دهد که مدل داده‌محور پیشنهادی می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل‌های سنتی در ارزش‌گذاری قراردادهای اختیار معامله باشد. در شکل ۲، اطلاعاتی شامل مقادیر RMSE، MSE، هیستوگرام خطا، نمودار رگرسیون، میانگین و انحراف معیار به تفکیک کل داده‌ها، داده‌های آموزش، داده‌های آزمایش و داده‌های ارزیابی نمایش داده شده است.



شکل ۲. نمودارهای خروجی شبکه عصبی

در هر یک از شکل‌های ۲، نمودار سمت راست پایین، توزیع خروجی تخمین سیستم را نسبت به توزیع نرمال نشان می‌دهد. اختلاف مقادیر خطا با نقطه میانی نمودار، میزان فاصله خطا از عدد صفر را بیان می‌کند؛ هر چه نمودار توزیع خطا به توزیع نرمال نزدیک‌تر باشد، به معنی نزدیک‌تر بودن مقدار خطا به صفر و دقت بالاتر سیستم در تخمین مقادیر است. نمودار سمت راست بالا، نمودار رگرسیون مدل بین خروجی‌های سیستم و خروجی‌های واقعی (هدف) است که ضریب همبستگی R میزان توضیح تغییرات خروجی شبکه عصبی توسط خروجی واقعی را نشان می‌دهد. هر چه مقدار

این ضریب به یک نزدیک تر باشد، همبستگی بین خروجی های مدل و خروجی های هدف بیشتر است و مقدار R برابر با یک نشان دهنده همبستگی کامل است. نمودار سمت چپ بالا تخمین سیستم و داده های واقعی مربوط به داده های اعتبارسنجی را نمایش می دهد و در نهایت، نمودار سمت چپ پایین میزان خطای میانگین توان دوم (MSE)، ریشه میانگین توان دوم خطا (RMSE) و روند افزایش و کاهش خطا را در طول دوره های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون نشان می دهد. برای محاسبه معیار خطای میانگین توان دوم (MSE) در سطح نمونه و شرکت ها، خطا ابتدا برای هر قرارداد به طور جداگانه محاسبه شده است. سپس این مقادیر با وزن دهی بر اساس حجم معاملاتی هر قرارداد تجمع شده اند تا اهمیت قراردادهای پرمعامله بیشتر لحاظ شود. بعد از آن، مقادیر MSE وزن دهی شده قراردادهای هر شرکت جمع شده و میانگین وزنی هر شرکت به دست می آید. نهایتاً، میانگین وزنی MSE شرکت ها برای نتایج کلی گزارش شده است. این وزن دهی بر اساس حجم معاملات به انعکاس بهتر اهمیت هر قرارداد در بازار کمک کرده و باعث می شود عملکرد مدل ها در شرایط واقعی بازار دقیق تر ارزیابی شود.

جدول ۷. محاسبه MSE برای مدل بلک شولز در شرایط قیمت خرید و فروش

شرکت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
MSE	۲/۲۱	۱/۳۳	۲/۲۶	۱/۰۲	۲/۱۰	۱/۸۹	۱/۳۶	۲/۶۱	۱/۹۶	۲/۹۸	۲/۲۵	۱/۰۶	۱/۴۱	۲/۷۶
شرکت	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸
MSE	۱/۳۱	۱/۶۳	۱/۴۲	۲/۳۱	۲/۶۵	۲/۷۸	۱/۸۹	۲/۹۴	۱/۱۸	۲/۷۴	۲/۶۷	۲/۴۱	۲/۳۸	۱/۱۶
شرکت	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰	۴۱	۴۲
MSE	۱/۹۹	۱/۷۲	۲/۷۱	۲/۱۴	۲/۳۵	۱/۱۶	۲/۳۶	۲/۰۷	۱/۲۵	۲/۹۸	۱/۸۸	۱/۱۱	۲/۶۱	۱/۸۱

منبع: یافته های پژوهشگر

باتوجه به جدول ۷ از مقایسه مقادیر قیمت خرید و فروش در مدل بلک شولز با قیمت های واقعی، می توان گفت که مدل بلک- شولز دارای دقت بالاتری است. همچنین، باتوجه به نتایج مربوط به قیمت فروش و مقایسه آن با قیمت های واقعی، مدل بلک- شولز دقت بیشتری از خود نشان داد. در ادامه، با استفاده از تحلیل همبستگی و برآورد رگرسیون در نرم افزار، پارامترهای غیرتأثیرگذار بر قیمت های خرید و فروش شناسایی و حذف شدند که نتایج آن ها در جداول (۸) و (۹) ارائه شده است. متغیرهای مورد بررسی در این مطالعه برای تحلیل قیمت خرید و فروش شامل قیمت نقدی سهام، قیمت توافقی، نرخ بهره بدون ریسک، نوسانات سهم، زمان تا سررسید قرارداد و بازده مورد انتظار بوده اند.

جدول ۸. ضریب همبستگی متغیرها با متغیر قیمت خرید (PP)

متغیر	نماد	قیمت خرید	معنادار	تعداد	رابطه
آزمون		ضریب همبستگی پیرسون			
قیمت نقدی سهام	CP	۰/۹۹	۰/۰۰		وجود دارد
قیمت توافقی	NP	۰/۱۱	۰/۴۲		وجود ندارد
نرخ بهره بدون ریسک	RI	-۰/۰۱	۰/۰۰	۴۲۰	وجود دارد
نوسانات سهم	SV	۰/۰۱۵	۰/۰۰		وجود دارد
زمان تا سررسید قرارداد	TCE	۰/۰۰۱	۰/۳۴		وجود ندارد
بازده مورد انتظار	ER	-۰/۰۳	۰/۰۰		وجود دارد

منبع: یافته های پژوهشگر

بر اساس نتایج جدول (۸)، مشخص شد که ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای قیمت توافقی و زمان تا سررسید قرارداد با متغیر قیمت خرید از نظر آماری معنادار نبوده است؛ زیرا مقدار احتمال (p-value) مربوط به این متغیرها فراتر از سطح معناداری تعیین شده ($\alpha=5\%$) بوده است. بنابراین، به دلیل عدم وجود معناداری آماری کافی، این دو متغیر از مدل رگرسیون کنار گذاشته شدند. در مرحله بعد، مدل رگرسیون خطی برای برآورد قیمت خرید با استفاده از نرم‌افزار متلب (MATLAB) اجرا گردید. هدف از آن، شناسایی عوامل کلیدی و مؤثر بر قیمت خرید در سطح کلی بود که بر اساس مبانی نظری مربوطه و چارچوب رگرسیون خطی، مدل برآورد و ضرایب متغیرها تعیین شدند. این ضرایب نشان می‌دهند که در تصمیم‌گیری‌های مربوط به خرید، کدام متغیرها باید به‌عنوان عوامل اصلی مورد توجه قرار گیرند. تابع خطی به‌دست آمده برای پیش‌بینی قیمت خرید به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$PP=0.999 CP+1.229 RI -0.004 SV+0.232 ER \quad (۶)$$

جدول ۹. ضریب همبستگی متغیرها با متغیر قیمت فروش (SP)

رابطه	تعداد	معنادار	قیمت خرید ضریب همبستگی پیرسون	نماد	متغیر آزمون
وجود ندارد		۰/۴۲۶	۰/۱۲	CP	قیمت نقدی سهام
وجود دارد		۰/۰۰	۰/۹۹	NP	قیمت توافقی
وجود دارد	۴۲۰	۰/۰۰	-۰/۰۲	RI	نرخ بهره بدون ریسک
وجود دارد		۰/۰۰	۰/۰۱	SV	نوسانات سهم
وجود ندارد		۰/۳۶	۰/۰۰۱	TCE	زمان تا سررسید قرارداد
وجود دارد		۰/۰۰	۰/۰۳	ER	بازده موردانتظار

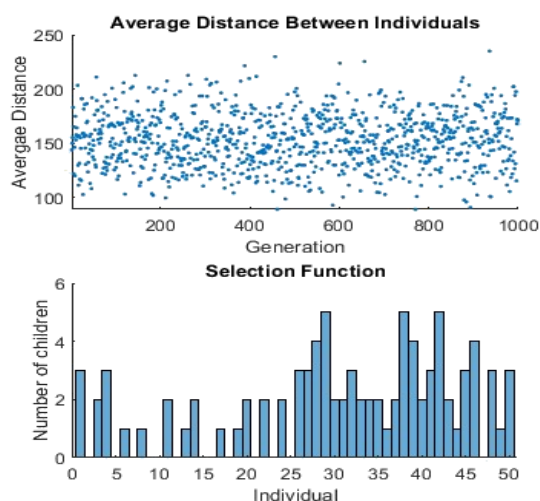
منبع: یافته‌های پژوهشگر

بر اساس نتایج جدول (۹)، ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای قیمت نقدی سهام و زمان تا سررسید قرارداد با متغیر قیمت فروش معنادار نبوده است؛ زیرا مقدار احتمال (p-value) مربوط به این متغیرها بیشتر از سطح معناداری تعیین شده ($\alpha=5\%$) بوده و بنابراین این روابط از نظر آماری معنادار تشخیص داده نشدند. به همین دلیل، این دو متغیر از ورود به مدل رگرسیون کنار گذاشته شدند. در ادامه، مدل رگرسیون خطی برای پیش‌بینی قیمت فروش با استفاده از نرم‌افزار متلب (MATLAB) برآورد شد. برای تعیین عوامل مؤثر بر قیمت فروش، بر اساس مبانی نظری مرتبط، مدل رگرسیون خطی برآورد گردیده است. معادله خطی حاصل برای محاسبه قیمت فروش به‌صورت زیر است:

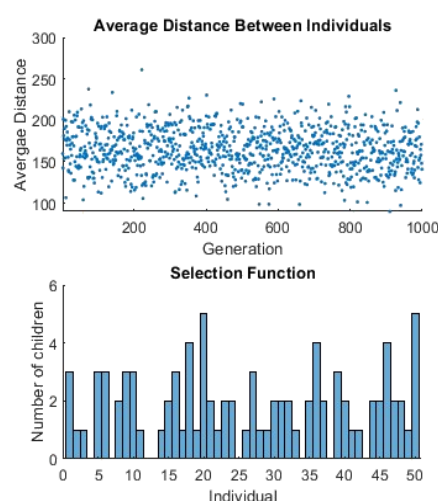
$$SP = 1.11 NP - 0.11 RI + 0.25 SV + 0.15 ER \quad (۷)$$

۴-۴- بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات

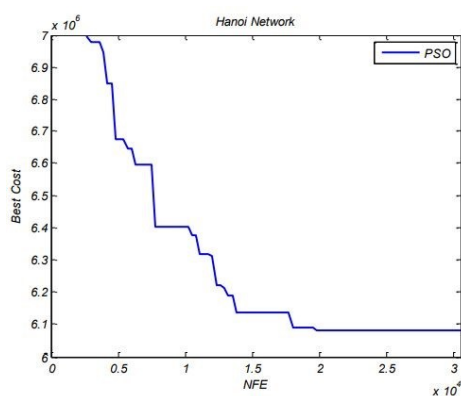
در این بخش از پژوهش به بهینه‌سازی متغیرهای مستقل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جهت بهینه کردن مقدار متغیر وابسته پرداخته شد. مقادیر جمعیت اولیه ۳۰۰ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که خروجی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات وابسته به تنظیمات اولیه و ورودی‌های اولیه است به گونه‌ای که محدوده انتخابی متغیرها می‌تواند بر روی خروجی به‌دست آمده مؤثر باشد. خروجی الگوریتم برای معادلات قیمت خرید و فروش مطابق تصاویر به‌دست آمد. نتایج بهینه‌سازی تابع خطی فروش مطابق شکل ۳ و نتایج بهینه‌سازی تابع خطی خرید مطابق شکل ۴ است.



شکل ۴. نتایج بهینه سازی تابع خطی خرید



شکل ۳. نتایج بهینه سازی تابع خطی فروش



شکل ۵. نمودار همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات

یکی از مهم ترین آزمون هایی که باید انجام شود، ارزیابی میزان پایداری الگوریتم است؛ به این معنا که بررسی شود آیا الگوریتم در اجرای های مکرر، نتایج تقریباً یکسانی را ارائه می دهد یا خیر. منحصر به فرد بودن پاسخ بهینه، نکته ای کلیدی است که باید مورد آزمون قرار گیرد. بدین منظور، یکی از تنظیمات الگوریتم به عنوان نمونه انتخاب و چندین بار اجرا گردید. سپس نتایج حاصل از این اجراها با یکدیگر مقایسه شدند. اختلاف میان نتایج بسیار ناچیز بود که نشان دهنده پایداری بالای الگوریتم در اجرای های متعدد حتی با ۳۰۰۰۰ تکرار است.

۵- نتیجه گیری

شبیه سازی و پیش بینی ارزش گذاری قرارداد اختیار معامله به فعالان حرفه ای بازارهای مالی، مشاوران سرمایه گذاری و نهادهای مالی بزرگ کمک می کند تا تصمیم گیری های بهتری داشته، ریسک ها را کاهش داده و بازده سرمایه گذاری خود را افزایش دهند. براین اساس سؤال اصلی که تحقیق به دنبال پاسخ به آن بوده است این است که پیش بینی ارزش گذاری قراردادهای اختیار معامله با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات در مقایسه با روش های سنتی چگونه است. برای پاسخ به سؤال تحقیق از روش های غیر خطی و مقایسه آن با مدل های سنتی استفاده شده است. الگوریتم ازدحام ذرات، موجب کاهش معنادار خطا و افزایش قابلیت تطبیق مدل با شرایط واقعی بازار شده است. نتایج حاصل از مدل های پیش بینی نشان داده استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در بهینه سازی وزن های شبکه عصبی پرسپترون چندلایه نقش مؤثری در کاهش خطای پیش بینی قیمت های خرید و فروش

قراردادهای اختیار معامله داشته است. بهینه‌سازی پارامترهای شبکه عصبی با PSO سبب شده است تا این مدل عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های سنتی و بدون بهینه‌سازی از خود نشان دهد. همچنین برای نشان دادن عوامل مؤثر بر قیمت خرید و فروش اختیار معامله از رگرسیون خطی استفاده شده، ضرایب مدل با استفاده از PSO بهینه‌سازی شده‌اند که این امر باعث افزایش دقت پیش‌بینی قیمت‌های اختیار معامله گردیده است. مقایسه عملکرد دو مدل نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی بهینه شده با PSO از دقت بالاتر و معیارهای ارزیابی بهتری نظیر MAE، RMSE و R^2 برخوردار است. همچنین، مدل‌های پیش‌بینی به صورت جداگانه برای قیمت پیشنهادی خرید و قیمت پیشنهادی فروش طراحی و آموزش داده شده‌اند که این تفکیک باعث افزایش دقت و قابلیت تطبیق مدل با واقعیت‌های بازار مالی شده است. پیاده‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات بر روی داده‌های واقعی ۴۲ نمونه بورسی طی بازه دهه‌ساله (۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲) نشان داد مدل مبتنی بر این الگوریتم در تخمین پارامترها، عملکردی بهتر از روش‌های سنتی داشته و از پایداری عددی، سرعت اجرا و دقت قابل قبولی برخوردار است. ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با شبکه‌های عصبی مصنوعی امکان ارائه مدلی دقیق‌تر، واقع‌بینانه‌تر و انعطاف‌پذیرتر را فراهم کرده است. این مدل قادر است قیمت‌های خرید و فروش اختیار معامله را به طور مستقل و با دقت بالا پیش‌بینی کند و در شرایط نوسانی یا تغییرپذیر بازار، کارایی بیشتری نسبت به مدل‌های ایستا از خود نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش از منظر بهبود دقت ارزش‌گذاری اختیار معامله، همسو با جریان جدید پژوهش‌های مجله دانش حسابداری است که بر نقش الگوریتم‌های یادگیری ماشین در بازار سرمایه ایران تأکید دارند. در نهایت، با توجه به پیچیدگی و نوسانات بالای بازارهای نوظهور، استفاده از چنین مدل‌هایی می‌تواند مزیت رقابتی قابل توجهی برای معامله‌گران و نهادهای مالی بزرگ فراهم کرده و به توسعه عمق و نقدشوندگی بازار کمک نماید. این پژوهش نشان می‌دهد تلفیق هوش مصنوعی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، راهکاری مؤثر و نوآورانه برای بهبود کیفیت قیمت‌گذاری اوراق اختیار معامله در بازارهای مالی پیچیده است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: هدیه میر؛ **تهیه گزارش پژوهش:** هدیه میر؛ دکتر امیر حسین تائبی نقندری و دکتر سید عبدالمجید جلائی اسفندآبادی؛ **تحلیل داده‌ها:** هدیه میر؛ دکتر امیر حسین تائبی نقندری و دکتر سید عبدالمجید جلائی اسفندآبادی. این مقاله برگرفته از رساله هدیه میر در رشته حسابداری به راهنمایی دکتر امیر حسین تائبی نقندری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان است.

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنهادیه مقاله.

نویسنده دوم: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله.

نویسنده سوم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

نویسندگان هیچگونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از تمامی عزیزانی که ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند و نیز از استادان فرهیخته و فرزانه‌ای که مسئولیت داوری پژوهش حاضر را برعهده دارند، کمال تقدیر و تشکر را داریم.

منابع

- اسدی، غلامحسین و نقدی، سجاد (۱۳۹۷). طراحی و تبیین الگوی پیش‌بینی رشد اقتصادی با رویکرد حسابداری. *مجله دانش حسابداری*، ۹(۳)، ۲۳۱-۲۵۶. <https://doi.org/10.22103/jak.2018.11095.2524>
- کاویاری، نرگس؛ فاضلیان، محمدرضا و سلیمانی، حمید (۱۳۹۶). مروری بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کاربردهای آن در مهندسی صنایع و مدیریت، ۳۲(۲)، ۷۹-۹۶. <https://doi.org/10.22060/ijie.2017.12754.2631>
- کیمیاگری، علی محمد؛ حاجی‌زاده، احسان؛ دستخوان، حسین و رضانی، مجید (۱۳۹۶). ارائه یک مدل ترکیبی جدید به منظور قیمت‌گذاری اختیار معامله. *نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید*، ۲۸(۱)، ۸۷-۹۹. <https://ijiepm.iust.ac.ir/article-1-1315-fa.html>
- نسبی، عبدالنساء؛ ملکی، بهروز و رضایی، روزبه (۱۳۹۵). تخمین پارامترهای مدل قیمت‌گذاری اختیار معامله اروپایی تحت دارایی پایه با تلاطم تصادفی با کمک رهیافت تابع زیان. *مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار*، ۷(۲۸)، ۹۱-۱۱۵. <https://sanad.iau.ir/Journal/fej/Article/1079398>
- نقدی، سجاد؛ اسماعیلی، جواد و محمدزاده مقدم، محمدباقر (۱۳۹۸). تبیین حسابداری کلان با تأکید بر اهمیت داده‌های حسابداری در الگوسازی تورم. *مجله دانش حسابداری*، ۱۰(۴)، ۵۴۵-۵۸۲. <https://doi.org/10.22103/jak.2019.13753.2946>
- پیمانی فروشانی، خداوردی؛ دهقان دهنوی، محمدعلی، و کوه‌کن، میلاد (۱۴۰۳). ارزش‌گذاری اوراق اختیار معامله بر اساس شبکه عصبی ماژولار. *پژوهش‌های مالی*، ۲۶(۴)، ۹۰۴-۹۳۹. <https://doi.org/10.22059/FRJ.2024.372265.1007573>
- سعدایی جهرمی، مهدی (۱۴۰۱). ارزش‌گذاری اختیار معامله با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین: شواهدی از بورس اوراق بهادار تهران. *مجله پژوهش‌های مالی*، ۲۴(۲)، ۵۹-۸۰. <https://doi.org/10.22067/JFR.2022.75412.1154>
- سیفی، محمدرضا، احمدی، علی، و همکاران. (۱۴۰۲). مقایسه دقت قیمت‌گذاری دو مدل بارلز-سونر و باکستین-هاویسون با استفاده از شبکه‌های عصبی در بازار اختیار معامله شاخص P500&S. *فصلنامه دانش حسابداری و مالی*، ۱۰(۳)، ۱۱۵-۱۳۶. <https://doi.org/10.22108/JAF.2023.13952.1331>

Reference

- Asadi, G., & Naqdi, S. (2018). Designing and explaining an economic growth forecasting model with an accounting approach. *Journal of Accounting Knowledge*, 9(3), 231–256. doi.org/10.22103/jak.2524 [In Persian].
- Bakshi, G., Cao, C., & Chen, Z. (1997). Empirical performance of alternative option pricing models. *Journal of Finance*, 52(5), 2003–2049. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1997.tb02751.x>
- Benos, E., & Zikes, F. (2016). Do bid–ask spreads predict future volatility? *Journal of Financial Markets*, 27, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.finmar.2015.07.001>
- Black, F., & Scholes, M. (1973). The pricing of options and corporate liabilities. *Journal of Political Economy*, 81(3), 637–654. <https://doi.org/10.1086/260062>
- Bollen, N. P., & Whaley, R. E. (2004). Does net buying pressure affect the shape of implied volatility functions? *Journal of Finance*, 59(2), 711–753. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.2004.00655.x>
- Chakraborty, A., Puhan, P., & Chakraborty, T. (2021). Option pricing using hybrid particle swarm optimization and artificial neural network. *Applied Soft Computing*, 107, 107255. doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107255
- Chakraborty, A., et al. (2019). Hybrid particle swarm optimization and neural network model for financial forecasting. *Expert Systems with Applications*, 131, 112–130. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.03.007>
- Christoffersen, P. F. (2012). *Elements of financial risk management* (2nd ed.). Academic Press (Elsevier). <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20150-8>

- Fisher, M., & Kraus, D. (2018). Pricing complexity options. [*arXiv preprint arXiv:1505.03587*].
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press. <http://www.deeplearningbook.org>
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- He, Y., Huang, X., Ma, L., Luo, Q., & Wu, F. (2014). Enhancing particle swarm optimization with random mutation mechanism for option pricing. *Journal of Computational Finance*, 18(1), 23–37. [doi.org/JCF.2014.172](https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7)
- Henarvar, M., Mirzazadeh, S., & Sadeghi, A. R. (2020). Solving a dual-channel supply chain pricing and scheduling problem with price competition using particle swarm optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106188. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106188>
- Heston, S. L. (1993). A closed-form solution for options with stochastic volatility with applications to bond and currency options. *The Review of Financial Studies*, 6(2), 327–343. <https://doi.org/10.1093/rfs/6.2.327>
- Hull, J. C. (2018). *Options, futures, and other derivatives* (10th ed.). Pearson.
- Hutchinson, J. M., Lo, A. W., & Poggio, T. (1994). A nonparametric approach to pricing and hedging derivative securities. *The Review of Financial Studies*, 7(4), 523–551. <https://doi.org/10.1093/rfs/7.4.523>
- Jha, G. K., Kumar, S., Prasain, H., & Thulasiraman, P. (2009). Parameter estimation for Black–Scholes model using particle swarm optimization. *International Journal of Computer Applications*, 1(20), 1–7.
- Kafieh, A., Hosseini, F., & Zahedi, R. (2024). A hybrid particle swarm optimization algorithm with opposition-based learning and exploratory mutation for financial modeling. *Expert Systems with Applications*, 248, 121492. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.121492>
- Kaviyari, N., Fazelian, M. R., & Soleimani, H. (2017). A review of particle swarm optimization algorithm and its applications in engineering. *Industrial Engineering & Management Quarterly*, 32(2), 79–96. <https://doi.org/10.22060/ijie.2017.12754.2631> [In Persian].
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942–1948). <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Kimiagari, A. M., Hajizadeh, E., Dastkhan, H., & Ramezani, M. (2017). Presenting a new hybrid model for option pricing. *International Journal of Industrial Engineering and Production Management*, 28(1), 87–99. <https://ijiepm.iust.ac.ir/article-1-1315-fa.html> [In Persian].
- Lee, C., Lee, C., Shim, J., & Joon, T. (2007). Binary particle swarm optimization for pricing European options. *Applied Mathematics and Computation*, 189(2), 1236–1246. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.12.008>
- Merton, R. C. (1973). Theory of rational option pricing. *Bell Journal of Economics and Management Science*, 4(1), 141–183. <https://doi.org/10.2307/3003143>
- Merton, R. C. (1976). Option pricing when underlying stock returns are discontinuous. *Journal of Financial Economics*, 3(1–2), 125–144. [https://doi.org/10.1016/0304-405X\(76\)90022-2](https://doi.org/10.1016/0304-405X(76)90022-2)
- Nagel, S. (2012). Evaporating liquidity. *Review of Financial Studies*, 25(7), 2005–2039. [doi.org/hhs024](https://doi.org/10.1093/rfs/25.7.2005)
- Naghdi, S., Esmaceli, J., & Mohammadzadeh Moqaddam, M. B. (2019). Explaining macro accounting with emphasis on the importance of accounting data in inflation modeling. *Journal of Accounting Knowledge*, 10(4), 545–582. <https://doi.org/10.22103/jak.2019.13753.2946> [In Persian].
- Nesbi, A., Maleki, B. R., & Rezaei, R. (2016). Estimation of European option pricing model parameters under stochastic volatility using loss function approach. *Financial Engineering and Securities Management*, 7(28), 91–115. <https://sanad.iau.ir/Journal/fej/Article/1079398> [In Persian].
- Peymani Foroshani, K., Dehghan Dehnavi, M. A., & Kouhkan, M. (2024). Valuation of options based on a modular neural network. *Financial Research Journal*, 26(4), 904–939. <https://doi.org/10.1007/FRJ.1007573> [In Persian].
- Prasain, A., Jha, R., & Thulasiraman, S. (2010). Parallel particle swarm optimization for European option pricing. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 22(16), 2271–2288. doi.org/10.1002/cpe.1599
- Sadaei Jahromi, M. (2022). Option valuation using machine learning algorithms: Evidence from the Tehran Stock Exchange. *Financial Research Journal*, 24(2), 59–80. doi.org/10.22067/JFR.2022.75412.1154 [In Persian].
- Seifi, M. R., Ahmadi, A., & Colleagues. (2023). Comparison of pricing errors between Barles–Soner and Buckstein–Howison models using neural networks: Evidence from the S&P 500 option market. *Journal of Accounting and Finance Knowledge*, 10(3), 115–136. doi.org/10.22108/JAF.2023.13952.1331 [In Persian].
- Sharma, S., Thulasiram, R., & Thulasiraman, S. (2013). Normalized particle swarm optimization and its application to option pricing using graphics processing unit (GPU). *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 25(10), 1402–1421. <https://doi.org/10.1002/cpe.2939>
- Wu, J. (2019). Review of option pricing methods and their applications in emerging markets. *International Journal of Finance & Economics*, 24(1), 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijfe.2018.12.001>