*Quarterly Journal of Economics and Modelling, Shahid Beheshti University*
Vol. 15, No. 2, Summer 2024, 121-148.
ecoj.sbu.ac.ir
DOI: 10.48308/jem.2025.237458.1952

# Forecasting the Exchange Rate Using Meta-Heuristic Algorithms

**Fariba Abbasi*[1] | Ali Kiani Rad[2]**

[1]. Researcher in Agricultural Economics, Agricultural Planning, Economics and Rural Development Research Institute, Tehran, Iran, (Corresponding Author), Email: f.abbasi25@gmail.com
[2]. Associate Professor of Agricultural Economics, Agricultural Planning, Economics and Rural Development Research Institute, Tehran, Iran, Email: a.kianirad@agri-peri.ac.ir

**Article Info.**

**Article type:**
Research Article

**Article history:**
**Received**:
05-11-2024
**Received in revised**:
22-01-2025
**Accepted**:
01-04-2025
**Published Online**:
02-04-2025

**Keywords**:
Unofficial Exchange Rate, Forecast, Meta-Heuristic Algorithm.

**JEL**:
C53, E38, E43, F31.

**ABSTRACT**

Adopting appropriate exchange rate policies in developing countries is always controversial. In order to prevent losses from changes in exchange rates, monetary policymakers have always sought to find a suitable method for forecasting exchange rates. However, the political and economic characteristics of the exchange rate have caused complex and nonlinear behavior, indicating the use of better models in forecasting. In this study, the optimal exchange rate model was simulated using metaheuristic algorithms. For this purpose, from 257 monthly data of exchange rate, inflation rate, OPEC basket oil price and gold coin price during the period from December 2000 to March 2021, the data were first divided into two groups of training and testing. Each of the metaheuristic algorithms was run for the next 24 months with the parameters related to each algorithm. In each run, the value of the error coefficients was selected after reaching the stop criterion and finally the best algorithm was selected based on the highest convergence. The results show that the particle swarm algorithm had very good convergence in low number and iteration and had a more accurate performance in forecasting the exchange rate. Given that metaheuristic algorithms are capable of optimizing various processes such as time management, resources, and facilitating daily planning, this study suggests that policymakers use this algorithm to predict the exchange rate before planning in sectors.

**Cite this article:** Abbasi, F., & Kiani Rad, A. (2024). Forecasting the Exchange Rate Using Meta-Heuristic Algorithms. *Journal of Economics and Modelling*, 15(2), 121-148. DOI: 10.48308/jem.2025.237458.1952

© The Author(s). Publisher: Shahid Beheshti University Press

دانشگاه شهید بهشتی، فصلنامهٔ اقتصاد و الگوسازی، دوره ۱۵، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ۱۴۸-۱۲۱.
Shahid Beheshti University, Quarterly Journal of Economics and Modelling, Vol. 15, No. 2, Summer 2024, 121-148.

# پیش‌بینی نرخ ارز با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

**فریبا عباسی*[۱] | علی کیانی‌راد[۲]**

۱. پژوهشگر اقتصاد کشاورزی، مؤسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی، اقتصاد کشاورزی و توسعه روستایی، تهران، ایران، رایانامه: f.abbasi25@gmail.com
۲. دانشیار اقتصاد کشاورزی، مؤسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی، اقتصاد کشاورزی و توسعه روستایی، تهران، ایران، رایانامه: a.kianirad@agri-peri.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
مقاله پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۸/۱۵
**تاریخ ویرایش:** ۱۴۰۳/۱۱/۰۳
**تاریخ پذیرش :** ۱۴۰۳/۱۲/۱۱
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

**واژه‌های کلیدی:**
پیش‌بینی، نرخ ارز، الگوریتم فراابتکاری، ایران.

**طبقه‌بندی JEL:**
C53, E43, E38, F31.

**چکیده**

اتخاذ سیاست‌های نرخ ارز مناسب در کشورهای در حال توسعه، همواره بحث برانگیز است. سیاست‌گذاران پولی به منظور جلوگیری از زیان‌های ناشی از تغییرات نرخ ارز، درصدد یافتن روشی مناسب برای پیش‌بینی نرخ ارز بوده‌اند. حال آنکه ویژگی‌های سیاسی، اقتصادی نرخ ارز باعث رفتار پیچیده و غیرخطی آن شده و نشان از عملکرد بهتر این الگوها در پیش‌بینی است. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری الگوی بهینه نرخ ارز شبیه‌سازی شد. بدین منظور از ۲۵۷ داده ماهانه نرخ ارز، نرخ تورم، قیمت نفتی سبد اوپک و نرخ سکه تمام بهار آزادی در بازه زمانی آذرماه ۱۳۷۹ لغایت اسفندماه ۱۴۰۰، استفاده گردید. ابتدا داده‌ها به دو دسته آموزش و آزمایش تقسیم شدند. هر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری برای ۲۴ ماه آینده از پارامترهای مربوط به هر الگوریتم اجرا شد. مقادیر ضرایب خطا، پس از رسیدن به ملاک توقف ثبت و نهایتا بهترین الگوریتم، بر اساس بیشترین همگرایی انتخاب شد. نتایج نشان داد الگوریتم ازدحام ذرات در تعداد و تکرار پایین همگرایی بسیار مطلوبی داشته و دارای عملکرد دقیق‌تری در پیش‌بینی نرخ ارز است. با توجه به این که الگوریتم‌های فراابتکاری قادر به بهینه‌سازی فرآیندهای مختلف مانند مدیریت زمان، منابع و تسهیل کردن برنامه ریزی روزانه هستند، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گزاران از این الگوریتم جهت پیش‌بینی نرخ ارز استفاده کنند.

**استناد**: عباسی، فریبا؛ کیانی‌راد، علی (۱۴۰۳). پیش‌بینی نرخ ارز با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری. *اقتصاد و الگوسازی*، (۲)۱۵، ۱۴۸-۱۲۱. DOI: 10.48308/jem.2025.237458.1952

ناشر: دانشگاه شهید بهشتی.
© نویسندگان.

### ۱. مقدمه

تحولات در نظام‌های ارزی و گسترش تجارت جهانی در دهه‌های گذشته، سبب شده است تا مطالعات در حوزه نرخ ارز، مورد توجه محققان و تصمیم گیران اقتصادی قرار گیرد.

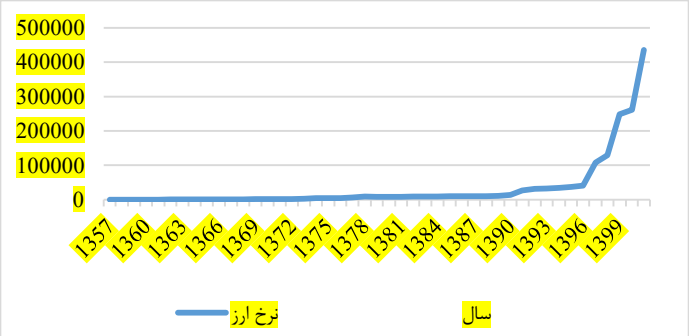
چالش اصلی میان اقتصاددانان کشور بر سر تأثیر کاهش نرخ سود علی‌الحساب بانکی بر نرخ تورم است. برخی صاحبنظران معتقدند که با کاهش نرخ سود علی‌الحساب بانکی، هزینهٔ تمام شدهٔ کالاها و خدمات، کاهش و ثانیاً سرمایه‌گذاری و در نتیجه تولید افزایش می‌یابد و این هر دو کاهش تورم را به دنبال دارد و زمینهٔ اشتغال پایدار را فراهم می‌آورد (داودی و ذوالقدری، ۱۳۹۰). آگاهی یافتن از تغییرات آتی نرخ ارز، می‌تواند مقامات پولی را جهت طراحی یک سیاست پولی کارا به منظور تثبیت قیمت‌ها و افزایش سطح اشتغال، مهیا نماید (بافنده ایمان دوست و همکاران، ۱۳۸۸). اساساً نرخ ارز یکی از شاخص‌های اساسی و بنیادین در اقتصاد هر کشور بوده، چراکه این عامل، اولاً از عوامل اصلی در تعیین ارزش برابری پول ملی یک کشور در مقابل کشورهای دیگر بوده، ثانیاً این عامل مبیین شرایط داخلی اقتصادی کشورها نیز است. نقش نرخ ارز در نظام‌های اقتصادی، به خصوص در کشورهای در حال توسعه انکارناپذیر است. تحقیقات پیشین انجام شده در زمینه بررسی اثر تغییرات نرخ ارز بر شاخص‌های کلان اقتصادی و بازارهای مالی، بیانگر وجود اثرات منفی، نوسانات این متغیر بر سایر متغیرها بوده است.

علاوه‌براین، نرخ ارز یک نوع دارایی بوده که در صورت داشتن اطلاع به هنگام از شرایط اقتصادی و اتخاذ سیاست مناسب، می‌تواند افزایش یابد. از سوی دیگر، صاحبان شرکت‌ها و سرمایه‌گذاران به منظور تصمیم‌گیری در مورد چگونگی سرمایه‌گذاری دارایی‌های خود علاقه‌مندند از تغییرات آتی نرخ ارز آگاهی داشته باشند. از این‌رو، پیش‌بینی نرخ ارز همواره و طی سال‌های متمادی در کانون توجه بسیاری از سیاستگذاران، اقتصاددانان و عاملان اقتصادی بوده است. در کشورهای درحال توسعه، که تولید وابستگی زیادی به مواد اولیه، واسطه‌ای، و سرمایه‌ای خارجی دارد، تأثیرات این

متغیر شدیدتر و ماندگارتر است. به همین علت، شناسایی عوامل مؤثر در نرخ ارز و پیش‌بینی رفتار نرخ ارز از موضوع‌های حائز اهمیت اقتصاد است. در کشوری مانند ایران که به علل مختلف اقتصادی، سیاسی، مالی، و روانی، نرخ ارز با نوسانات زیادی طی سال‌های گذشته همراه بوده است، اقتصاد وابستگی شدیدی به ارز و درآمدهای ارزی دارد و این موجب شده است که مسائل و مشکلات کشور در ابعاد اقتصادی به نحو قابل ملاحظه‌ای با آن ارتباط یابد. از آنجا که بخش اعظم درآمدهای ارزی کشور از طریق فروش نفت خام تأمین می‌شود و نیز منبع اصلی درآمدهای دولت نیز از طریق فروش نفت خام حاصل می‌گردد، بنابراین تغییرات نرخ ارز می‌تواند تأثیرات بسیار زیادی بر ساختار اقتصادی کشور و بازارهای داخلی بگذارد. از جمله تأثیرات آن می‌توان به اثرات آن روی تولید، نقدینگی، تورم، کسری بودجه، صادرات و واردات اشاره کرد. بنابراین، با توجه به موارد گفته شده جای تعجب نیست که حجم عظیمی از ادبیات اقتصادی در حوزه پیش‌بینی متغیرهای اساسی اقتصاد، به پیش‌بینی نرخ ارز اختصاص یافته باشد.

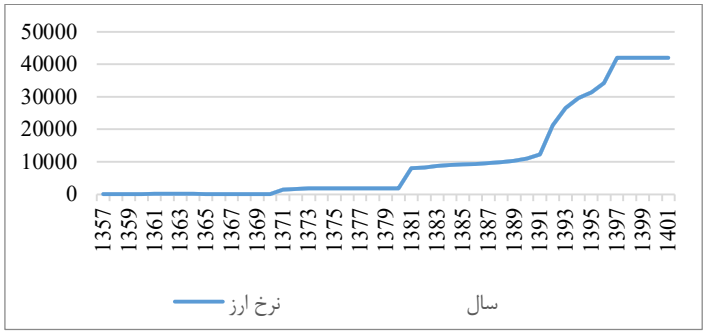
نگاهی به سیر تحولات نرخ ارز در ۴۵ سال گذشته نشان می‌دهد که اقتصاد ایران با سه دوره بحرانی (دوران قبل انقلاب، دوران بعد انقلاب و جنگ تحمیلی، دوران بعد از جنگ و تحریم) مواجه بوده است، این درحالی‌است که میزان افزایش نرخ ارز در هر یک از سه دوره یکسان نبوده است. با توجه به این که نوسانات نرخ ارز یکی از موانع پیش‌برنده بسیاری از مبادلات و مراودات بین‌المللی است، آگاهی از تغییرات نرخ ارز می‌تواند مقامات پولی را برای طراحی یک سیاست پولی کارآ به منظور تثبیت قیمت‌ها و افزایش سطح اشتغال مهیا کند. بنابراین با توجه به تغییرات فراوان نرخ ارز در ایران طی ۴۵ سال اخیر و علاوه بر آن، وابستگی درآمدهای ارزی به صادرات نفت خام و وابستگی بودجه‌های سنواتی به نرخ ارز، تعیین نرخ ارز و پیش‌بینی نوسانات آن ضمن کاهش ریسک نوسانات نرخ ارز به برنامه‌ریزی بهتر در بودجه‌های سنواتی، واردات مواد اولیه مورد نیاز کشور و صادرات غیرنفتی منجر می‌شود (شاه حسینی و رضایی،۱۳۹۷). نمودار

(۱) و (۲) نشان دهنده این امر است. از این‌رو، برای رفع مشکلات اقتصاد در ایران از جمله تورم و به منظور نیل به حفظ تعادل اقتصاد داخلی و خارجی همراه با رشد اقتصادی، هماهنگی بین سیاست‌های پولی، مالی و ارزی و توجه به تأثیر تغییر قیمت‌ها و نرخ ارز روی اقتصاد داخلی ضروری می‌نماید.




**نمودار (۱). تغییرات نرخ ارز غیررسمی در ایران سال‌های ۱۳۵۷-۱۴۰۱**

منبع: بانک مرکزی، ۱۴۰۲




**نمودار (۲). تغییرات نرخ ارز رسمی در ایران سال‌های ۱۳۵۷-۱۴۰۱**

منبع: بانک مرکزی، ۱۴۰۲

تفاوت مطالعه حاضر با سایر مطالعات داخلی در زمینه پیش‌بینی، در این است که برای الگوی پیش‌بینی نرخ ارز در هیچ یک از مطالعات داخلی از الگوریتم‌های فرابتکاری

استفاده نشده است. بنابراین با توجه به این که در مطالعاتی که تاکنون در زمینه پیش‌بینی نرخ ارز در کشور انجام شده، از روش‌های شبکه عصبی و الگوهای هیبریدی استفاده شده است ولی نتایج چندان سازگاری با یکدیگر نداشته‌اند و از آنجا که الگوریتم‌های فراابتکاری نوعی جدید از روش‌های دقیق، منطقی و مرحله به مرحله حل مسائل پیش‌بینی هستند، در این مطالعه علاوه بر معرفی یک تکنیک ترکیبی فراابتکاری به منظور پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر نرخ ارز در شرایط محدودیت داده‌ها، از متغیرهای توضیحی متفاوت استفاده می‌شود.

به طور کلی از نتایج مطالعات مرور شده می‌توان دریافت، الگوهایی که بر پایه الگوهای غیرخطی و بخصوص شبکه عصبی مصنوعی بنا شده‌اند نتایج مطلوب‌تری نسبت به الگوهای خطی داشته‌اند. از سوی دیگر انتخاب الگوریتم یادگیری و توقف الگوریتم در نقطه بهینه محلی و همچنین نیاز به نمونه‌های آموزشی فراوان از محدودیت‌های پیش روی شبکه‌های عصبی است. از این‌رو در این مطالعه برای نخستین بار در ادبیات مربوط به پیش‌بینی نرخ ارز از تکنیک الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است. چرا که در این تکنیک نقاط ضعف هر یک از تکنیک‌های الگوریتم‌های فراابتکاری پوشش داده می‌شود. عدم نیاز به فرم تبعی خاص شبکه‌ه‌ای عصبی و جستجوی نقاط بهینه سراسری الگوریتم‌ه‌ای فراابتکاری در یادگیری شبکه با داده‌ه‌ای محدود از مهمترین نقاط قوت این تکنیک خواهد بود.

## ۲. ادبیات نظری و پیشینه پژوهش

نخستین گام در انجام پیش‌بینی یکسری از داده‌ها، بررسی قابلیت پیش‌بینی پذیری آن است. از این‌رو بررسی این نکته که "آیا تغییرات قیمتی در بازار ارز با استفاده از اطلاعات در دسترس و عمومی قابل پیش‌بینی است؟"، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر، نکته حائز اهمیت در کلیه الگوسازی‌های اقتصادی، توجه به مبانی

نظری است که بر اساس آن به انجام الگوسازی‌ها پرداخته می‌شود. از این‌رو، پرداختن به مبانی تئوریک مقوله پیش‌بینی، نیز ضروری می‌نماید.

مطالعات مختلفی در زمینه الگوسازی و پیش‌بینی ارز انجام شده است، با توجه به این نکته، به ذکر مهمترین مطالعات داخلی و بین‌المللی که به پیش‌بینی نرخ ارز بر پایه روش‌های به کار گرفته شده در این پژوهش پرداخته‌اند، خواهیم پرداخت.

### ۲-۱. پیشینه پژوهش

موسی‌پور ماموداں و همکاران[1] (۲۰۲۳) با هدف پیش‌بینی بازارهای مالی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر شبکه عصبی ترکیبی به مطالعه بازار جهانی طلا پرداختند. براین اساس سیگنال‌های ثبت شده به مدت ۱۰ ماه تجزیه و تحلیل گردید. سپس یک شبکه عصبی پیچشی و یک واحد جریان ورودی دو طرفه را که فراپارامترهای آن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کرم شب‌تاب بهینه شده اند، ترکیب و در نهایت برای تعیین و انتخاب تأثیر گذارترین متغیرها بر روی هدف، از الگوریتم بهینه‌سازی شعله پروانه استفاده کردند. نتایج نشان داد الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر شبکه عصبی پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک ابزار پشتیبانی تصمیم برای سرمایه گذاران برای رسیدگی و کنترل عدم قطعیت‌های عظیم در بازارهای مالی و فلزات گرانبها مفید باشد.

شاهواروقی فراهانی و همکاران[2] (۲۰۲۰) با استفاده از الگوریتم فراابتکاری پروانه، شامپانزه، ازدحام ذرات و سایر الگوریتم‌های فراابتکاری به پیش‌بینی نرخ بهره در ایران پرداختند. در این مطالعه از ۱۷ متغیر که مهمترین آن‌ها، متغیر قیمت نفت، قیمت، قیمت مسکن بود استفاده شد. نتایج نشان داد الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ بهتر از سایر

[1]. Mousapour Mamoudan et al.
[2]. Shahvaroughi Farahani et al.

الگوریتم‌ها همراه با خطای کمتر عمل کرده است. برادلی و آبسلوم[1] (۲۰۱۹) با استفاده از الگوریتم فراابتکاری شبکه‌های عصبی پیشخور قیمت بهینه سهام را پیش‌بینی کردند. در این مقاله طراحی و پیاده‌سازی یک الگوی شبکه عصبی پیش‌خور آموزش‌دیده با جستجوی ارگانیسم‌های همزیست ترکیبی برای پیش‌بینی موثر و دقیق قیمت سهام پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که ارگانیسم‌های همزیست جست و جوی الگوی شبکه عصبی پیش‌خور آموزش‌دیده عملکرد پیش‌بینی بهتری را در مقایسه با الگوهای دیگر نشان می‌دهد. مطالعه عملکرد نشان داد که سه الگوی شبکه عصبی پیش‌خور آموزش‌دیده فراابتکاری، صلاحیت پیش‌بینی امیدوارکننده‌ای برای حل مسائل داده‌های سری زمانی غیرخطی با ابعاد بالا را دارند، که بدست آوردن این پیش‌بینی‌ها توسط الگوهای سنتی دشوار است.

علی‌زاده و همکاران[2] (۱۴۰۱) به پیش‌بینی شاخص‌های مالی شرکت‌ها با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری تخمین زن میانگین شرطی و ژنتیک برای سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۹۷ پرداختند. نتایج نشان داد روش تخمین زن میانگین شرطی از دقت و توانایی بسیار بالایی در الگوسازی برخوردار است. همچنین استفاده از الگوریتم ژنتیک به صورت تلفیقی دقت پیش‌بینی را افزایش داد. فدایی و همکاران[3] (۱۳۹۹) به پیش‌بینی شوک منفی قیمت سهام مبتنی بر رویکرد فراابتکاری، براساس داده‌های مرتبط با ۹۶ نسبت مالی ۱۴۰ شرکت پذیرفته شده در بورس اوراق بهادار تهران طی بازه زمانی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ پرداختند. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. در نهایت ۸ نسبت مالی اثرگذار برای پیش‌بینی شوک‌ها در طی یکسال انتخاب گردید. نتایج حاکی از آن است که متغیرهای استخراجی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، به همراه الگوریتم یادگیری ماشین بردار پشتیبان، نتیجه بهتری را برای

1. Bradley & Absalom
2. Alizadeh et al.
3. Fadai et al.

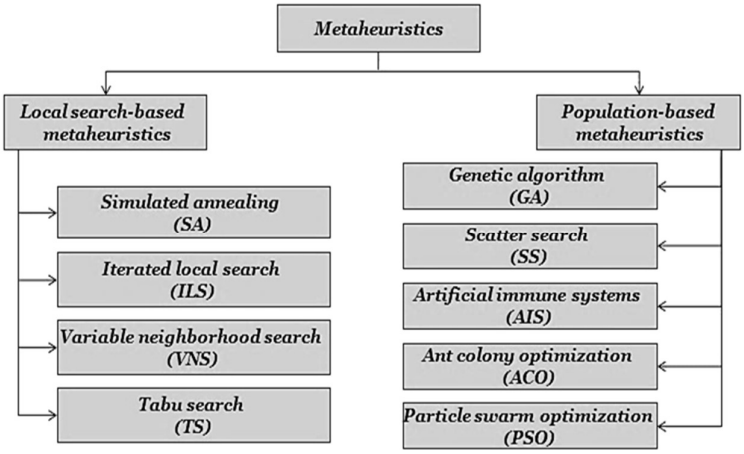
پیش‌بینی شوک‌ها و تعداد آن‌ها دارا هستند.

## ۳. روش پژوهش

روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی نرخ ارز مورد استفاده قرار می‌گیرد که الگوهای شبکه عصبی مصنوعی ترکیبی فراابتکاری یکی از آن‌ها است. یکی از مهمترین الگوهای الگوریتمی، الگوریتم‌های فراابتکاری هستند که ترکیبی از شبکه‌های عصبی مصنوعی با سایر الگوهای الگوریتمی هستند. در این پژوهش سعی شده است روشی مناسب برای شبیه‌سازی پیش‌بینی نرخ ارز ارائه شود. برای هر متغیر ورودی، ۲۵۷ متغیر اقتصادی مانند قیمت نفت، قیمت سکه طلا، نرخ ارز غیررسمی (دلار آمریکا)، نرخ تورم ایران در نظر گرفته شده است. این متغیرهای اقتصادی، موضوعات کلیدی محققان بوده است، به همین دلیل با توجه به بررسی ادبیات موضوع و به استناد الگوی ارائه شده در مطالعات انجام‌شده شریف‌مقدم و همکاران (۱۳۹۷)، خاشعی و همکاران (۱۳۹۲)، بافنده و همکاران (۱۳۸۸)، درگاهی و انصاری (۱۳۸۷) و زراءنژاد و رضایی (۱۳۸۷) داده‌های فوق در این پژوهش انتخاب گردید.

### الف) الگوهای الگوریتم‌های فراابتکاری

الگوریتم‌های فراابتکاری یکی از ابزارهایی است که در یکی دو دهه گذشته بسیاری از محققین بر روی آن تمرکز کرده اند. در یک شمای کلی می‌توان انواع الگوریتم‌های متاهیوریستیک را به صورت زیر دسته‌بندی نمود.




**شکل (۱). دسته‌بندی انواع روش‌های فراابتکاری**

منبع: صادقی و همکاران (۱۳۹۰)

مطابق این شکل، روش‌های فراابتکاری به دو دسته تقسیم می‌شود. نوع دیگر روش‌های فراابتکاری شامل الگوریتم‌هایی می‌شود که در آن در هر تکرار تعداد زیادی جواب تولید می‌شود. برخلاف دسته اول، سعی می‌شود تا با ایجاد جواب‌های متعدد و غیر یکسان با یکدیگر، بهترین جواب ممکن پیدا شود. ویژگی مشترک الگوریتم‌های فراابتکاری، استفاده از مکانیزم‌های خروج از بهینه محلی است (پورغراوی، ۱۳۹۵).

انواع الگوریتم‌های استفاده شده در این پژوهش شامل الگوریتم ژنتیک (عبداللهی و خوزین،۱۳۹۴)، الگوریتم ازدحام ذرات (رمضانی موزیرجی و یعقوبی، ۱۳۸۸)، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (زارع مهرجردی و همکاران، ۱۳۹۰)، الگوریتم کلونی مورچگان (شرکت و همکاران، ۱۳۹۳)، الگوریتم تکامل تفاضلی (پرایس و همکاران[1]، ۲۰۰۵)، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (رجبیون[2]، ۲۰۱۱)، الگوریتم کرم شب‌تاب (رضوی و احمدی شادمهری، ۱۳۹۴)، الگوریتم جستجوی گرانشی (امامی میبدی و همکاران، ۱۳۹۲)،

[1]. Price et al.
[2]. Rajabioun

الگوریتم کلونی زنبورعسل (کارابوگا و باستورک[1]، ۲۰۰۷)، الگوریتم رقابت استعماری (معلم و همکاران، ۱۳۹۷).

**۱) الگوریتم ژنتیک**

الگوریتم ژنتیک روش بهینه‌سازی عددی است که بر پایه اصول داروین بوده است. (سپهری و همکاران، ۱۳۹۶). در این پژوهش برای انتخاب کروموزم‌های والد از مکانیزم انتخابِ چرخ‌گردان یا رولت، استفاده شده است. m اندازه جمعیت و $P_{sel}(1)$ نسبت برازندگی i به مجموع برازندگی است:

$$[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m]: \alpha_m = 1 \qquad (۱)$$

$$i = 1, \dots . m \qquad \alpha_i = \sum_1^i P_{sel}(i) \qquad (۲)$$

این اپراتور تحت مقدار احتمالی ثابت و کوچک Pm، روی دو کروموزوم حاصل از مرحله ترکیب اعمال می‌شود. برای هر ژن از هر کروموزوم، یک عدد تصادفی تولید می‌شود، اگر عدد تصادفی کوچکتر یا برابر با Pm بوده، مقدار ژن تغییر خواهد کرد، در غیر این صورت مقدار ژن ثابت باقی خواهد ماند. برای محاسبه احتمال جهش از فرمول زیر استفاده می‌شود: (عبداللهی و خوزین، ۱۳۹۴؛ رضایی و رنجبران، ۱۳۹۳).

$$P_m = \frac{1}{\alpha \times \text{تعداد ژن}} \quad , \quad 1/5 \le \alpha \le 2 \qquad (۳)$$

(عبداللهی و خوزین، ۱۳۹۴).

**۲) الگوریتم ازدحام ذرات**

در این الگوریتم موقعیت هر عامل با s و همچنین سرعت آن با v نمایش داده می‌شود (پولی و کندی[2]، ۲۰۰۷). موقعیت فعلی s، سرعت فعلی v، pbest، gbest، این

[1]. Karaboga & Basturk
[2]. Poli & Kennedy

اصطلاحات می‌تواند با مفهوم سرعت بیان شود. سرعت هر عامل را می‌توان از اطلاعات زیر به دست آورد:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 rand_1 \times \left(pbest_i - s_i^k\right) + c_2 rand_2 \times (gbest - s_i^k) \quad (۴)$$

که در آن، vik سرعت عامل iام در تکرار kام، w تابع وزن، cj یک ضریب وزنی است. Rand یک عدد تصادفی بین صفر و یک است. $s_i^k$ موقعیت فعلی عامل i در تکرار kام، pbesti و pbest نقطه i است و gbest گروه است. موقعیت فعلی نقطه جستجو در فضای جواب را می‌توان با معادله روبرو اصلاح کرد:

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (۵)$$

(رمضانی موزیرجی و یعقوبی، ۱۳۸۸).

**۳) الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده**

در روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده، به صورت پی در پی از جواب جاری به یکی از همسایه‌های آن انتقال صورت می‌گیرد. این سازوکار توسط زنجیره مارکوف به صورت ریاضی قابل توصیف است (جعفری و همکاران،۱۳۹۱).

کیفیت جواب‌های الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده نسبت به پارامترهای کنترلی حساسیت بالایی دارد و تعیین پارامترهایی که جواب‌های خوب را ایجاد نماید، مشکل است (زارع مهرجردی و همکاران، ۱۳۹۰).

**۴) الگوریتم کلونی مورچگان**

در الگوریتم مجموعه مورچگان مجموعه‌ای از مورچه‌های مصنوعی به صورت احتمالی و در تکرارهای متعدد به حل مسئله می‌پردازند (عراقی و عشقی، ۱۳۸۷). با افزایش مرتبه زیر ساختار (زیر گراف) مورد نظر، اطلاعات ساختاری مهم‌تری بدست می‌آید (لیبن-

نوول و کلینبرگ[1]، ۲۰۰۷).

احتمال حرکت مورچه k ام از گروه iام از رابطه (۱۰-۳) بدست می‌آید:

$$P_{ij}^{k}=\frac{\left(\frac{1}{\tau_{ij}}\right)^{\alpha}}{\Sigma_{l\epsilon\ \ {}_{i}^{k}}\left(\frac{1}{\tau_{ij}}\right)^{\alpha}} \qquad (۶)$$

در رابطه (۸)، $\tau$ میزان فرمون را در آن یال نشان می‌دهد. مقدار $\alpha$ یک ضریب ثابت است که در این مقاله آن را برابر با یک در نظر گرفته‌ایم. رابطه فوق با مقدار فرمون رابطه عکس دارد. می‌توان با دادن ضریب منفی به فرمون‌های آزاد شده، توسط مورچه‌ها این رابطه را به صورت رابطه مستقیم تبدیل کرد (شرکت و همکاران، ۱۳۹۳).

**۵) الگوریتم تکامل تفاضلی**

تعداد متغیرهای مسئله در این الگوریتم با D نشان داده می‌شوند. هر یک از این متغیرها دارای یک حد بالا و پایین هستند. جمعیت اولیه در اندازه NP در D بصورت تصادفی مطابق رابطه (۷) تشکیل می‌شود.

$$X_{io}=X_{i\,min}+round\left(\delta_i.\left(X_{i\,max}-X_{i\,min}\right)\right)i=1,2,\dots,NP \qquad (۷)$$

که $\delta_i$ عددی تصادفی در بازه [۰،۱) و $X_{i\,min}$ $X_{i\,max}$ حدود بالا و پایین متغیرهای مسئله و NP تعداد اعضاء هستند. در این مقاله از رندوم برای انجام جهش به صورت رابطه (۸) استفاده شده است (دشتی و همکاران، ۱۳۹۶).

$$Z_{i,g}=X_{best,g}+F.\left(X_{r1,g}-X_{r2,g}+X_{r3,g}-X_{r4,g}\right) \qquad (۸)$$

که در این رابطه F فاکتور معیار نامیده می‌شود. Xrها اعضای انتخابی به صورت تصادفی هستند. همچنین $X_{best}$ بهترین عضو جمعیت حاضر است. برای هر متغیر از هر عضو

[1]. Liben-Nowell & Kleinberg

جمعیت یک عدد رندوم K در بازه [D،۱ ] و یک عدد تصادفی u در بازه [۰،۱] انتخاب شده، جهش مطابق با رابطه (۱۰) انجام می‌گیرد که j شماره هر متغیر از i امین عضو جمعیت است. همچنین ضریب CR عددی بین ۰ و ۱ انتخاب می‌شود.

$$If\ u \leq CR\ or\ j = K \quad (۹)$$

$$then Z_{i,j} = X_{r1,j} + F\left(X_{r3,j} - X_{r2,j}\right) \quad (۱۰)$$

$$Z_{i,j} = X_{i,j} \quad (۱۱)$$

در این مرحله، نوزادها و والدها با توجه به تابع هدف، ارزش دهی می‌شوند و درصورتی که نوزاد، ارزشی بیش از والد داشته باشد، جایگزین والد می‌گردد در غیر این صورت، والد خود به همراه نسل بعدی به مرحله بعد می‌رود.

$$Z_{i,g+1} = argmax(f\left(Z_{i.g}\right), f\left(Z_{i,g} + 1\right) \quad (۱۲)$$

(پرایس و همکاران، ۲۰۰۵).

**۶) الگوریتم بهینه‌سازی فاخته**

این الگوریتم در سال ۲۰۱۱ توسط یک مهندس ایرانی به نام رجبیون معرفی شده است و الهام گرفته از روش زندگی پرنده‌ای به نام فاخته است (بیگی و صالحی، ۱۳۹۲).

$$ELR = \beta \times (Var_{hi} - Var_{lo}) \times \frac{\text{مجموع تخمگذاری هر فاخته}}{\text{تعداد تخمگذاری فاخته در هر مرحله}} \quad (۱۳)$$

$Var_{hi}$ حد بالای متغیر، $Var_{lo}$ حد پایین متغیر و $\beta$ متغیری که توسط آن حداکثر $ELR$ تنظیم می‌شود. (Rajabioun, 2011).

**۷) الگوریتم کرم شب‌تاب**

در ساده‌ترین حالت، شدت نور $I(r)$ با مسافت r به طور پیوسته و نمایی تغییر می‌کند.

بیان ریاضی تغییرات شدت در رابطه (۱۴) آمده است:

$$I = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (۱۴)$$

$I_0$ شدت نور اولیه و $\gamma$ ضریب جذب نور است. میزان جذب کرم شب‌تاب با شدت نوری که از کرم‌های شب‌تاب اطراف ساطع می‌شود، متناسب است. اکنون می‌توان مقدار جذابیت یک کرم شب‌تاب $\beta$ را طبق رابطه (۱۵) تعریف کرد:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (۱۵)$$

(رضوی و احمدی شادمهری، ۱۳۹۴).

**۸) الگوریتم جستجوی گرانشی**

صورت کلی این الگوریتم تقریباً شبیه به قوانین طبیعت است و به این‌صورت تعریف می‌شود که، سیستم به صورت مجموع‌های از m جرم تصور می‌شود. موقعیت هر جرم می‌تواند جوابی برای مسئله باشد. موقعیت بعد d از جرم i با $X_i^d(t)$ نشان داده می‌شود: (امامی میبدی و همکاران، ۱۳۹۲).

$$X_i = \left(X_i^1, \ldots, X_i^i, \ldots, X_i^n\right) for\ i - 1,2,3, \ldots m \quad (۱۶)$$

(امامی میبدی و همکاران، ۱۳۹۲؛ راشدی و همکاران[1]، ۲۰۰۹).

**۹) الگوریتم کلونی زنبورعسل**

به طور کلی در الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی سه عامل حل مسئله وجود دارد، زنبورهای دیده‌بان یا زنبورهای دیده‌ور[2]، زنبورهای پیشاهنگ یا زنبورهای کارگر[3]،

[1]. Rashedi at al.
[2]. Scout
[3]. Employee

زنبورهای تماشاگر یا ناظر[1] که به ترتیب به حل مسئله می‌پردازند (باباخانی و همکاران، ۱۳۹۸).

$$P_i = \frac{Fitness\ (Si)}{\sum_{n=1}^{SN} Fitness\ (SN)} \quad (۱۷)$$

در این رابطه $Fitness\ (Si)$ مقدار شایستگی جواب $Si$ است که متناظر با میزان شهد منبع غذایی در مکان iام است و $SN$ تعداد منابع غذایی است که مساوی با تعداد زنبورهای کارگر یا ناظر است. به منظور ایجاد موقعیت غذای جدید، با توجه به موقعیتی که در حافظه است، کلونی زنبور مصنوعی از عبارت زیر استفاده می‌کند:

$$V_{ij} = (X_{ij} - X_{kj})\emptyset_{ij} + X_{ij} \quad (۱۸)$$

(کارابوگا و باستورک، ۲۰۰۷).

**۱۰) الگوریتم رقابت استعماری**

الگوریتم رقابت استعماری پایه، شامل ۶ مرحله است

زمانی که یک امپراطوری تمام مستعمرات خود را به سایر امپراطوری‌ها واگذار کند و هیچ مستعمره‌ای نداشته باشد، سقوط می‌کند که این عمل با حذف آن امپراطوری الگو می‌شود. البته در نهایت استعمارگر آن امپراطوری نیز به عنوان یک مستعمره به امپراطوری قدرتمندی ملحق می‌شود (معلم و همکاران، ۱۳۹۷؛ آذری و همکاران، ۱۳۹۶).

## ۴. روش تجزیه و تحلیل

در این مطالعه رویکرد نوینی از ترکیب الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شده است، بدین منظور از مجموعه پارامترهای ماهانه نرخ ارز غیررسمی (دلار آمریکا)، نرخ تورم کشور، قیمت نفتی سبد اوپک و نرخ سکه تمام بهار آزادی (طرح جدید) در بازه زمانی از آذرماه

[1]. Onlooker

۱۳۷۹ الی اسفندماه ۱۴۰۰ که بصورت ماهانه از پایگاه اطلاعات بانک مرکزی ایران و اتحادیه سکه، ارز و طلا گردآوری شد استفاده گردید. برای سازمان‌دهی اطلاعات از نرم‌افزار EXCEL و برای تخمین پیش‌بینی نرخ ارز و عوامل موثر بر آن از نرم افزار MATLAB استفاده شد. ابتدا نرمال‌سازی داده‌های ورودی به شبکه انجام شد. برای این کار از توابع نرمال‌سازی متداول استفاده و تأثیر آن‌ها در شبکه‌های عصبی مصنوعی (الگوریتم‌های فراابتکاری) حاصل بررسی شد. بهترین تابع نرمال سازی از رابطه زیر به دست آمد که داده‌ها را به فضای {۱ − ،۱+}منتقل می‌کرد (گلکار و همکاران، ۱۳۸۸).

$$y = \frac{2log(x-x_{min}+1)}{log(x_{max}-x_{min}+1)} \quad (۱۹)$$

پس از نرمال‌سازی داده‌ها، از محیط برنامه نویسی نرم افزار MATLAB جهت ایجاد شبکه‌های مختلف با تعداد نرون‌های متفاوت در لایه میانی، برای تخمین نرخ ارز هرماه استفاده شد. سپس برای هرکدام از مولفه‌ها، الگوریتم‌های فراابتکاری ذکر شده، تخمین زده شد و پیش‌بینی نهایی با مقایسه کردن بهترین و نزدیکترین مولفه‌ها به واقیعت انجام گرفته است. در نهایت نزدیکترین الگو به واقعیت را برای طراحی الگوی پیش‌بینی چندگام به جلوی نرخ ارز دلار آمریکا بکار رفته است.

به منظور اعتبار سنجی و دقت روابط پیش‌بینی غیرخطی از چندین شاخص آماری شامل ضریب همبستگی($R^2$)، میانگین درصد قدرمطلق خطا (MAPE)[1]، مجذور میانگین مربع خطای استاندارد (RMSE)[2]، میانگین مربع خطای استاندارد (MSE)[3] استفاده شده است. در حالتی که مقادیر $R^2$ به عدد یک و مقادیر MAPE، RMSE، MSE به عدد صفر نزدیک شوند نشان دهنده دقت بالای الگو است و در این حالت مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر واقعی آن نزدیک‌تر و میزان خطا کمتر است. روابط مربوط به شاخص‌های $R^2$، MAPE، RMSE، MSE به ترتیب بصورت زیر تعریف می‌شوند:

[1]. Mean Absolute Error
[2]. Root Mean Square Error (RMSE)
[3]. Mean Squared Error

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k-1}^{n}(Y_i - Y_j)^2}{\sum_{k=1}^{n} Y_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_j^2}{n}} \quad (۲۰)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|Y_i - Y_j| \quad (۲۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - Y_j)^2} \quad (۲۲)$$

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - Y_i)^2 \quad (۲۳)$$

RMSE یکی از شایع‌ترین فرمول‌های مورد استفاده جهت ارزیابی الگوهای رگرسیون است که تنها برای مقایسه الگوهایی با واحد اندازه‌گیری خطای یکسان بکار می‌رود و $R^2$ بیانگر میزان همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته در آینده است که هرچه مقدار $R^2$ به یک نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد الگو از عملکرد بهتری برخوردار است (فتاحی و همکاران[1]، ۲۰۲۳).

## ۵. نتایج و بحث

پس از انجام کدنویسی و پارامترهای تنظیم برای ده الگوریتم ذکر شده، به منظور اعتبار سنجی و دقت روابط پیش‌بینی غیرخطی از پنج معیار میانگین درصد قدرمطلق خطا (MAPE)، مجذور میانگین مربع خطای استاندارد (RMSE)، میانگین مربع خطای استاندارد (MSE)، و ضریب همبستگی ($R^2$)، برآورد شد. الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری هر یک دارای پارامترهای تنظیم مخصوص به خود هستند، که در هر الگوریتم متفاوت هستند. در جدول (۱)، مقادیر پارامترهای هر الگوریتم با استفاده از روش آزمون و خطا بدست آمده‌اند. پارامترهای بهینه هر الگوریتم براساس بیشترین دقت در کلیه الگوها بدست آمده است.

[1]. Fattahi et al.

**جدول (۱). اعتبارسنجی روابط پیش‌بینی غیرخطی در الگوریتم‌های فراابتکاری**

| Type of algorithm | Data type | R2 | MSE | RMSE | MAPE |
|---|---|---|---|---|---|
| عنوان الگوریتم تخمینی | نوع داده | ضریب همبستگی مربع | میانگین خطای مربع | جذر میانگین خطای مربع | میانگین درصد مطلق خطای |
| الگوریتم ژنتیک (**GA**) | آموزش | ۰/۹۸۴۵۹ | ۰/۰۰۲۲۰ | ۰/۰۴۶۹۹ | ۰/۵۹ |
| | تست | ۰/۹۸۷۸۵ | ۰/۰۰۲۳۷ | ۰/۰۴۸۶۹ | ۰/۶۵۸۶۶ |
| الگوریتم ازدحام ذرات (**PSO**) | آموزش | ۰/۹۸۰۱۳ | ۰/۰۰۲۶۱ | ۰/۰۵۱۱۴ | ۰/۶۲۰۷۴ |
| | تست | ۰/۹۹۲۲۵ | ۰/۰۰۱۶۷ | ۰/۰۴۰۹۸ | ۰/۶۴۵۶ |
| الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (**SA**) | آموزش | ۰/۹۸۱۳۵ | ۰/۰۰۲۹۸ | ۰/۰۵۴۶۰ | ۰/۵۶۵۶ |
| | تست | ۰/۹۸۷۰۶ | ۰/۰۰۳۲۷ | ۰/۰۵۷۲۱ | ۰/۶۴۶۰ |
| الگوریتم کلونی مورچگان(**ACO**) | آموزش | ۰/۹۵۵۶۲ | ۰/۰۰۵۶۴ | ۰/۰۷۵۱۴ | ۱/۰۳۸۶ |
| | تست | ۰/۹۷۶۳۵ | ۰/۰۰۳۳۷ | ۰/۰۵۸۰۹ | ۰/۸۵۹۶ |
| الگوریتم فاخته (**CUC**) | آموزش | ۰/۹۷۸۳۴ | ۰/۰۰۳۶۵ | ۰/۰۶۰۴۳ | ۰/۸۵۴۱۶ |
| | تست | ۰/۹۸۳۲۲ | ۰/۰۰۳۶۵ | ۰/۰۵۸۴۵ | ۰/۸۱۱ |
| الگوریتم کرم شب‌تاب(**CU**) | آموزش | ۰/۹۸۹۴۱ | ۰/۰۰۲۲۷ | ۰/۰۳۵۷۲ | ۰/۷۳۳۷۱ |
| | تست | ۰/۹۸۴۳۸ | ۰/۰۰۲۲۷ | ۰/۰۴۷۶۵ | ۰/۷۶۳۸۱ |
| الگوریتم جستجوی گرانشی (**GSA**) | آموزش | ۰/۵۲۶۲۶ | ۰/۰۵۵۸۹ | ۰/۲۳۶۴۱ | ۰/۷۹۰۴۹ |
| | تست | ۰/۷۴۳۳ | ۰/۰۵۷۰۶ | ۰/۲۳۸۸۹ | ۰/۸۰۰۷۵ |
| الگوریتم کلونی زنبور عسل (**ABC**) | آموزش | ۰/۸۴۵۸۸ | ۰/۰۳۷۶۸ | ۰/۱۹۴۱۲ | ۰/۴۶۲۷۳ |
| | تست | ۰/۸۷۳۰۶ | ۰/۰۳۳۴۷ | ۰/۱۸۲۹۵ | ۰/۴۳۰۶۲ |
| الگوریتم رقابت استعماری(**CA** ) | آموزش | ۰/۹۶۱۹۳ | ۰/۰۰۴۷۵ | ۰/۰۶۸۹۵ | ۰/۹۶۹۸۳ |
| | تست | ۰/۹۷۴۲۴ | ۰/۰۰۳۸۵ | ۰/۰۶۲۱۱ | ۰/۸۷۸۳۸ |
| الگوریتم تکاملی تفاضلی(**DE**) | آموزش | ۰/۹۷۵۷۲ | ۰/۰۰۳۶۰ | ۰/۰۶۰۰۱ | ۰/۶۱۶۶ |
| | تست | ۰/۹۸۶۲۴ | ۰/۰۰۳۱۹ | ۰/۰۵۶۵۳۸ | ۰/۶۶۹۹۳ |

منبع: یافته‌های پژوهش

نتایج جدول (۱)، آزمون مقایسه‌ای پیش‌بینی نرخ ارز بازار غیررسمی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری را نشان می‌دهد. با اندازه‌گیری خطای الگوهای مورد مطالعه می‌توان قدرت پیش‌بینی را بر اساس میزان خطای آن الگو ارزیابی کرد. در پژوهش حاضر، از آنجایی‌که رویکرد مورد استفاده مبتنی بر روش رگرسیون است، جهت ارزیابی عملکرد و

کارایی رویکردها از معیارهای RMSE، $R^2$ و MAPE استفاده شده است. RMSE یکی از شایع‌ترین فرمول‌های مورد استفاده جهت ارزیابی الگوهای رگرسیون است که تنها برای مقایسه الگوهایی با واحد اندازه‌گیری خطای یکسان بکار می‌رود و $R^2$ بیانگر میزان همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته در آینده است که هرچه مقدار $R^2$ به یک نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد الگو از عملکرد بهتری برخوردار است. مقایسه بین دو الگو براساس آمار MAPE و RMSE ارائه شده است. در واقع، هر چه مقدار پیش‌بینی شده به مقدار واقعی نزدیکتر باشد، خطای الگو کمتر است و هرچه خطای MAPE و RMSE کمتر باشد، الگوی برآورد شده برای پیش‌بینی قدرتمندتر عمل کرده است. از روابط پیش‌بینی شده غیر خطی به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که در بین ۱۰ الگوریتم فراابتکاری، الگوریتم ازدحام ذرات دارای عملکرد بهتری در پیش‌بینی بوده است بنابراین براساس مقایسه معیارهای خطا کمترین خطا برای داده‌های تست الگوریتم ازدحام ذرات است.

نتایج جدول برای پیش‌بینی یک تا ۲۴ ماه آینده ارائه شده است. در پیش‌بینی یک ماه آینده به طور متوسط کمترین مقدار RMSE مربوط به الگوریتم ازدحام ذرات (RMSE=۰/۰۰۱) و بیشترین مقدار متوسط RMSE مربوط به الگوریتم گرانشی (RMSE= ۰/۰۵۷) است. تغییرات مقادیر $R^2$ نیز مطابق با تغییرات مقادیر RMSE است. بیشترین و کمترین مقدار $R^2$ نیز به ترتیب مربوط به الگوریتم‌های ازدحام ذرات ($R^2$ =۰/۹۹) و ($R^2$ =۰/۶۲) هستند. الگوریتم گرانشی نسبت به سایر الگوریتم‌ها نتایج ضعیف‌تری ارائه کرده است. نمودارهای سری زمانی زیر و جدول (۲)[۱]، مقادیر واقعی نرخ ارزغیررسمی که از بانک مرکزی بصورت ماهیانه جمع آوری شده است و مقادیر پیش‌بینی شده آن برای ۲۴ ماه آینده با استفاده از تخمین الگوریتم ازدحام ذرات است. [۲] مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی نشان می‌دهد الگوریتم ازدحام ذرات

---

[۱]. جدول (۲)، مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده نرخ ارز به درخواست داور محترم در این قسمت آورده شده است

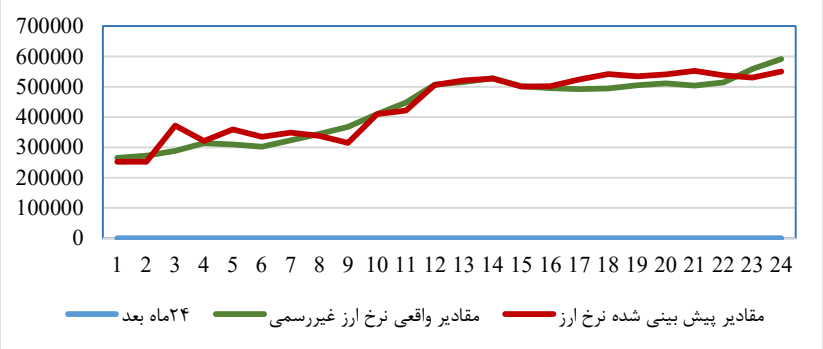
[۲]. سایر نمودارهای مستخرج از مابقی الگوریتم‌های تخمینی جهت اطلاع خواننده در پیوست قرار داده شده است.

نسبت به سایر الگوریتم‌ها از دقت بیشتری برخوردار است. دلیل اختلاف جزئی مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی در برخی از ماه‌ها، را می‌توان بروز اتفاقات سیاسی، اجتماعی دولت و تحولات بازارهای جهانی دانست.

**جدول (۲). مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده نرخ ارز در الگوریتم ازدحام ذرات**

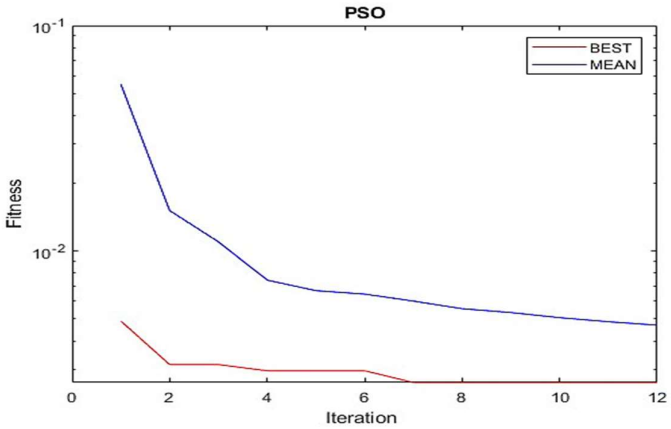
| مقادیر واقعی نرخ ارز غیررسمی | مقادیر پیش‌بینی شده نرخ ارز | ۲۴ ماه بعد |
|---|---|---|
| ۲۶۵۲۵۹ | ۲۵۱۷۶۲ | ۱ |
| ۲۷۲۳۱۳ | ۲۵۲۱۸۰ | ۲ |
| ۲۸۷۸۴۵ | ۳۷۱۷۸۰ | ۳ |
| ۳۱۴۰۵۲ | ۳۲۰۹۸۰ | ۴ |
| ۳۰۸۶۱۵ | ۳۵۸۴۹۰ | ۵ |
| ۳۰۲۱۹۸ | ۳۳۴۴۹۰ | ۶ |
| ۳۲۳۱۷۲ | ۳۴۸۴۷۰ | ۷ |
| ۳۴۴۳۹۸ | ۳۳۷۲۵۰ | ۸ |
| ۳۶۷۸۹۱ | ۳۱۴۵۸۰ | ۹ |
| ۴۰۸۶۹۰ | ۴۰۹۱۰۰ | ۱۰ |
| ۴۴۷۸۸۷ | ۴۲۰۵۵۷ | ۱۱ |
| ۵۰۶۰۳۵ | ۵۰۵۳۶۰ | ۱۲ |
| ۵۱۵۶۱۷ | ۵۲۰۲۶۶ | ۱۳ |
| ۵۲۸۱۵۶ | ۵۲۷۲۰۳ | ۱۴ |
| ۵۰۱۷۰۱ | ۵۰۰۹۸۰ | ۱۵ |
| ۴۹۵۲۷۱ | ۵۰۱۶۷۰ | ۱۶ |
| ۴۹۱۴۴۳ | ۵۲۳۵۲۰ | ۱۷ |
| ۴۹۴۱۴۱ | ۵۴۱۱۳۰ | ۱۸ |
| ۵۰۴۰۱۶ | ۵۳۴۳۶۰ | ۱۹ |
| ۵۱۱۵۸۲ | ۵۴۰۲۲۰ | ۲۰ |
| ۵۰۳۹۰۶ | ۵۵۲۲۰۰ | ۲۱ |
| ۵۱۴۲۷۲ | ۵۳۷۳۰۰ | ۲۲ |
| ۵۵۹۱۵۷ | ۵۳۰۰۳۰ | ۲۳ |
| ۵۹۱۶۵۷ | ۵۵۰۴۰۰ | ۲۴ |

منبع: یافته‌های پژوهش




**نمودار (۳). مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده نرخ ارز غیررسمی**

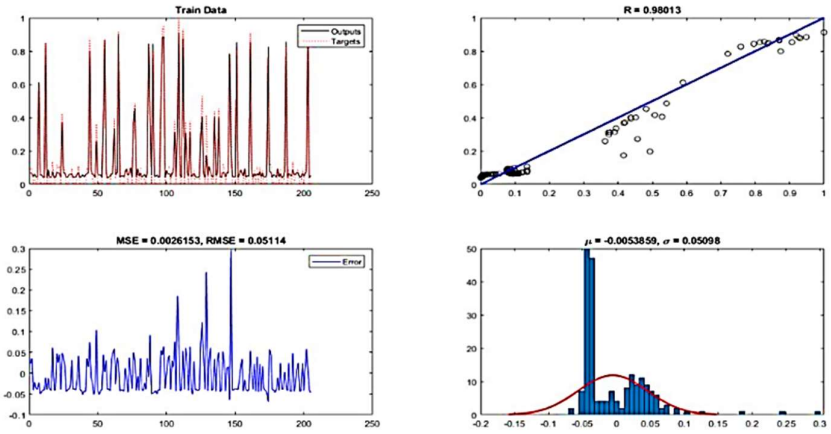
منبع: یافته‌های پژوهش




**نمودار (۴). تغییرات تابع هدف با تعداد تکرار متفاوت در بهترین اجرای الگوریتم ازدحام ذرات**

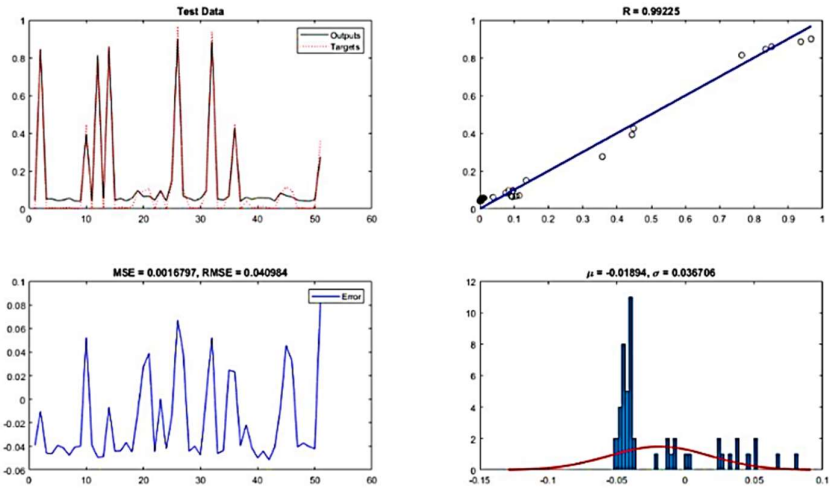
منبع: یافته‌های پژوهش

در نمودارهای (۴)، محور عمودی نشان دهنده میانگین مربعات خطا (MSE) و محور افقی تعداد تکرارها است. در شکل بالا می‌توان مشاهده کرد که الگوریتم ازدحام ذرات در تکراری کمتر از ۵۰ به جواب بهینه، شبیه‌سازی شده است در حالی‌که سایر الگوریتم‌ها در تکراری کمتر از ۲۰۰ به جواب بهینه شبیه‌سازی شده‌اند. این موضوع قابلیت بالای الگوریتم ازدحام ذرات را نشان می‌دهد.




**نمودار (۴). تولید و خطای الگوریتم ازدحام ذرات در سناریوی آموزش**

منبع: یافته‌های پژوهش




**نمودار (۵). تولید و خطای الگوریتم ازدحام ذرات در سناریوی آزمایش**

منبع: یافته‌های پژوهش

نمودارهای (۴) و (۵)، نشانگر تعداد تکرار و شبیه‌سازی الگو، روند کاهش مانگین مربعات خطا (MSE)، ضریب همبستگی یا ضریب تعیین ($R^2$) در سناریوی آموزش و

آزمایش توسط الگوریتم ازدحام ذرات است. جهت بررسی برتری الگوی پیش‌بینی توسط الگوریتم ازدحام ذرات، رویکرد جاری با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری از جمله ژنتیک، کلونی مورچگان، کلونی زنبور عسل، رقابت استعماری و... مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است. پارامتر Train MSE در نمودارهای فوق نشان دهنده خطای دو سناریوی آموزش و آزمایش از طریق روش میانگین مربعات خطا است. پارامتر $\mu$ نشان دهنده درصد خطای طبقه‌بندی و پارامتر $\sigma$ در نمودارهای بالا بیان کننده انحراف استاندار خطای طبقه‌بندی خروجی و پارامتر MSEtr Error انحراف معیار خطای آموزش شبکه را نشان می‌دهد، که در این نمودارها مشاهده می‌شود که خطای میانگین مربعات آزمایش (تست) با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به ۹ الگوریتم برآورده شده در پیوست کاهش کمتری داشته است. این در حالی است که در سایر الگوریتم‌های برآورده شده درصد خطای پیش‌بینی بیشتر مشاهده می‌شود. کاهش درصد خطای طبقه‌بندی را می‌توان به علت توانایی بهتر و بیشتر در جستجو توسط الگوریتم انتخابی دانست. این ویژگی باعث کاهش احتمال رخداد پدیدهٔ بیش برازش در روند شبکه گشته و در نتیجه باعث بهبود قابل توجه طبقه‌بندی داده‌ها توسط الگوریتم فراابتکاری شبکه عصبی مصنوعی شده است. نمودار (R) در هر دو سناریو نشان‌دهنده داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های واقعی است. محور افقی داده‌های واقعی نرخ ارز و محور عمودی داده‌های تخمینی حاصل از الگوریتم ازدحام ذرات است. همانگونه که از نمودار و جدول بالا مشخص می‌شود، داده‌های تخمین زده شده با داده‌های واقعی و قابلیت اتکای الگوی الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات در این پژوهش را نشان می‌دهد.

## ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

شبکه‌های عصبی علاوه بر ارائه پیش‌بینی‌های دقیق‌تر، مشکلات رایج الگوسازی کلاسیک از قبیل پایایی و ناپایایی سری‌های زمانی را ندارند و از این نظر همانند الگوسازی کلاسیک،

جهت رفع مشکلات خود همبستگی، هم‌خطی و ناهمسانی واریانس، نیازمند آماده سازی سری‌های زمانی متغیرهای مالی نیستند. عملکرد مناسب شبکه‌های عصبی در مقایسه با سایر روش‌های متداول بیانگر وجود روابط غیرخطی بین متغیرها است. در این پژوهش به بررسی توانایی یکی از جدیدترین روش‌های موجود در زمینه پیش‌بینی (الگوریتم‌های فراابتکاری) در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شبکه‌های عصبی جهت پیش‌بینی قیمت نرخ ارز ایران به عنوان یک متغیر پرکاربرد در اقتصاد پرداخته شد.

بدین منظور ابتدا با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری که ترکیبی از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های بهینه است و با روش انتخاب ویژگی، ۴ متغیر مستقل به عنوان بهینه‌ترین متغیرهای مستقل شناسایی و در مرحله بعد این متغیرها به عنوان متغیرهای مستقل بهینه وارد ۱۰ الگوریتم فراابتکاری ژنتیک، ازدحام ذرات، تبرید شبیه‌سازی شده، کلونی مورچگان، تکاملی تفاضلی، بهینه‌سازی فاخته، کرم شب‌تاب، جستجوی گرانشی، کلونی زنبور عسل و رقابت استعماری گردید.

نتایج نشان داد استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی ازدحام ذرات جهت پیش‌بینی نرخ ارز در بازار آزاد غیررسمی ایران نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری توانایی بیشتری در جهت پیش‌بینی دارد. همچنین متغیرهای قیمت نفت، قیمت سکه و تورم تأثیر زیادی در افزایش قدرت پیش‌بینی نرخ ارز دارد.

رویکردهای به‌کارفته در این مطالعه به عنوان نمایندگانی از روش‌های هوش مصنوعی نسبت به روش‌های آماری کلاسیک همچون رگرسیون ساده و لجستیک از عملکرد دقتی و بازده‌ای بهتری برخوردار بوده و می‌توانند به عنوان تکنیک‌هایی پرکاربرد برای پیش‌بینی نرخ ارز به کار گرفته شوند. از آنجا با توجه به این که الگوریتم ازدحام ذرات، روشی بسیار توانمند با دقت زیاد در امر پیش‌بینی است، پیشنهاد می‌شود که تاکنون مطالعه‌ای جهت پیش‌بینی نرخ ارز با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری چه در داخل و چه در خارج از کشور بدین صورت انجام نشده است و بصورت مقایسه تک یا

دو الگوریتم صورت گرفته، همچنین تنوع بکارگیری الگوریتم‌ها بیشتر از سه الگو به بالا در مطالعات وجود ندارد، نمی‌توان نتایج این پژوهش را با نتایج مطالعات قبلی که در این زمینه و صرفا نرخ ارز انجام شده‌اند مقایسه کرد. اما برای تأیید و صحه گذاشتن بر برتری این الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به دیگر الگوریتم‌ها، از نظر سرعت و قدرت همگرایی و شبیه‌سازی و همچنین دقت بالای آن در زمینه پیش‌بینی و مقایسه با انواع روش‌های بکار گرفته شبکه عصبی مصنوعی نتایج مطالعه حاضر با نتایج تحقیقات پژوهشگرانی همچون موشخیان و نجفی (۱۳۹۴)، کاظمی و همکاران (۱۳۹۶)، روحانی و همکاران (۱۳۹۹)، صادقی و همکاران (۱۳۹۳)، قاسمی و فرزاد (۱۳۹۸)، کاظمی و همکاران، (۱۳۹۸) فدایی و همکاران (۱۴۰۰)، قاسمی و همکاران (۱۴۰۰)، و برادلی و همکاران[1] (۲۰۲۰) سازگار است.

با توجه به نتایج به دست آمده در این مطالعه و تحقیقات مشابه داخل و خارج از کشور و همچنین مقایسه معیارهای تشخیص در الگوریتم‌های فراابتکاری، ملاحظه گردید، که الگوریتم ازدحام ذرات، روشی بسیار توانمند با دقت زیاد در امر پیش‌بینی و شبیه‌سازی نسبت به سایر الگوریتم‌های بررسی شده دراین پژوهش است، بنابراین پیشنهاد می‌شود سیاستگذاران، فعالان بازار سرمایه و تصمیم گیرندگان کلان کشور از این الگوریتم در پیش‌بینی سایر مسائل مالی مانند بحران‌های مالی، جریان‌های نقدی آینده، بورس اوراق بهادار و... استفاده کنند. همچنین به دلیل دقت بالای این روش پیشنهاد می‌گردد که از آن در موضوعات اقتصادی، صنعت و کشاورزی مانند پیش‌بینی طلا، نفت و غیره نیز استفاده گردد. از سوی دیگر با توجه به این نکته که بخش کشاورزی جایگاه مهمی در عرصه اقتصاد، معیشت جامعه و خوداتکایی دارد و یکی از متغیرهای مهم و موثر بر تجارت بخش صنعت و بخش کشاورزی که معیشت جامعه به آن مربوط می‌شود نرخ ارز است اطلاع و آگاهی قبلی از نرخ ارز و پیش‌بینی آن می‌تواند

[1]. Bradley et al.

به‌عنوان عاملی تأثیرگذار بر رشد این بخش‌ها باشد. البته این نکته حائز اهمیت است که عدم کنترل بعضی از عوامل مؤثر بر نتایج پژوهش از جمله تأثیر متغیرهایی چون عوامل اقتصادی، شرایط سیاسی، وضعیت اقتصاد جهانی، قوانین و مقررات و ... خارج از دسترس محقق بوده و ممکن است بر بررسی روابط اثرگذار باشد. از این‌رو، از آنجا که نرخ ارز به‌عنوان یکی از عوامل موثر بر بخش تولید و تجارت بخش کشاورزی و صنعت در رشد اقتصادی است، به سیاست‌گزاران توصیه می‌گردد، در راستای کاهش ریسک فضای تجاری و تولیدی، پیش‌بینی و آگاهی قبلی از نرخ ارز را مدنظر قرار دهند.

**تعارض منافع:**

تعارض منافع وجود ندارد.

**سپاسگزاری:**

از موسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی، اقتصاد کشاورزی و توسعه روستایی جهت حمایت، تشکر و قدردانی می‌گردد.

**منابع:**

- Abdollahi, A., & Khozin, A. (2016). Using genetic algorithm to optimize the Time-Cost-Quality-Risk in construction projects and investment plans. *Accounting and Auditing* Studies, 5(20), 104-123 (In Persian).
- Babajani, J., Taghva, M., Blue, G., & Abdollahi, M. (2019). Forecasting Stock Prices in Tehran Stock Exchange Using Recurrent Neural Network Optimized by Artificial Bee Colony Algorithm. *Journal of Financial Management Strategy*, 7(2), 195-228 (In Persian).
- Bafandeh Imandoust, S., Fahimifard. S. M., & Shirzady. S. (2010). Iran's Exchange Rate Forecasting Using ANFIS, NNARX & ARIMA Models (2002-2008). *Monetary & Financial Economics*, 16(28), (In Persian).
- Bigi, R. & Salehi, M. (2012). The application of the cuckoo algorithm in predicting the bankruptcy of companies listed on the Tehran Stock Exchange. The 11th National Accounting Conference of Iran (In Persian).
- Dashti, R., Sattari, M.T., & Nourani, V. (2017). Performance Evaluation of Differential Evolution Algorithm in Optimum Operating of Eleviyan

Single-Reservoir Dam System. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 3, 61-76 (In Persian).
- Davoodi, P. & Zolghadri, M. (2012). The Study of Relationship between Interest Rate and Inflation in Iran. *Journal of Economics and Modelling*, 2(7-8), 1-25 (In Persian).
- Ebrahim Khani, H., Kazemi, M., Pooya, A.R., & Fakoor Saghih, A.M. (2019). Prediction of Growth of Small and Medium Enterprises with the Combination of Artificial Neural Networks and Meta-Heuristic Algorithm. Modiriat-*e- farad*, 60, 205-220 (In Persian).
- Emami Meibodi, A., Amadeh, H., Memarzadeh, A., Ghasemi Nejad, A. (2013). Comparing the performance of GARCH Model and Gravitational Search Algorithm (GSA) in Modeling and Forecasting of Spot Oil Price of Iran (Adaptive Expectations Approach). *Journal of Energy.* 4(14), 1-23 (In Persian).
- Golkar, F., Farahmand, A. R., Farahmand, F. (2008). Investigating the Application of Artificial Neural Network in Forecasting Precipitation in Shiraz Region. *National Water Crisis Management Conference*. SID. https://sid.ir/paper/809684/fa. (In Persian).
- Eshghi, K., & Araghi, M. (2009). A Metaheuristic Algorithm for Stochastic Assignment Problem. *Sharif Journal of Industrial Engineering & Management,* 24(45), 3-12 (In Persian).
- Jafari, A. A. Sadeghi Sarostani, A. & Mousavinejad, F. (2013). Presenting the anil simulation algorithm to solve the open routing problem of vehicles. The 15th Iranian Electrical Engineering Student Conference. 1-17 (In Persian).
- Jalaee, S. A., Mir, H., & Rahimipoor, A. (2016). Effect of exchange rate pass on Stock Returns in Tehran Stock Exchange. *Journal of Investment Knowledge*, 5(19), 191-212 (In Persian).
- Karaboga D., Basturk B. (2007). Advances in Soft Computing: Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing, *Springer-Verlag*, 4529, 31-36.
- Khatib Semnani, M.A., Hadinejad, M., & Khashoui, R. (2014). Comparing the power of artificial neural network and dynamic neural network models in forecasting exchange rates: an application of wavelet transforms. *Journal of Future Studies of Management*, 100(25), 35-49 (In Persian).
- Liben Nowell, D., & Kleinberg, J. (2007). The Link- Prediction Problem for Social Network. *Journal of the American Society for Information Science and Technology,* 58(7),1019-1031.
- Moallem, P., Sadeghi, Hariri, M., & Hashemi, M. (2018). Modified Rrthogonal Chaotic Colonial Competition Algorithm and its Application in Improving Pattern Recognition in Multilayer Perceptron Neural Network. *Journal of Information and Communication Technology*, 35, 1-14 (In Persian).
- Poli. Ri. & Kennedy. J. (2007). Blackwell Tim Particle swarm

optimization an overview. Shlesinger Science, 33–57, Swarm Intel.
- Pour Gharavi, Z. (2015). Harmony search algorithm to solve multi-objective optimization problems. Master's thesis in the field of applied mathematics, research orientation in operations. Shahroud University of Technology (In Persian).
- Price, K.V., Storn, R.M. & Lampinen, J.A. (2005). *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Springer.
- Rajabioun, R. (2011). Cuckoo Optimization Algorithm. *Applied Soft Computing*, 11(8), 5508-5518.
- Ramezani Muzirji, F., & Yaqoubi, M. (2008). Chiatic Algorithm for Bird Optimization. Iran National Software Engineering Conference. SID. https://sid.ir/paper/809357/fa. (In Persian).
- Razavi, S.A., & Ahmadi Shadmehri, M.T. (2014). Investigating the Factors Influencing the Demand for Electricity in Service Providing Sector using Firefly and Cuckoo Algorithms. *Journal of Economics and Modelling*, 5(17-18), 111-134 (In Persian).
- Rezaei, A. R., & Ranjbaran, S. (2013). *Application Training of Genetic Algorithm in MATLAB Software.* Azar Publications (In Persian).
- Sadeghi, H., SohrabiVafa, H., Nouri, F. (2013). Combining Neural Networks and Evolutionary Algorithms on Energy Demand Prediction. *Journal of Economic Policy,* 6(11), 55-89 (In Persian).
- Sepehri, M., Ildoromi, A.R., Hosseini, S.Z, Nori, H., Mohammadzade, F. & Artimani, M.M. (2018). The combination of neural networks and genetic algorithms is a way to estimate the Peak flood. *Jwmseir*, 11(39), 23-28.
- Shahhosseini, S., & Rezaei, A. (2019). Forecasting of Iran's Official Exchange Rate Using the Autoregressive ARIMA Intervention Model. *new economy and trad*, 13(4), 131-158 (In Persian).
- Sherkat, E., Ehsan, Rahgozar, M., & Asadpour, M. (2013). Prediction of links in social networks using an optimization algorithm. *The CSI Journal on Computer Science and Engineering*, 12(1), 1-9 (In Persian).
- Zare Mehrjardi, Y., Barki, Sh. & Momeni, J.A. (2018). Applying innovative method - simulation of gradual refrigeration to solve supply chain problems. *Journal of Operational Research in its Applications (Applied Mathematics)*, 8(3(30)), 1-24 (In Persian).