

Nonlinear Dynamics and Chaotic Intensity of the USD–IRR Exchange Rate in Iran: Monetary Policy Implications (2009–2024)

Seyyede DelAra Mousavi¹, Ahmad Googerdchian² 

1. M.A. Graduate in Theoretical Economics, Faculty of Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran, E-mail: eraunavi@ase.ui.ac.ir
2. Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran (corresponding author), Email: a.googerdchian@ase.ui.ac.ir

Abstract

Within complex systems, chaos theory demonstrates that even simple interactions can generate highly intricate structures and interdependent dynamics, whereby minor perturbations— analogous to the butterfly effect—may substantially alter a system's trajectory. The Iranian foreign exchange market represents such a nonlinear system, in which macroeconomic policies, geopolitical developments, and market expectations interact to produce behaviors that cannot be adequately explained by classical equilibrium-based frameworks. This study applies a comprehensive suite of nonlinear dynamical system techniques—including the Brock–Dechert–Scheinkman (BDS) test, Lyapunov exponents, fractal dimensions, the Hurst exponent, phase-space reconstruction, Poincaré maps, Kolmogorov–Sinai entropy, and the zero–one test for chaos—to examine the intrinsic dynamics of the USD–IRR exchange rate from 2009 to 2024. The analysis seeks to identify fundamental sources of instability and quantify the degree of chaoticity, independently of transient external shocks or superficial fluctuations. Comparative evaluation indicates that chaotic intensity varies systematically across monetary policy regimes and geopolitical contexts. Periods of heightened chaos coincide with abrupt currency surges and institutional uncertainty, whereas relatively stable intervals correspond to lower entropy, moderated chaotic behavior, and greater informational coherence. These findings offer a holistic characterization of the market's intrinsic complexity and underscore the necessity of nonlinear, multi-metric analytical frameworks for understanding exchange rate dynamics and informing effective economic policy.

Article information

Review History:

Received: aug. 06, 2025
Revised: aug. 20, 2025
Accepted: nov. 14, 2025
Published online: apr. 28, 2026

Keywords:

Deterministic Chaos
Fractal Analysis
Kolmogorov–Sinai Entropy
Long Memory
Permutation Entropy

JEL Classification:

C63, G17, F31, C22

Corresponding Author:

a.googerdchian@ase.ui.ac.ir



Purpose/Aims:

This study aims to systematically investigate the chaotic and complex dynamics of Iran's USD–IRR exchange rate by disentangling endogenous fluctuations from exogenous disturbances. By quantifying chaotic intensity, identifying multifractal structures, and uncovering latent instability mechanisms, the research seeks to deepen understanding of currency market behavior in a politically sensitive emerging economy. Ultimately, the study aspires to generate policy-relevant insights for designing adaptive, complexity-aware interventions that acknowledge the irreducible uncertainty inherent in nonlinear financial systems.

Methodology & Framework:

A hybrid analytical framework integrating chaos theory with advanced nonlinear dynamical system methods was employed. Daily USD–IRR exchange rate data covering 2009–2024 were analyzed using complementary quantitative metrics to capture both temporal and structural complexity.

The BDS test was applied to detect nonlinearity and assess the adequacy of linear stochastic specifications. Lyapunov exponents were estimated to quantify sensitivity to infinitesimal perturbations and evaluate the presence of deterministic chaos. Fractal dimension analysis was conducted to detect multifractal structures, while the Hurst exponent was calculated to assess long-range dependence. Phase-space reconstruction and Poincaré maps were used to visualize the underlying system geometry and identify recurrent dynamic patterns. Entropy-based measures—including Kolmogorov–Sinai entropy and permutation entropy—were computed to quantify information production and intrinsic disorder. Finally, the zero–one test for chaos was implemented to validate deterministic chaotic dynamics and ensure robustness against stochastic artifacts. This integrated methodological design enables a multidimensional assessment of exchange rate behavior, combining dynamical, geometrical, and informational indicators while mitigating potential biases associated with reliance on a single technique.

Findings:

The empirical results demonstrate that the Iranian exchange rate exhibits pronounced chaotic dynamics and substantial sensitivity to initial conditions. Positive Lyapunov exponents ($\lambda \approx 0.53$) indicate rapid amplification of minor perturbations, confirming deterministic chaos. Estimated fractal dimensions ($D_2 \approx 1.34\text{--}1.57$) reveal heterogeneous multifractal structures, and the Hurst exponent ($H \approx 0.56\text{--}0.62$) indicates persistent long-term memory.

Entropy measures reflect significant information generation, consistent with endogenous complexity and inherent unpredictability. Comparative analysis across distinct monetary policy regimes suggests that chaotic intensity increases during politically turbulent or interventionist periods, coinciding with abrupt exchange rate movements and heightened uncertainty. In contrast, relatively stable intervals are characterized by lower entropy, moderated chaoticity, and comparatively greater predictability.

Discussion:

The USD–IRR exchange rate appears to be driven primarily by internal feedback mechanisms, heterogeneous agent interactions, and nonlinear adjustment processes rather than by exogenous shocks alone. These findings are broadly consistent with international research documenting chaotic features in exchange rate dynamics, while also providing context-specific insights into the structural and institutional characteristics of Iran’s foreign exchange market.

The evidence suggests that conventional linear or equilibrium-based models substantially underestimate the system’s complexity. Accordingly, advanced nonlinear analytical frameworks are essential for both empirical investigation and policy formulation in environments characterized by structural fragility and geopolitical sensitivity.

Conclusion & Implications:

The Iranian foreign exchange market operates as a chaotic, self-organizing system exhibiting pronounced sensitivity to initial conditions and persistent multifaceted fluctuations. Endogenous nonlinear feedback loops play a dominant role in shaping its evolution, thereby constraining long-term predictability.

Effective monetary and regulatory strategies must therefore adopt adaptive, complexity-aware approaches. Such strategies may include real-time monitoring of chaos-sensitive indicators, phase-dependent policy calibration, and entropy-informed evaluation of market conditions. Calibrating interventions according to observed levels of chaotic intensity—ranging from incremental adjustments during relatively stable periods to coordinated regulatory responses during severe turbulence—may enhance systemic resilience, mitigate risk transmission, and support market confidence.

This study contributes both methodologically and substantively to the analysis of exchange rate dynamics in emerging and geopolitically sensitive economies, demonstrating that understanding and managing nonlinear complexity is indispensable for sustaining macroeconomic stability.

تحلیل پیشرفته شدت آشوبناکی نرخ ارز در اقتصاد ایران؛ چشم‌اندازی جامع از تأثیر سیاست‌های ارزی (۱۴۰۳-۱۳۸۸)

سیده دل‌آرا موسوی^۱، احمد گوگردچیان^۲ 

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اقتصادنظری، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
eraunavi@ase.ui.ac.ir

۲. دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (نویسنده مسئول).
a.googerdchian@ase.ui.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در دنیای سیستم‌های پیچیده، نظریه آشوب تصویری از جهانی ارائه می‌دهد که در آن، تعامل‌های ساده می‌توانند ساختارهای بی‌نهایت پیچیده و الگوهای درهم‌تنیده خلق کنند؛ جهانی که هر تکانه کوچک، همانند بال پروانه‌ای، توانایی تغییر مسیر کل دینامیک سیستم را دارد. بازار ارز ایران نمونه‌ای برجسته از چنین سامانه‌های غیرخطی است که تحت فشار سیاست‌های اقتصادی، تغییرات ژئوپلیتیکی و انتظارات فعالان بازار، رفتاری فراتر از مدل‌های کلاسیک و تعادلی از خود نشان می‌دهد. این پژوهش با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیل سیستم‌های دینامیکی غیرخطی از جمله آزمون BDS، نمای لیاپانوف، ابعاد فراکتالی، نمای هرست، بازسازی فضای فاز، نگاشت پوانکاره و شاخص‌های آنتروپی کولموگروف-سینای و جایگشتی، سازوکارهای پنهان نرخ ارز در بازه ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۳ را کاوش می‌کند. هدف، آشکارسازی منابع ذاتی بی‌ثباتی و سنجش شدت آشوبناکی سیستم است، بدون اتکای صرف به شوک‌های خارجی یا داده‌های سطحی. تحلیل تطبیقی شاخص‌ها، نشان می‌دهد، شدت آشوب در دوره‌های مختلف سیاست‌گذاری ارزی با تحولات ژئوپلیتیکی و اقتصادی همگام است و دوره‌های آشوب گسترده با جهش‌های نرخ ارز و بی‌اعتمادی نهادی همراه بوده‌اند، در حالی که دوره‌های آرام با ثبات اطلاعاتی و کنترل نسبی آشوب، همزمان هستند. نتایج، تصویری جامع از پیچیدگی درونی دینامیک نرخ ارز ارائه می‌کند و بر اهمیت رویکردهای غیرخطی و چندشاخصه برای درک عمیق نوسانات و طراحی سیاست‌های مؤثر اقتصادی تأکید دارد.	تاریخچه داوری: دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۵ بازنگری: ۱۴۰۴/۵/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲۳ انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۲/۸
	کلمات کلیدی: آنتروپی کولموگروف-سینای آنتروپی جایگشتی آشوب قطعی تحلیل فراکتالی حافظه بلندمدت
	طبقه‌بندی JEL: C63، G17، F31، C22
	نویسنده مسئول: a.googerdchian@ase.ui.ac.ir

۱. مقدمه

رفتار بسیاری از متغیرهای اقتصادی، از جمله نرخ ارز، به‌ویژه در اقتصادهای شکننده و متأثر از شوک‌های سیاسی، دیگر با چهارچوب‌های کلاسیک مبتنی بر تعادل قابل تبیین نیست. در اقتصاد ایران، نرخ ارز از یک شاخص صرف قیمتی فراتر رفته و به سیستمی پیچیده، حساس به انتظارات، و برخوردار از پویایی‌های درونی تبدیل شده است. این پویایی‌ها می‌توانند به رفتارهای غیرخطی، نوسانات انفجاری و حتی الگوهای آشوبناک منجر شوند. با این حال، اغلب مطالعات مرسوم از این لایه‌های درونی غفلت کرده و نوسانات نرخ ارز را صرفاً به شوک‌های بیرونی یا متغیرهای بنیادی نسبت داده‌اند؛ در حالی که، در عمق این نوسانات، واقعیت‌های پیچیده‌تری از ساختار اقتصاد نهفته است؛ واقعیت‌هایی که تنها با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیلی پیشرفته و مدل‌های غیرخطی می‌توان آن‌ها را آشکار ساخت (دوانی، ۲۰۲۱).

در این پژوهش، نرخ ارز نه صرفاً به‌عنوان پیامدی از عوامل اقتصادی، بلکه به‌مثابه سامانه‌ای پیچیده با منطق درونی و پویایی‌های خاص خود مورد بررسی قرار گرفته است؛ چرا که آشوب^۲ به‌عنوان یک منبع درونی و ذاتی بی‌ثباتی در سیستم‌های اقتصادی عمل می‌کند و ماهیت غیرقابل پیش‌بینی خود را مستقل از هرگونه شوک یا نوسان تصادفی حفظ می‌کند و به بیان دیگر، حتی در غیاب اخبار، مداخلات یا اختلالات خارجی، دینامیک نرخ ارز می‌تواند رفتارهای پیچیده، حساس به شرایط اولیه و فاقد الگوی پیش‌بینی‌پذیر را نشان دهد. لذا انتخاب نظریه آشوب و ابزارهای غیرخطی برای تحلیل سری‌های زمانی نرخ ارز ایران بر اساس شواهد تاریخی رفتار غیرخطی و پیچیده داده‌ها صورت گرفته است.

همان‌طور که در مطالعات بین‌المللی متعدد در زمینه تحلیل سری‌های زمانی آشوبناک مورد تأکید قرار گرفته است، هیچ روش تحلیلی واحد و دقیقی برای اثبات آشوبناکی وجود ندارد، بنابراین ترکیب چندین روش غیرخطی و آزمون‌های آماری برای تشخیص آشوب الزامی است (کانتز^۳، ۲۰۰۳). لذا در چهارچوب این پژوهش، ابتدا با بهره‌گیری از آزمون BDS^۴ خطی یا غیرخطی بودن رفتار نرخ ارز در ایران را بررسی می‌کنیم. در ادامه، با استفاده از نمای لیاپانوف، بُعد فراکتالی، نمای هرست، محاسبه آنتروپی و نگاشت پوانکاره، دینامیک زمانی نرخ ارز تحلیل می‌شود تا مشخص گردد که آیا این سری زمانی واجد ویژگی‌های آشوبناک و رفتارهای پیچیده غیرخطی است یا خیر.

این رهیافت‌ها، که مبتنی بر روش‌شناسی سیستم‌های دینامیکی و تحلیل پیچیدگی هستند، این امکان را ایجاد می‌کند که به‌جای تحلیل‌های ایستا و سطحی، به کشف سازوکارهای پویای درونی نرخ ارز در اقتصاد ایران پرداخته شود و برخلاف مدل‌های خطی و فرضیه تصادفی، امکان شناسایی ویژگی‌های

1. Devaney (2021)

2. Chaos

3. Kantz (2003)

4. BDS (Brock, Dechert و Scheinkman: مخفف نام سه پژوهشگر)

دینامیکی سری زمانی و شدت آشوبناکی فراهم گشته و نرخ ارز، نه تنها بازتاب سیاست‌های اقتصادی، بلکه تجلی رفتار درونی سیستم اقتصادی تحت فشارهای ژئوپلیتیکی، تحریم‌ها، و ناکارآمدی‌های نهادی نیز می‌باشد. لذا در این رویکرد، ضمن همسویی با مطالعات بین‌المللی، تمرکز مقاله بر سنجش اثر سیاست‌های ارزی بر شدت آشوبناکی رفتار نرخ ارز^۱ است.

برای این منظور، بازه زمانی ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۳ به شش دوره سیاست‌گذاری ارزی تفکیک شده است. این تقسیم‌بندی نه بر اساس مقاطع تقویمی، بلکه مبتنی بر ماهیت و نوع مداخلات سیاست‌گذار در بازار ارز صورت گرفته است. با محاسبه جداگانه شاخص آنتروپی در هر دوره، در مقاله تلاش شده تا تصویری دقیق از رابطه میان «سیاست ارزی» و «شدت بی‌ثباتی آشوب گونه نرخ ارز» ترسیم شود. هدف نهایی، دستیابی به درکی عمیق‌تر از سازوکار ناپایداری در بازار ارز ایران است؛ درکی که بتواند مبنای طراحی سیاست‌های تطبیق‌پذیر با منطق پیچیدگی اقتصاد باشد، نه سیاست‌های تعادلی کلاسیک و ناکارآمد.

۲. پیشینه پژوهش

ادبیات پژوهش‌های خارجی طی سه دهه اخیر، به‌ویژه پس از دهه ۱۹۹۰، به‌طور فزاینده‌ای از ابزارهای نظریه آشوب، نمای لیپانوف و شاخص‌های آشوبناکی، برای تحلیل پویایی نرخ ارز بهره گرفته است. در میان این مطالعات، بلونسکی^۲ و اورلوفسکی^۳ (۲۰۲۴)، با به‌کارگیری نمای لیپانوف و آنتروپی کولموگروف-سینای، نشان دادند که نرخ تبدیل دلار به زلوت لهستان، ساختاری آشوبناک و حساس به شرایط اولیه دارد؛ یافته‌ای که ناکارآمدی مدل‌های خطی کلاسیک را در پیش‌بینی نوسانات ارزی تأیید می‌کند.

به‌طور مشابه، لاهمیری^۴ و سرلتیس^۵ (۲۰۲۴)، با ترکیب نمای لیپانوف و آنتروپی متریک، وجود رفتار آشوبناک در بازار ارز را در قالب یک چهارچوب چندبعدی دینامیکی اثبات کردند.

داتاء^۶ (۲۰۲۴) نیز با استفاده از آنتروپی نمونه و آنتروپی تقریبی در نرخ دلار-روپی هند، نشان داد که شدت آشوب در دوره‌های بحران، به‌ویژه همه‌گیری کرونا، به‌صورت چشمگیری افزایش یافته و پویایی بازار از حالت منظم به آشوبناک تغییر فاز می‌دهد.

در همین راستا، اومان آدژپونگ و همکاران^۷ (۲۰۲۳)، با به‌کارگیری آزمون BDS و نمای لیپانوف بر چند جفت ارز، به وجود وابستگی‌های غیرخطی پایدار و نوسانات شبه تصادفی در ساختار نرخ ارز پی بردند.

۱. در مقاله حاضر، منظور از نرخ ارز، قیمت هر دلار آمریکا در برابر ریال ایران می‌باشد.

2. Marcin Błoński (2024).

3. Piotr Orłowski (2024).

4. Saber Lahmiri (2024).

5. Anastasios Serletis (2024).

6. Sourav Datta (2024).

7. Emmanuel Oman, Richard Mensah, Francis Darko (2023).

اوزکایا (۲۰۲۲) نیز با تحلیل نمای لیپانوف نرخ لیر ترکیه در برابر دلار و یورو، رفتار آشوبناک را شناسایی و بر ضرورت لحاظ نمودن پویایی‌های غیرخطی در مدل‌سازی نرخ ارز تأکید کرد. در میان مطالعات کلاسیک‌تر، منگ^۲ و همکاران (۲۰۱۳)، با ترکیب ابعاد فراکتالی و نمای لیپانوف، نشان دادند که بازارهای ارز از ساختار چندفراکتالی برخوردارند؛ در حالی که آنیشچنکو و همکاران^۳ (۲۰۰۸) با استفاده از آنتروپی کولموگروف-سینای و نمای لیپانوف، همبستگی میان شاخص‌های آنتروپی و نرخ رشد مثبت لیپانوف را به‌عنوان شاخصی از آشوب تأیید کردند.

نخستین گام‌های تجربی این مسیر را نیز می‌توان در کار باسک^۴ (۱۹۹۶) مشاهده کرد که با محاسبه ابعاد فراکتالی و نمای لیپانوف برای نرخ کرون سوئد در برابر مارک آلمان و دلار آمریکا، ماهیت آشوبناک بازار ارز را مستند ساخت.

همچنین، دیچرت و همکاران^۵ (۱۹۹۲)، برای نخستین بار از شبکه‌های عصبی جهت تخمین عددی نمای لیپانوف استفاده کردند و نشان دادند که یادگیری ماشین، می‌تواند ابزار قدرتمندی در تخمین پویایی‌های غیرخطی نرخ ارز باشد.

در ایران نیز مجموعه‌ای از پژوهش‌های داخلی، به‌ویژه از اواخر دهه ۱۳۸۰، وجود آشوب در رفتار نرخ ارز را تأیید کرده‌اند. ازجمله، شهیکی‌تاش و همکاران (۱۳۹۲) با تحلیل نرخ‌های چندگانه ارز و محاسبه نمای لیپانوف، حساسیت بالا به شرایط اولیه و پویایی آشوبناک نرخ ارز ایران را شناسایی کردند.

همچنین، بابازاده و همکاران (۱۳۸۸)، با محاسبه ماکزیمم نمای لیپانوف برای نرخ دلار-ریال، وجود ساختار آشوبناک را در بازه ۱۳۷۱ تا ۱۳۸۶ به‌صورت تجربی اثبات کردند. نوآوری آن‌ها در استفاده از شبکه‌های عصبی بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات، امکان پیش‌بینی کوتاه‌مدت نوسانات را با دقت بالاتری فراهم آورد.

افزون بر این، جلالی و ابوالحسینی (۱۳۸۸)، با بهره‌گیری از تحلیل چندفراکتالی بر روی نرخ یورو-دلار و دلار-ریال، وجود نظم در دل بی‌نظمی بازار را نشان دادند و بر ضرورت استفاده از ابزارهای غیرخطی برای تحلیل نرخ ارز در ایران تأکید کردند.

با وجود تلاش‌های ارزشمند پیشین در شناسایی وجود رفتارهای آشوبناک در نرخ ارز ایران از رهگذر ابزارهای غیرخطی، ادبیات داخلی هنوز به‌کلی از سنجش شدت آشوبناکی و دگردیسی‌های آن در طول زمان غفلت ورزیده است. پژوهش‌های موجود صرفاً به اثبات اصل آشوب بسنده کرده و بدون آنکه شاخصی کمی برای اندازه‌گیری شدت این پویایی‌ها ارائه دهند، در سطحی ایستا و مقطعی متوقف مانده‌اند.

1. Ahmet Özkaya (2022).

2. Meng & et al.

3. Anishchenko & at all.

4. M. Bask

5. Gencay & et al.

در پژوهش حاضر، با تمرکز بر بازه ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۳، دوره‌ای آکنده از نوسانات ارزی و سیاست‌های متعارض، و تقسیم آن به شش دوره متمایز، تلاش شده برای نخستین بار، تصویری کمی، نظام‌مند و میان‌دوره‌ای از دگرگونی‌های شدت آشوبناکی ارائه شود. بدین‌سان، با بهره‌گیری از مجموعه‌ای کامل از ابزارهای غیرخطی، نه صرفاً وجود آشوب، بلکه میزان و تغییرات آن در پرتو سیاست‌های ارزی آشکار می‌شود.

۳. مبانی نظری

۳-۱. رویکردهای کلاسیک در تبیین نوسانات نرخ ارز

در ادبیات کلاسیک اقتصاد بین‌الملل، الگوهای متعددی برای تبیین رفتار نرخ ارز توسعه یافته‌اند. در این میان، در نظریه برابری قدرت خرید (PPP)، تلاش می‌شود تا از طریق همسان‌سازی سطح قیمت‌ها در کشورهای مختلف، نرخ تعادلی ارز را در بلندمدت تبیین گردد. نظریه برابری نرخ بهره نیز بر این فرض استوار است که تفاوت‌های نرخ بهره میان کشورها، از طریق تحرکات سرمایه و سازوکارهای آربیتراژ، منجر به تغییرات نرخ ارز خواهد شد (عزیزنژاد، ۱۳۹۶). همچنین، نظریه تراز پرداخت‌ها، نوسانات ارزی را به اختلافات در حساب جاری یا حساب سرمایه پیوند می‌دهد. اگرچه این نظریه‌ها هر یک در ترسیم بخشی از واقعیت بازار ارز مؤثرند، اما ساختار بازار ارز در عمل، به‌مراتب پیچیده‌تر از مفروضات تعادل گرایانه و ایستا در مدل‌های کلاسیک است (ماتسوموتو، ۲۰۲۲).

تغییرات ناگهانی انتظارات، گسترش بازارهای مشتقه، سیاست‌های اقتصادی غیرمنتظره، و تعامل عوامل سیاسی و روانی با ساختارهای اقتصادی، همگی موجب شده‌اند که رفتار نرخ ارز، واجد الگوهایی پیچیده، ناپایدار و در مواردی غیرخطی باشد؛ رفتارهایی که کمتر با ابزارهای سنتی، قابل شناسایی یا پیش‌بینی‌اند (جلایی و همکاران، ۱۳۹۳).

۳-۲. نقش شدت آشوبناکی در پویایی‌های نرخ ارز ایران طی دوره‌های متمایز سیاست‌گذاری

ارزی

نرخ ارز در اقتصاد ایران، به‌ویژه در شش دوره متمایز سیاست‌گذاری ارزی، رفتاری فراتر از روابط خطی و متعارف اقتصاد کلان دارد. این رفتار حاصل برهم‌کنش پیچیده‌ای از نهادها، انتظارات، سیاست‌ها و شوک‌های بیرونی است (شاکری، ۱۴۰۴). چنین ساختاری نرخ ارز را مستعد نوسانات شدید، بازگشت‌های نامنظم و حساسیت بالا به تغییرات اولیه می‌سازد؛ ویژگی‌هایی که تنها در چهارچوب نظریه سیستم‌های پیچیده و آشوب می‌توان آن‌ها را به‌درستی تحلیل کرد (گوآو و چن، ۲۰۲۱). با توجه به این پیچیدگی‌ها، تمرکز صرف بر وجود یا فقدان آشوب ناکافی بوده و ضرورت دارد به «شدت آشوبناکی» توجه شود؛ مفهومی

1. Matsumoto (2022).

2. Guo & Chen (2021).

که بیانگر درجه حساسیت سیستم به شرایط اولیه، نرخ واگرایی مسیرهای سیستم و میزان بی‌ثباتی پویایی‌های آن است. این مفهوم، علاوه بر تمایز سطوح مختلف ناپایداری و پیچیدگی در بازه‌های زمانی گوناگون، امکان تبیین تأثیرگذاری متغیرهای کلان و سیاست‌های ارزی بر ساختار رفتاری بازار را فراهم می‌کند (گائو و همکاران، ۲۰۲۳). تحلیل شدت آشوبناکی ابزاری کارآمد در اختیار سیاست‌گذاران قرار می‌دهد تا پیش از وقوع نوسانات شدید، دوره‌های افزایش حساسیت و بی‌ثباتی را شناسایی و مداخلات پیشگیرانه مؤثرتری طراحی کنند. این رویکرد پویایی‌محور محدودیت مدل‌های خطی و سنتی را در توضیح واکنش‌های بازار ارز برطرف کرده و دقت تحلیل روندهای میان‌مدت و بلندمدت را افزایش می‌دهد. همچنین، شناسایی نواحی آشوبناک در دوره‌های مختلف سیاست‌گذاری، نشان می‌دهد که رفتار بازار ارز تنها تابع متغیرهای اقتصادی و سیاسی نیست، بلکه نتیجه تعاملات پیچیده میان بازیگران با اطلاعات ناقص، انتظارات پویا و واکنش‌های غیرقابل پیش‌بینی نیز می‌باشد (داودی و همکاران، ۱۴۰۱).

۳-۳. بررسی تاریخی تحولات نرخ ارز در پرتو سیاست‌های ارزی در ایران (۱۳۸۸ تا ۱۴۰۳)

طی بازه زمانی ۱۳۸۸ الی ۱۴۰۳، بازار ارز ایران در معرض تحولات ژئوپلیتیکی، تنش‌های داخلی، شدت و ضعف تحریم‌های بین‌المللی و سیاست‌گذاری‌های متعارضی قرار گرفت که ساختار آن را در نوسان میان سرکوب ارزی، بی‌ثباتی انتظارات، و جهش‌های قیمتی قرار داد. گرچه نظام ارزی ایران در تمامی دوره‌های مورد بررسی، همواره شناور مدیریت شده باقی مانده، در این مقاله، بازه زمانی ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۳ با اتکا به منطق پویایی‌های پیچیده و آشوب، به شش دوره مجزا تقسیم شده است. هر یک از این دوره‌ها، نمایانگر یک نوع مدیریت و سیاست ارزی خاص، درآمدهای نفتی، شدت فشارهای خارجی ناشی از تحریم‌ها و رابطه ایران با جهان است (داودی و همکاران، ۱۴۰۱). نرخ ارز ایران تحت تأثیر مداخله‌های سیاست‌گذار و شوک‌های اقتصادی، رفتاری پیچیده دارد و حتی در چهارچوب نظام شناور مدیریت شده، تفاوت در نوع مدیریت بازار و شدت مداخله‌ها، باعث تغییرات رفتاری قابل توجه نرخ ارز شده (عزتی و همکاران، ۱۴۰۰)، لذا تحلیل رفتار نرخ ارز در اقتصاد ایران، بدون درک ماهیت سیاست‌های ارزی اتخاذ شده در مقاطع مختلف، تصویری ناقص و گمراه‌کننده از این متغیر راهبردی ارائه می‌دهد.

نخستین نشانه‌های تحول در رفتار نرخ ارز، طی دوره ۱۳۸۸ الی ۱۳۹۰ و همزمان با آغاز دولت دهم و اجرای سیاست‌های موسوم به آزادسازی اقتصادی، در لایه‌های زیرین بازار نمایان شد. در این دوره، با وجود اعمال تحریم‌های یکجانبه آمریکا، اثرات محدود بر منابع ارزی کشور تا حدودی مهار شد، زیرا ایران توانست با اتکا به درآمدهای نفتی و مسیرهای جایگزین تجاری، فشارهای خارجی را تعدیل کند؛ چرا که این مقطع زمانی، با تثبیت نسبی درآمدهای نفتی و برخورداری کشور از ذخایر ارزی قابل توجه همراه بود؛ عاملی که در کوتاه‌مدت، اثرات نوسانات سیاسی و شکل‌گیری تدریجی فضای تحریمی را پنهان نگاه داشت (طیعی، ۱۳۹۶). با این حال، اجرای فاز نخست هدفمندی یارانه‌ها در اواخر سال ۱۳۸۹، موجب افزایش

سطح عمومی قیمت‌ها و برانگیختن انتظارات تورمی شد. در این بازه، نرخ ارز دلار از حدود ۹۷۰۰ ریال به نزدیک ۱۲۰۰۰ ریال افزایش یافت. طی دوره ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۲، تصویب و اجرای تحریم‌های فراگیر علیه بانک مرکزی، بخش انرژی و مبادلات مالی بین‌المللی، ساختار بازار ارز را وارد مرحله‌ای تازه کرد. محدودیت در دسترسی به منابع ارزی و اختلال در جریان صادرات نفتی، فشار مضاعفی بر توان عرضه ارز وارد کرد و نرخ دلار طی این دوره از حدود ۱۲،۰۰۰ ریال به مرز ۳۵،۰۰۰ ریال جهش یافت؛ تجربه‌ای که آشکارا نشان می‌داد، تحریم‌ها به‌عنوان یک متغیر خارجی، نقشی تعیین‌کننده در بی‌ثباتی بازار و شکل‌دهی رژیم‌های ارزی دارند (احمدی، ۱۴۰۰).

در ادامه، و طی سال‌های ۱۳۹۲ الی ۱۳۹۶، همزمان با روی کار آمدن دولت جدید و آغاز مذاکرات جامع هسته‌ای، فضای روانی حاکم بر بازار دستخوش تغییر شد و امیدواری به بهبود روابط خارجی و لغو تدریجی تحریم‌ها، زمینه‌ساز شکل‌گیری انتظارات مثبت نسبت به تثبیت اقتصادی گردید. هرچند امضای توافق برجام در میانه این دوره با تأخیر در اثرگذاری اقتصادی همراه بود، اما در مهار انتظارات تورمی و کاهش نوسانات بازار ارز، نقش مؤثری ایفا کرد. در این دوره، نرخ ارز دلار از حدود ۳۲۰۰۰ ریال به حدود ۳۸۰۰۰ ریال افزایش یافت. اما طی سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۸، با خروج ایالات متحده از برجام در اردیبهشت ۱۳۹۷، بنیان شکننده ثبات نسبی ارزی دچار فروپاشی شد. بازگشت تحریم‌های اقتصادی و نفتی، محدودیت در دسترسی به منابع ارزی بلوکه‌شده، و تضعیف روابط بانکی بین‌المللی، همگی به جهش دوباره نرخ ارز دامن زدند (شاکری، ۱۴۰۴).

شدت بالای این موج تحریمی، نشان داد که عامل برونزای تحریم، می‌تواند هم‌ارز تغییر در سیاست‌های داخلی، نقشی تعیین‌کننده در بی‌ثباتی ارزی ایفا کند و حتی مسیر رژیم‌های ارزی را بازتعریف نماید. همزمان، تشدید اختلافات داخلی درباره راهبرد مذاکرات و نحوه مواجهه با تحریم‌ها، فضای تصمیم‌گیری ارزی را پیچیده‌تر ساخت. کاهش صادرات نفت و اختلال در شبکه تجارت خارجی، کانال‌های ارزآوری کشور را به‌طور محسوسی محدود کرد. نرخ ارز دلار در این مقطع از حدود ۴۲۰۰۰ ریال در اوایل ۱۳۹۶ به سطوحی بالاتر از ۱۶۰۰۰۰ ریال در انتهای سال ۱۳۹۸ رسید. در دوره ۱۳۹۸ الی ۱۴۰۰، تداوم وضعیت بلا تکلیف در سیاست‌گذاری ارزی و نبود تصمیم‌گیری قاطع در خصوص تداوم یا حذف نرخ ارز ترجیحی، بر شدت بی‌ثباتی‌ها افزود. با وجود تلاش‌هایی برای احیای مذاکرات هسته‌ای، عدم حصول توافق مشخص و خروج فرایند گفت‌وگو از مسیر ساختاری، به بدبینی فعالان بازار انجامید و نرخ ارز دلار را در وضعیتی ناپایدار نگه‌داشت.

طی سال‌های ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۳، که با شهادت رئیس‌جمهور وقت و تغییر ترکیب دولت همراه بود، با اعلام برنامه‌هایی برای اصلاحات اقتصادی و ارزی، انتظاراتی نسبت به تعدیل ساختاری در اقتصاد شکل گرفت (شالیاری و همکاران، ۱۴۰۱). با این حال، فقدان انسجام نهادی در نظام سیاست‌گذاری، ابهام نسبت به آینده مذاکرات، و تداوم ساختار ناکارآمد نظام چندرخی ارز، موجب شد که بازار ارز در وضعیت تعلیق

و بلا تکلیفی مزمن گرفتار شود. در این دوره، نرخ ارز دلار از حدود ۲۶۰۰۰۰ ریال در سال ۱۴۰۰ به حدود ۶۰۰۰۰۰ ریال در نیمه ۱۴۰۳ افزایش یافت. فساد ساختاری در تخصیص منابع ارزی و نبود شفافیت در سیاست‌های رسمی، همچنان از ویژگی‌های بارز سامانه ارزی کشور به شمار می‌آید (صالحی اصفهانی و پسران، ۱۴۰۱).

۴. روش‌شناسی پژوهش

مسیر پژوهش، به‌گونه‌ای طراحی شده که علاوه بر شناسایی ویژگی‌های بنیادین نرخ ارز در دوره‌های متمایز سیاست‌گذاری، تحلیل دقیقی از شدت و دامنه بی‌نظمی‌های هر دوره ارائه دهد. این مطالعه با استفاده از داده‌های روزانه نرخ ارز دلار آمریکا در بازار آزاد ایران طی بازه زمانی ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۳، بازنمایی رفتاری این متغیر کلیدی اقتصادی را در بستر تحولات گسترده اقتصادی و سیاست‌های ارزی انجام می‌دهد. نرخ ارز بازار آزاد، به‌دلیل نقش تعادلی و تأثیر مستقیم بر فعالیت‌های اقتصادی، به‌عنوان محور اصلی تحلیل نوسانات ارزی انتخاب شده است.

۴-۱. آزمون‌های مورد استفاده در مطالعه

در این مطالعه، جهت واکاوی ابعاد چندگانه و عمیق رفتار سری زمانی نرخ ارز دلار در بازار آزاد ایران، رویکردی جامع مبتنی بر مفاهیم و ابزارهای پیشرفته در تحلیل دینامیک غیرخطی و آشوب به کار می‌رود. بررسی وجود ساختارهای پیچیده غیرخطی ابتدا از طریق آزمون BDS انجام می‌شود؛ این آزمون آماری با دقت بالا، امکان تمایز میان فرایندهای تصادفی و ساختارمند را فراهم می‌آورد و پایه‌ای علمی برای به‌کارگیری سایر روش‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی ایجاد می‌کند. در این آزمون، رد فرضیه صفر (p -value < 0.05) به معنای وجود ساختار غیرخطی و رد مدل‌های تصادفی یا خطی است و هرچه مقدار آماره آزمون بزرگ‌تر باشد، شدت پیچیدگی غیرخطی نیز بالاتر خواهد بود. سنجش حساسیت سیستم به شرایط اولیه از طریق محاسبه نمای لیاپانوف انجام می‌شود؛ این نما به‌عنوان معیار استاندارد اندازه‌گیری نرخ واگرایی مسیرهای همسایه در فضای حالت شناخته می‌شود. نمای لیاپانوف، نه تنها وجود آشوب را مشخص می‌کند، بلکه شدت آن را به‌صورت عددی کمی نشان داده و ابعاد پویایی‌های آشوبناک نرخ ارز را آشکار می‌سازد.

لیاپانوف منفی ($\lambda < 0$)، بیانگر رفتار منظم و غیرآشوبناک؛ $\lambda \approx 0$ نشان‌دهنده مرز آشوب؛ و مقدار مثبت نمای لیاپانوف حتی تنها در یک بعد، یعنی ($\lambda > 0$)، تأییدکننده وجود آشوب و حساسیت به شرایط اولیه است. همچنین بزرگی بیشتر λ معادل شدت بالاتر آشوبناکی است. نمای هرست^۱ با بهره‌گیری از روش‌های تحلیل دامنه مقیاس‌بندی شده (R/S^2) و تحلیل نوسانات زده شده شده (DFA^2) ابزاری قدرتمند

1. Hurst Exponent

2. Rescaled Range Analysis

3. Detrended Fluctuation Analysis

برای بررسی رفتار بلندمدت سری‌های زمانی است. این نما توانایی شناسایی حافظه بلندمدت در داده‌ها را دارد؛ به این معنا که می‌تواند نشان دهد، تغییرات گذشته تا چه حد بر روندهای آینده اثر می‌گذارند. علاوه بر این، نمای هرست امکان تفکیک روندپذیری سری زمانی و بررسی ویژگی‌های غیرخطی آن را فراهم می‌آورد؛ بدان معنا که می‌تواند ساختارهایی را آشکار کند که از طریق تحلیل‌های خطی معمول قابل شناسایی نیستند؛ ویژگی‌هایی که تحلیل‌های خطی ساده، مانند رگرسیون معمول یا شاخص‌های میانگین، قادر به آشکارسازی آن‌ها نیستند.

همچنین فرایند بازسازی فضای فاز^۱، با تعیین بهینه پارامترهای تأخیر زمانی بر پایه آزمون متقابل اطلاعات متقابل (AMI^۲) و بعد بازسازی از طریق آزمون همسایگان کاذب (FNN^۳)، امکان بازنمایی جامع و چندبعدی داده‌های تک‌بعدی سری زمانی را فراهم می‌آورد. این تکنیک، چهارچوبی برای آشکارسازی ساختارهای غیرخطی درونی، جاذب‌های عجیب^۴ و الگوهای پیچیده فراکتالی فراهم می‌کند و بستر لازم برای انجام تحلیل‌های دقیق‌تر آشوب‌محور را مهیا می‌سازد. ابعاد هندسی و میزان خودتشابهی داده‌ها نیز با شاخص بعد فراکتالی کوری ارزیابی می‌شود که معرف سطح پیچیدگی هندسی داده‌ها و میزان آشوبناکی احتمالی آن‌ها است.

مقدار صحیح (مثل ۱ یا ۲) نشان‌دهنده هندسه منظم (خط یا سطح) و مقادیر کسری بین ۱ و ۲ معرف وجود ساختار فراکتالی و آشوبناک است. هرچه D_2 به ۲ نزدیک‌تر باشد، پیچیدگی هندسی سیستم بیشتر است. افزون بر این، آزمون صفر-یک به عنوان روشی نوآورانه برای تشخیص آشوب در داده‌های سری زمانی، بدون نیاز به بازسازی فضای فاز یا برآورد پارامترهای حساس، به کار گرفته می‌شود و شاخص عددی K ، میزان آشوبناکی سیستم را در بازه صفر تا یک تعیین می‌کند. مقدار نزدیک صفر، نشانه عدم وجود آشوب و مقدار نزدیک یک، معرف آشوب قطعی است. معمولاً مقادیر بالاتر از ۰/۷ آشکارکننده رفتار آشوبناک پایدار و غیرقابل پیش‌بینی‌اند (سون و همکاران^۵، ۲۰۲۳).

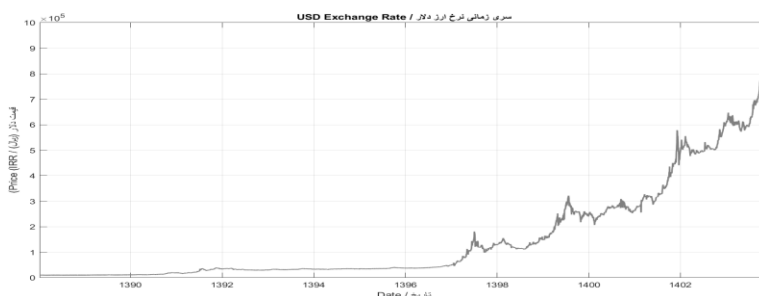
در حوزه سنجش بی‌نظمی اطلاعاتی، شاخص‌های آنتروپی جایگشتی^۶ و آنتروپی کولموگوروف-سینای^۷، به‌صورت مکمل مورد استفاده قرار می‌گیرند تا شدت تولید اطلاعات جدید و میزان عدم قطعیت در رفتار سری زمانی نرخ ارز را از منظر نظریه اطلاعات و سیستم‌های دینامیکی غیرخطی اندازه‌گیری نمایند. این شاخص‌ها، نمایی گسترده و کمی از پیچیدگی، عدم قطعیت و پیش‌بینی‌ناپذیری سیستم ارائه می‌دهند. مقادیر پایین آنتروپی، بیانگر نظم و پیش‌بینی‌پذیری نسبی سیستم، و مقادیر بالاتر، نشان‌دهنده

1. Phase Space Reconstruction
2. Average Mutual Information
3. False Nearest Neighbors
4. strange attractors
5. Sun et al. (2023).
6. Permutation Entropy
7. Kolmogorov-Sinai Entropy

افزایش بی‌نظمی، پیچیدگی و تولید اطلاعات جدید است. تغییرات این شاخص‌ها در طول دوره‌ها، بیانگر شدت نسبی ناپایداری رفتاری سیستم است. و درنهایت، نداشت پویانکاره با تبدیل سری زمانی به یک نداشت دوبعدی، امکان بررسی کیفی رفتار دینامیکی سیستم را فراهم می‌کند. این ابزار می‌تواند الگوهای منظم و پراکندگی‌های غیرقابل پیش‌بینی را از هم تمیز دهد و وجود جاذب‌های پیچیده و فراکتالی را در رفتار نرخ ارز نشان دهد، که نشان‌دهنده ساختارهای درونی و تعاملات غیرخطی سیستم است (کوا و چو، ۲۰۲۱).

۵. نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی بر روی سری زمانی نرخ ارز دلار آمریکا در بازار آزاد ایران ارائه و تحلیل می‌شود. تمرکز اصلی این تحلیل‌ها بر ارزیابی ساختار درونی، میزان وابستگی، نظم پنهان و ویژگی‌های دینامیکی نرخ ارز است. با توجه به هدف پژوهش، هر آزمون به‌منظور کشف بُعد خاصی از رفتار سیستم طراحی شده است؛ از جمله بررسی غیرخطی بودن، سنجش واگرایی رفتاری، اندازه‌گیری پیچیدگی هندسی، ارزیابی حافظه بلندمدت و تحلیل بی‌نظمی ساختاری. به منظور ارائه تصویری شفاف از روند کلی، دامنه تغییرات و توزیع مقادیر سری زمانی نرخ ارز، نمودار خطی آن در شکل شماره (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱. نمودار تغییرات سری زمانی نرخ ارز (دلار آمریکا به ریال ایران) در بازار آزاد
Figure 1. Time series plot of the exchange rate (US Dollar to Iranian Rial) in the open market

مأخذ: یافته‌های پژوهش

این نمودار نشان می‌دهد که نرخ ارز در دوره مورد بررسی، علاوه بر نوسانات مقطعی، دارای تغییرات قابل توجه و روندهای بلندمدت است که زمینه را برای تحلیل‌های غیرخطی و آشوبناک فراهم می‌سازد. نقاط اوج و افت قیمت، علاوه بر مشخص کردن نوسانات بازار، نمایانگر دوره‌های بحرانی و تأثیر سیاست‌های ارزی، تحریم‌ها و شوک‌های اقتصادی هستند.

جدول ۱. آمار توصیفی نرخ ارز دلار آمریکا در بازار آزاد ایران (۱۴۰۳-۱۳۸۸)

Table 1. Descriptive statistics of the US Dollar exchange rate in Iran's open market (2009-2024)

مقدار	شاخص
153440	Mean میانگین
37755	Median میانه
193380	Std Dev انحراف معیار
$10^{10} \times 3739$	Variance واریانس
9670	Minimum حداقل
914250	Maximum حداکثر
1543	Skewness چولگی
4489	Kurtosis کشیدگی

مأخذ: یافته‌های پژوهش

در تحلیل آماری توصیفی سری زمانی نرخ ارز، که در جدول شماره (۱) قابل مشاهده است، میانگین و میانه، نشان‌دهنده سطح عمومی نرخ ارز، و اختلاف قابل توجه آنها همراه با چولگی مثبت، بر وجود نوسانات نامتقارن و داده‌های پرت دلالت دارد. انحراف معیار و واریانس بالا، دامنه گسترده تغییرات و حساسیت بازار نسبت به شوک‌های داخلی و بین‌المللی را بازتاب می‌دهد. شاخص‌های چولگی و کشیدگی نیز تأکید می‌کنند که توزیع نرخ ارز از تقارن دور است و رفتارهای افراطی، هرچند نادر، نقش قابل توجهی در شکل‌دهی به پویایی بازار دارند.

۱-۵. آشکارسازی ساختارهای غیرخطی با آزمون BDS

نتایج آزمون BDS بر سری زمانی قیمت ریالی دلار آمریکا در بازار آزاد نرخ ارز ایران اعمال شد و نتایج نمایانگر شکستی قاطع در فرضیه استقلال و خطی بودن رفتار قیمت است. مقادیر آماره آزمون به‌طور معنادار و پیوسته در سطوح مختلف بعد تعبیه افزایش یافته‌اند، که نشانه‌ای از پیچیدگی ذاتی و چندبعدی بودن پویایی بازار این ارز است.

جدول ۲. نتایج آزمون BDS برای سری زمانی نرخ ارز دلار

Table 2. BDS test results for the US Dollar exchange rate time series

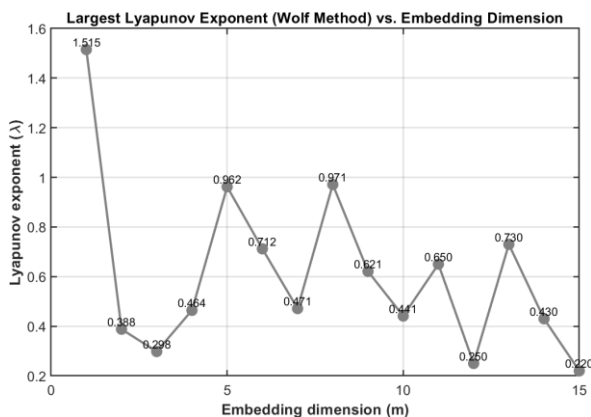
بعد تعبیه	آماره BDS	Z-score	p-value
2	22.2562	44.7029	0.0000
3	37.2471	80.8414	0.0000
4	47.3368	117.0415	0.0000
5	54.1262	156.5537	0.0000
6	58.6897	201.5813	0.0000

مأخذ: یافته‌های پژوهش

مقادیر بسیار بزرگ آماره آزمون یعنی Z-score ها همراه با p-value های نزدیک به صفر مطلق، بیانگر سطح بالای اطمینان آماری برای رد فرضیه سری زمانی تصادفی و مدل‌های خطی کلاسیک می‌باشند. افزایش منظم آماره با m نشان می‌دهد که وابستگی‌های مرتبه بالا و ساختارهای چندبُعدی در سری قیمت دلار وجود دارد. به عبارت دقیق‌تر، بازار با الگوهای همبستگی غیرخطی کار می‌کند و مدل‌های خطی کلاسیک ناکافی‌اند؛ این نتیجه، توجیه رویکرد آشوب‌محور و استفاده از ابزارهای دینامیک غیرخطی در ادامه را فراهم می‌سازد.

۲-۵. تحلیل حساسیت پویایی و بی‌ثباتی ذاتی با طیف نمای لیاپانوف

نمای لیاپانوف به عنوان شاخصی کلیدی در تحلیل سیستم‌های دینامیکی، میزان حساسیت سیستم به شرایط اولیه و تمایل آن به آشوب را مشخص می‌کند. مقدار مثبت این نما، که در داده‌های مورد بررسی برابر با $\lambda = 0.1536873$ است، نشان‌دهنده وجود آشوب در پویایی رفتار دلار در بازار ارز است. مقادیر نما در ابعاد مختلف فضای فاز نیز بیانگر ساختار پیچیده و چندوجهی سیستم است. بیشترین مقدار نمای لیاپانوف در بعد اول ثبت شده که برابر با $1/515$ است، و با افزایش بعد به‌طور تدریجی، کاهش می‌یابد تا در ابعاد بالاتر به مقادیر نزدیک صفر برسد. در ابعاد پایین‌تر، همسایگی‌های محلی با دقت بیشتری منعکس‌کننده حساسیت سیستم به شرایط اولیه‌اند، اما با افزایش بعد، گسترش فضای تعبیه باعث پراکندگی داده‌ها شده و اثر واگرایی متوسط کاهش می‌یابد؛ بنابراین، بیشینه نمای لیاپانوف معمولاً در ابعاد کمتر آشکار می‌شود، جایی که پویایی آشوبناک سیستم به وضوح برجسته است.



شکل ۲. روند تغییر بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف (الگوریتم Wolf) نسبت به بعد embedding

Figure 2. Variation of the largest Lyapunov exponent (Wolf algorithm) with respect to the embedding dimension

مأخذ: یافته‌های پژوهش

الگوی تغییر λ در ابعاد مختلف (با اوج در ابعاد پایین و افت تدریجی در ابعاد بالاتر) با انتظار نظری همخوان است: در تعبیه‌های کم‌بعد، واگرایی مسیرها پررنگ‌تر دیده می‌شود و با افزایش بُعد، بر اثر پراکندگی داده‌ها، بزرگی λ تا حدی تعدیل می‌گردد؛ نوسانات کوچک بین ابعاد ناشی از محدودیت نمونه و حساسیت برآوردگر است و به اعتبار نتیجه آشوبناکی خدش‌های وارد نمی‌کند. بر مبنای معیار تفسیری، این سطح از λ بیانگر شدت نسبتاً بالای آشوبناکی است.

جدول ۳. بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف با استفاده از الگوریتم Wolf

Table 3. Largest Lyapunov exponent estimated using the Wolf algorithm

m	Lyapunov Exponent	m	Lyapunov Exponent	m	Lyapunov Exponent
1	1.515	6	0.712	11	0.650
2	0.388	7	0.471	12	0.250
3	0.298	8	0.971	13	0.730
4	0.464	9	0.621	14	0.430
5	0.962	10	0.441	15	0.220

مأخذ: یافته‌های پژوهش

۳-۵. بررسی حافظه بلندمدت و رفتار همبسته در سری زمانی با نمای هرست

جهت بررسی پویایی بلندمدت و ساختار حافظه‌دار نرخ ارز در بازار آزاد ایران، نمای هرست مطابق با الگوریتم Wavelet محاسبه و مقدار $0/9621$ را نتیجه داد. از آنجا که مقدار H بزرگ‌تر از $0/5$ است، وجود حافظه بلندمدت مثبت در پویایی‌های نرخ ارز دلار آمریکا را نمایان می‌کند. همچنین این آزمون به کمک دو روش مکمل R/S و DFA برآورد شد. همان‌طور که جدول زیر نشان می‌دهد، در هر دو روش مورد استفاده، مقادیر H به‌طور معنی‌داری بالاتر از $0/5$ هستند و بدان معنا است که تغییرات قیمتی در بازار این ارز، دارای روندهای ماندگار بوده و رفتار گذشته، تأثیر قابل توجهی بر روندهای آتی دارد.

جدول ۴. مقادیر نمای هرست (H) به‌دست آمده از دو روش R/S و DFA

Table 4. Hurst exponent (H) values estimated using the R/S and DFA methods

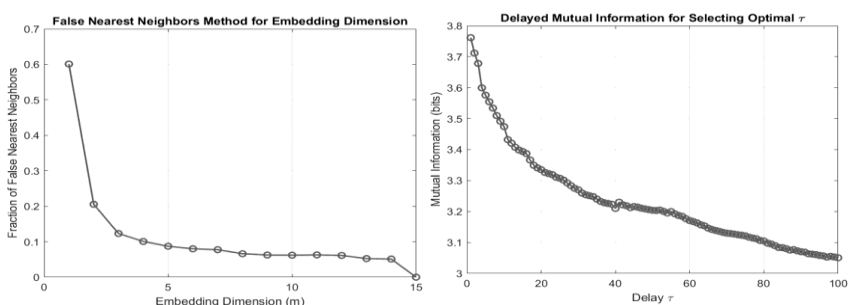
نمای هرست (H)	آزمون مورد استفاده
0/5742	آزمون (R/S)
0/5404	آزمون (DFA)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نزدیکی مقادیر محاسبه شده توسط R/S و DFA به یکدیگر، نشان‌دهنده پایداری آماری و قابلیت اعتماد بالای نتایج است؛ زیرا هر روش با رویکردی متفاوت، به‌طور مستقل به تأیید وجود حافظه بلندمدت در داده‌ها پرداخته است. بنابراین، بازار حافظه مثبت دارد: شوک‌ها و روندها تمایل به تداوم دارند و رفتار بازار به «گام تصادفی خالص» فروکاستنی نیست.

۴-۵. بازسازی فضای فاز و استخراج هندسه پنهان رفتار ارزی

بازسازی فضای فاز، این امکان را ایجاد می‌کند که با استفاده از یک سری زمانی تک‌متغیره، ساختار چندبعدی و دینامیک نهفته در پشت داده‌ها، بازسازی شود و رفتار سیستم، در قالب فضای فاز نمایش داده شود. برای تعیین پارامترهای بازسازی فضای فاز، از روش آزمون اطلاعات متقابل (AMI) جهت تخمین تأخیر زمانی (τ) و روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب (FNN) برای تعیین بعد (m) استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۳) و (۴) مشاهده می‌گردد، نمودارهای مربوط به AMI و FNN نشان‌دهنده نقاط بهینه برای این پارامترها هستند که به‌طور دقیق، ساختار دینامیکی سیستم را بازسازی می‌کنند.



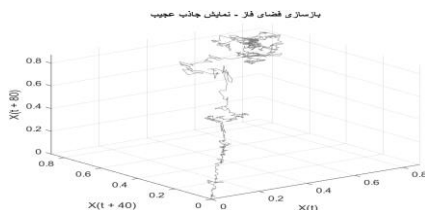
شکل ۳. برآورد تأخیر زمانی optimal شکل ۴. برآورد مقدار بعد بازسازی optimal

Figure 3. Estimation of the optimal time delay
Figure 4. Estimation of the optimal embedding dimension

مأخذ: یافته‌های پژوهش

بر اساس نتایج، انتخاب‌های بهینه $\tau \approx 40$ و $m \approx 15$ بازسازی معنادار دینامیک را ممکن می‌سازد؛ به عبارت دیگر، این انتخاب‌ها اجازه می‌دهند تا «جاذب» پنهان سری زمانی به‌خوبی بازسازی شود. هندسه حاصل فاقد تناوب‌های منظم و سرشار از بازگشت‌های پیچیده است که با وجود جاذب عجیب سازگار است. توجه شود که گرچه بعد تعبیه برای بازسازی نسبتاً بزرگ است، اما (مطابق D_2) دینامیک مؤثر روی مانیفولد کم‌بعد قرار دارد؛ یعنی رفتار ظاهراً پرشاخه، در جوهره خود به چند درجه آزادی مؤثر فروکاسته می‌شود^۱. پس از تعیین پارامترهای بهینه، بازسازی فضای فاز به نحوی انجام شد که ضمن حفظ تمام ویژگی‌های کلیدی دینامیکی، ساختارهای منسجم و بویایی‌های پیچیده نرخ ارز به روشنی قابل مشاهده باشند.

۱. بدین معنا که اگر فقط به بازسازی نگاه کنیم، سیستم خیلی پیچیده و چندشاخه به‌نظر می‌رسد، اما D_2 بیانگر آن است که این پیچیدگی ظاهری در اصل از تنها ۱ تا ۲ درجه آزادی مؤثر ناشی می‌شود و به زبان ساده‌تر باید گفت، آشوب سیستم واقعی نرخ ارز، مانند «رقص بسیار پیچیده‌ای است که در حقیقت توسط یکی دو متغیر کلیدی کنترل می‌شود» و این مسئله، یکی از معیارهای قطعی برای وجود جاذب عجیب است.



شکل ۵. بازسازی فضای فاز برای سری زمانی نرخ ارز

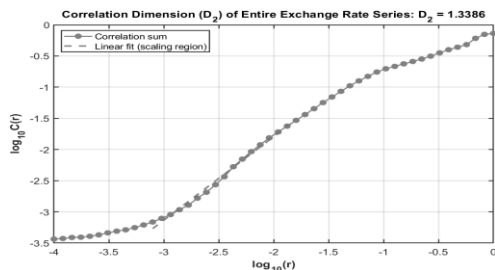
Figure 5. Phase space reconstruction for the exchange rate time series

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار حاصل، فاقد هرگونه الگوی تکرارشونده منظم بوده و به جای آن، مسیریابی پیچیده و پرفرازونشیب با پیچ‌وتاب‌های متعدد و بازگشتی مشاهده می‌شود. ساختار متراکم نشان‌دهنده ناپایداری موضعی و پیچیدگی ذاتی سیستم است. در صورتی که سیستم دارای تناوب ۱ یا شبه‌تناوب ۲ بود، فضای فاز به صورت حلقه‌هایی منظم یا مدارهای بسته ظاهر می‌شد؛ اما در اینجا، مسیرها بدون تقارن و فاقد هرگونه تناوب واضح هستند. این خصیصه، از ویژگی‌های بارز سیستم‌های آشوبناک محسوب می‌شود که فاقد چرخه‌های تکرارشونده پایدارند.

۵-۵. اندازه‌گیری بعد فراکتال با استفاده از روش بعد کوری (D_2 , Correlation Dimension)

محاسبات بعد کوری بر اساس بازسازی فضای فاز با پارامترهای بعد بازسازی برابر با ۱۵ و تأخیر زمانی (T) برابر با ۴۰ انجام شد. تحلیل نمودار و شیب خط برازش شده، مقدار بعد کوری کل سری زمانی نرخ ارز را برابر با ۱/۳۳۸۶ برآورد نمود که معرف یک ساختار فراکتالی پیچیده و آشوبناک است.



شکل ۶. نمودار لگاریتمی $\log C(r)$ برحسب $\log r$ و برازش خطی برای برآورد بعد کوری کل

سری زمانی نرخ ارز

Figure 6. Log-plot of $\log C(r)$ versus $\log r$ with linear fitting for estimating the correlation dimension of the entire exchange rate time series

مأخذ: یافته‌های پژوهش

1. Periodic
2. Quasi-periodic

برای تحلیل دقیق‌تر، بعد کوری برای شش دوره زمانی اصلی تعیین شده در مطالعه، محاسبه شد.

جدول ۵. برآورد بعد کوری برای ۶ دوره زمانی نرخ ارز

Table 5. Correlation dimension estimates for six exchange rate periods

بازه زمانی	Correlation Dimension (D_2)
1388-1390	1.1075
1390-1392	1.3321
1392-1396	1.0431
1396-1398	1.1157
1398-1400	1.0652
1400-1403	1.0281

مأخذ: یافته‌های پژوهش

این مقادیر حقیقی کسری در بازه بین ۱ تا ۲ قرار دارند، که نشانه وجود جذب‌کننده‌های فراکتالی و آشوبناک در دینامیک نرخ ارز است. مقادیر بعد کوری، بیانگر پیچیدگی هندسی بالا و ساختار خودمتشابه در فضای فاز بازسازی شده هستند، که نه به سادگی یک منحنی خطی، و نه صرفاً یک سطح صاف دوبعدی بلکه ساختاری بسیار متراکم و پیچیده را بازتاب می‌دهند.

۵-۶. شناسایی حضور آشوب قطعی از طریق آزمون صفر و یک و شاخص K

برای شناسایی دقیق‌تر وجود آشوب تعیین‌پذیر در سری زمانی نرخ ارز، از آزمون صفر و یک برای آشوب استفاده شد. این آزمون به جای تمرکز بر بازسازی فضای فاز، با تحلیل مستقیم دینامیک سیستم از روی سری زمانی، شاخصی عددی بین صفر (غیرآشوبناک) و یک (آشوب کامل) ارائه می‌دهد. یافته‌های حاصل از شاخص $\bar{K}$ نشان می‌دهند که رفتار نرخ ارز در ایران در بیشتر دوره‌ها در بازه آشوب قطعی قرار داشته است ($\bar{K} = 0.8289$). در این مطالعه، برای بهبود دقت آزمون و تقویت توان تشخیص آن در شرایط اقتصادی خاص ایران، شاخص نهایی $\bar{K}$ برای هر دوره، با استفاده از ترکیب وزنی میان میانگین K ، انحراف معیار، نوسان تاریخی نرخ ارز و وزن دهی α محاسبه شد.

جدول ۶. ارزیابی رفتار آشوبناک نرخ ارز دلار با استفاده از شاخص نهایی K در ۶ دوره

Table 6. Assessment of chaotic behavior in the US Dollar exchange rate using the final K index across six periods

بازه زمانی	دوره سیاستی	K-final
1388-1390	1	0.6083
1390-1392	2	0.7755
1392-1396	3	0.6789
1396-1398	4	0.6936
1398-1400	5	0.7952
1400-1403	6	0.8068

مأخذ: یافته‌های پژوهش

در دوره اول، شاخص K نشان‌دهنده رفتار نوسانی با آشوب پنهان و ساختار نسبتاً منظم است. از دوره دوم به بعد، شاخص افزایش یافته و ناپایداری و پیچیدگی سیستم به تدریج تشدید می‌شود، تا اینکه در دوره ششم، به بالاترین حد خود رسیده و آشوب قطعی با حساسیت بالا و پیش‌بینی ناپذیری کامل را نشان می‌دهد.

۵-۷. تحلیل میزان بی‌نظمی اطلاعاتی و شدت آشوبناکی با استفاده از شاخص‌های آنتروپی برای تحلیل آنتروپی در شش بازه زمانی بررسی شده، می‌توان رفتار دینامیکی نرخ ارز ایران را از منظر میزان بی‌نظمی و تصادفی بودن بررسی کرد. نتایج محاسبات به شرح جدول (۷) است.

جدول ۷. تحلیل تغییرات آنتروپی نرخ ارز در ۶ دوره زمانی با دو شاخص آنتروپی جایگشتی و کولموگروف-سینای (اعداد بر حسب بیت بر واحد زمان)

Table 7. Analysis of exchange rate entropy variations across six periods using permutation entropy and Kolmogorov-Sinai entropy indices (values expressed in bits per unit time)

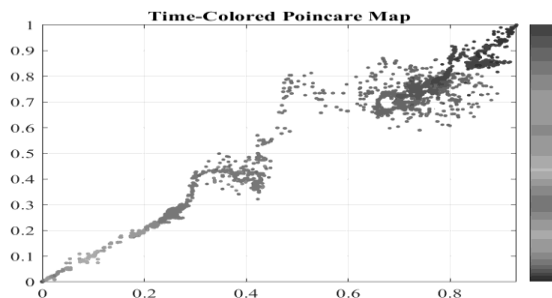
بازه زمانی	آنتروپی کولموگروف-سینای	مقدار آنتروپی جایگشتی
1388-1390	0.9818	0.359938
1390-1392	1.5739	0.834058
1392-1396	1.3780	0.787820
1396-1398	1.4112	0.897092
1398-1400	1.5876	0.461001
1400-1403	1.4314	0.784198

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نرخ ارز دلار در دوره اول (۱۳۸۸-۱۳۹۰) نسبتاً منظم بوده و در دوره‌های دوم تا چهارم، آشوب و پیچیدگی قابل توجهی تجربه کرده است. کاهش موقت آشوب در دوره پنجم (۱۳۹۸-۱۴۰۰) احتمالاً ناشی از سیاست‌های کنترل بازار بوده و در دوره ششم (۱۴۰۰-۱۴۰۳) ناپایداری و پیچیدگی بار دیگر افزایش یافته است.

۵-۸. بازنمایی ساختار بازگشت‌های رفتاری در صفحه فاز با نگاشت پوانکاره

در این مطالعه، نقشه پوانکاره نرخ ارز دلار به ریال ایران برای بازه زمانی ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۳ ترسیم شده است تا شواهد کیفی از وجود ساختارهای غیرخطی و احتمال آشوب در این متغیر اقتصادی به‌دست آید.



شکل ۷. نقشه پوانکاره و الگوهای بازگشتی زمانی در سری زمانی نرخ ارز دلار
Figure 7. Poincaré map and recurrence patterns in the US Dollar exchange rate time series

مأخذ: یافته‌های پژوهش

عدم وجود الگوهای تناوبی، شکل‌گیری خوشه‌های نامنظم با چگالی‌های متفاوت، و ظهور مسیرهای پیچیده و حساس به شرایط اولیه، شواهد محکمی دال بر آشوبناک بودن سری زمانی نرخ ارز فراهم می‌کنند. از منظر ریاضی، این ساختار به یک جاذب عجیب شباهت دارد و به خوبی رفتار غیرخطی، حساس و شبه تصادفی نرخ ارز در دوره زمانی مورد بررسی را نشان می‌دهد.

۵-۹. تحلیل تطبیقی شدت آشوب نرخ ارز در بستر تحولات سیاست‌های ارزی و ژئوپلیتیکی در این بخش، با بهره‌گیری از سه شاخص کلیدی در تحلیل سیستم‌های دینامیکی غیرخطی شامل شاخص $\bar{K}$ ، آنتروپی جایگشتی و آنتروپی کولموگروف-سینای، رفتار دینامیکی نرخ ارز در شش دوره سیاست‌گذاری ارزی در اقتصاد ایران به صورت تطبیقی و ترکیبی بررسی شده است.

جدول ۸. تحلیل تطبیقی و هم‌افزایی شاخص‌های آشوب در نرخ ارز ایران؛

پل ارتباطی سیاست‌های ارزی و پویایی‌های غیرخطی (۱۴۰۳-۱۳۸۸)

Table 8. Comparative and synergistic analysis of chaos indicators in the Iranian exchange rate: Linking monetary policies to nonlinear dynamics (2009-2024)

دوره تاریخی	$\bar{K}$	آنتروپی کولموگروف-سینای	آنتروپی جایگشتی
1388-1390	0.6083	0.9818	0.3599
1390-1392	0.7755	1.5739	0.8341
1392-1396	0.6789	1.3780	0.7878
1396-1398	0.6936	1.4112	0.8971
1398-1400	0.7952	1.5876	0.4610
1400-1403	0.8068	1.4314	0.7842

مأخذ: یافته‌های پژوهش

در دوره نخست (۱۳۸۸-۱۳۹۰)، مقادیر پایین آنتروپی جایگشتی و کولموگروف-سینای، نشانگر نظم نسبی و تولید اطلاعات اندک است؛ وضعیتی که با ثبات اقتصادی، درآمدهای نفتی پایدار و آرامش ژئوپلیتیکی همخوانی دارد. با آغاز فاز اول هدفمندی یارانه‌ها، هرچند فشارهای تورمی شکل گرفت، سیستم هنوز وارد فاز آشوب نشده بود.

در دوره دوم (۱۳۹۲-۱۳۹۰)، تقریباً اوج آشوب و پیچیدگی مشاهده می‌شود؛ آنتروپی کولموگروف-سینای بیشینه شده و نرخ تولید بی‌نظمی به بالاترین سطح خود می‌رسد که بازتاب تحریم‌های شدید، سقوط منابع ارزی و جهش نرخ ارز است.

در دوره سوم (۱۳۹۶-۱۳۹۲)، همزمان با تغییر دولت و مذاکرات هسته‌ای، نظم نسبی بازمی‌گردد؛ آنتروپی جایگشتی بالا می‌ماند؛ اما کاهش آنتروپی کولموگروف-سینای از کنترل نسبی سیستم حکایت دارد.

طی دوره چهارم (۱۳۹۸-۱۳۹۶)، با خروج آمریکا از برجام، دوباره سطح بی‌نظمی و نرخ تولید اطلاعات افزایش می‌یابد و بازار وارد فاز آشوب عمیق می‌شود.

دوره پنجم (۱۴۰۰-۱۳۹۸)، بیانگر «نظم ظاهری» است؛ هرچند آنتروپی جایگشتی کاهش می‌یابد، اما آنتروپی کولموگروف-سینای بالا باقی می‌ماند، نشانگر آن که سیاست‌گذار با سرکوب سیگنال‌ها، نظم صوری ایجاد کرده و آشوب در عمق فعال است.

در نهایت، دوره ششم (۱۴۰۳-۱۴۰۰) اوج بی‌ثباتی و حساسیت سیستم است؛ نمای K و آنتروپی کولموگروف-سینای هر دو در بالاترین سطوح قرار دارند و ساختار اطلاعاتی در وضعیت تعلیق آشوبناکی به‌سر می‌برد، جایی میان نظم و بی‌نظمی کامل، بازتاب‌دهنده رفتار یک سیستم پیچیده و غیرخطی با دینامیک چندوجهی و حساس به تنش‌های سیاسی و نهادی.

۶. بحث

مطالعه حاضر، نه فقط گزارشی از وضعیت گذشته، بلکه هشدار علمی برای آینده است؛ هشدار که می‌گوید در زیست‌بوم اقتصادی امروز، سیاست‌گذاری ارز باید به ساحت پیچیدگی احترام بگذارد و با پذیرش دینامیک‌های درونی سیستم، از ابزارهای هوشمند، منعطف و مبتنی بر فهم آشوب بهره گیرد.

یافته‌های این پژوهش، با شواهد داخلی و خارجی تطابق معناداری دارد، اما نکته‌ای قابل توجه در این میان وجود دارد. در حالی که بیشتر پژوهش‌های خارجی، صرفاً بر تأیید روابط غیرخطی نرخ ارز تأکید دارند، مطالعات داخلی کاملاً همسو با نتایج حاضر بوده‌اند؛ زیرا ساختار اقتصاد ایران در دوره مورد بررسی، محیطی آکنده از بی‌ثباتی، حساسیت بالا به شوک‌ها و پویایی‌های آشوب‌گونه فراهم آورده بود.

تجربه‌های سیاست‌گذاری بانک مرکزی، از جمله تعیین دامنه خرید و فروش ارز و مدیریت عرضه، نشان می‌دهد که پایداری نرخ ارز تنها زمانی امکان‌پذیر است که سیاست‌گذار به درک عمیقی از رفتار جمعی بازار و روانشناسی فعالان اقتصادی دست یابد. این واقعیت تجربی با یافته‌های تحلیل غیرخطی

پژوهش حاضر هم‌راستا است؛ چراکه شاخص‌هایی نظیر نمای لیاپانوف و آنتروپی، وجود پیچیدگی ذاتی، وابستگی‌های مرتبه بالا و نوسانات آشوب‌گونه نرخ ارز را به‌صورت کمی و چندبعدی آشکار ساخته‌اند. بدین ترتیب، نتایج این تحقیق، ضمن تأیید نتایج مطالعات پیشین، بر ضرورت تدوین سیاست ارزی هوشمند، داده‌محور و مبتنی بر درک پویایی‌های غیرخطی بازار تأکید می‌ورزد تا ثبات و پیش‌بینی‌پذیری در بازار ارز به شکلی پایدار حاصل شود.

۷. نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه، نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری ارزی باید هوشمند، داده‌محور و یکپارچه باشد؛ از این‌رو، با اتکا بر نتایج پژوهش حاضر و نیز ابزارهای نظریه آشوب، "نظام ارزی مدیریت‌شده با رویکرد آشوب‌محور"، به‌عنوان گزینه علمی مطلوب پیشنهاد می‌شود و چهارچوب سیاست‌گذاری زیر برای کارآمدی چنین نظام ارزی توصیه می‌گردد:

الف) پایش مستمر شاخص‌های غیرخطی: نمای لیاپانوف، ابعاد فراکتالی، شاخص هرست و آنتروپی کولموگوروف-سینای به‌طور لحظه‌ای رصد شده و آستانه‌های علمی برای ورود بازار به فاز آشوب تعیین می‌شوند. این شاخص‌ها امکان اقدامات پیشگیرانه و محدود، پیش از وقوع بی‌ثباتی شدید را فراهم می‌آورند. ب) مداخلات هوشمند و متناسب با شدت آشوب: در دوره‌های آرام، تقویت ذخایر ارزی و منابع نقدینگی به‌منظور ایجاد حاشیه امن و افزایش تاب‌آوری سیستم اهمیت دارد، زیرا بازار در این مرحله نسبتاً پایدار است و چنین اقداماتی امکان مدیریت بهتر شوک‌های احتمالی آینده را فراهم می‌کند. در دوره‌های آشوب متوسط، به‌کارگیری ابزارهای مشتقه و پوشش ریسک، باعث محدود شدن دامنه نوسانات و کاهش ریسک سیستماتیک می‌شود و به سیاست‌گذار اجازه می‌دهد تا پیشگیرانه از فروپاشی ناگهانی جلوگیری کند. همچنین در دوره‌های آشوب شدید، ترکیبی از مداخلات محدود، تنظیم نرخ بهره و شفاف‌سازی انتظارات بازار ضروری است تا اثرات بالقوه بحران کاهش یابد، اعتماد فعالان حفظ شود و بازار بتواند به مسیر ثبات نسبی بازگردد.

ج) تحلیل دینامیکی چندجاذبی: سیاست‌ها بر اساس وضعیت فاز سیستم تنظیم می‌شوند تا از اعمال یکسان در همه شرایط جلوگیری گردد و واکنش‌ها به نوسانات بهینه و هدفمند باشد.

د) هماهنگی ابزارهای مالی، پولی و نهادی: هم‌افزایی میان سیاست‌های ارزی، پولی و نهادی، نه تنها دامنه آشوب را کاهش می‌دهد بلکه ظرفیت بازار برای جذب شوک‌ها و بازگشت به حوزه جاذب‌های پایدار را افزایش می‌دهد.

سپاسگذاری: موردی وجود ندارد.

تأییدیه‌های اخلاقی: موردی وجود ندارد.

تعارض منافع: موردی وجود ندارد.

سهام نویسندگان: سیده دل آرا موسوی و دکتر احمد گوگردچیان به طور مشترک در طراحی تحقیق، تدوین روش شناسی، تحلیل داده ها و نگارش مقاله همکاری داشته اند.

منابع مالی و حمایت ها: این پژوهش هیچ گونه گرنت مشخصی از آژانس های تأمین مالی در بخش های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

بیانیه هوش مصنوعی: در فرآیند آماده سازی این مقاله، نویسندگان؛ سیده دل آرا موسوی و احمد گوگردچیان از ابزار هوش مصنوعی مولد ChatGPT (OpenAI) صرفاً به منظور ویرایش زبانی و نگارشی و اصلاح برخی عبارات استفاده کرده است. این ابزار در تولید داده ها، انجام تحلیل های علمی، استخراج نتایج، طراحی روش شناسی پژوهش یا اتخاذ تصمیمات علمی پژوهش نقشی نداشته است. تمامی محتوای علمی، داده ها، تحلیل ها، تفسیرها و نتایج مقاله توسط نویسندگان بررسی و تأیید شده و نویسندگان مسئولیت کامل محتوای نهایی مقاله منتشرشده را بر عهده دارند.

References

- Anishchenko, V. S. et al. (2008). Testing chaotic dynamics via Lyapunov exponents. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 114(1-2), 1-2.
- Ahmadi, M. (2021). *Research on the Dynamics of Exchange Rate and Behavioral Structures in the Iranian Economy*. University of Tehran. [In persian]
- Abolhasani, A., Elmi, M., & Mansouri, N. (2023). The impact of financial and trade sanctions on the exchange rate in Iran: A fuzzy approach. *Journal of Financial Economics*, 17(2), 49-94. [In persian]
- Atefimanesh, R. (2015). A review of exchange rate regime classification in OIC member countries and recommendations for Iran. *Journal of Monetary and Fiscal Policies*, 3(10), 32-57. [In persian]
- Azari, S., & Fazeli, M. (2019). Estimating the pass-through of exchange rate to domestic prices in the Iranian economy. *Iranian Economic Research Quarterly*, 54(2), 45-68. [In persian]
- Babazadeh, M., Elmi, S., Etebari, F., & Mahmoudzadeh, S. (2009). Chaotic behavior in the Iranian foreign exchange market using Lyapunov exponents and attractor dimension. *Macroeconomics Research Journal*, 37, 1-20. [In persian]
- Babazadeh, M., Elmi, S., Etebari, F., & Mahmoudzadeh, S. (2008). Maximum Lyapunov exponent in the Iranian foreign exchange market: A chaos theory approach. *Monetary and Banking Research*, 1(2), 53-78. [In persian]
- Bastanifar, I. (2016). Resilience in the monetary and exchange system and its structural requirements under economic threats. *Afaq-e Amniyat*, 31, 5-28. [In persian]
- Bask, M. (1996). Dimensions and Lyapunov exponents from exchange rate series. *Chaos, Solitons & Fractals*, 7(12), 2199-2214.
- Central Bank of the Islamic Republic of Iran. (2012). Exchange rate report, 2011. Tehran: Central Bank of Iran. [In persian]
- Clawson, P., & Sasanpour, C. (1987). Currency shock adjustment: Iran, 1951-1953. *International Journal of Middle East Studies*, 19, 1-22.
- Datta, S. (2024). Entropy measures and exchange rate volatility: Evidence from emerging markets. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 41, 101247.
- Devaney, R. L. (2021). *An Introduction to Chaotic Dynamical Systems* (3rd. ed.). Chapman and Hall/CRC.
- Gao, L., Chen, Y., & Huang, Z. (2023). Assessing chaotic dynamics in currency exchange markets using Lyapunov exponent and fractal dimension. *Chaos, Solitons & Fractals*, 174, 113054.
- Gencay, R., & Dechert, W. D. (1992). Lyapunov exponents as a nonparametric diagnostic for stability analysis. *Journal of Applied Econometrics*, 7(S), S41-S60.
- Guo, J., & Chen, S. (2021). Measuring nonlinear dependence and chaos in exchange rate markets. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 567, 125634.
- Hashemi, M., & Hari, M. S. (2014). Chaotic processes in the stock market using the BDS test and Lyapunov exponent. *Journal of Financial Management and Investment*, n.d., n.p. [In persian]

- Heidari, H., & Aziznejad, S. (Eds.). (2021). *Foreign Exchange Market and Exchange Rate Policies in Iran: Lessons from International Crises*. Tehran: Iranian Parliament Research Center. [In persian]
- Kantz, H., & Schreiber, T. (2003). *Nonlinear Time Series Analysis* (2nd. ed.). Cambridge University Press.
- Kazemi, J., & Nikkhah, M. (2022). Analyzing exchange rate increases and their impact on selected macroeconomic variables in Iran. *Iranian Economic Research Quarterly*, 56(1), 34-56. [In persian]
- Jafari, H., & Rezaei, A. (2023). The effect of real effective exchange rate and its uncertainties on value added of Iran's industrial sector. *Iranian Economic Studies Quarterly*, 14(2), 78-101. [In persian]
- Kuo, W., & Cho, K. (2021). Chaos and complexity in currency markets: An empirical study using entropy and Lyapunov exponents. *Physica A*, 570, 125877.
- Lahmiri, S., & Serletis, A. (2024). Combined Lyapunov exponent and Kolmogorov-Sinai entropy in exchange rate dynamics. *Chaos, Solitons & Fractals*, 175, 113063. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.113063>
- Lee, J., Park, S., & Kim, Y. (2020). Nonlinear and chaotic behavior of foreign exchange rates: An application of BDS and entropy tests. *Physica A*, 537, 122660.
- Marzban, H., Javaheri, B., & Akbarian, R. (2005). A comparison of econometric, time-series, and neural network models in forecasting exchange rates. *Quarterly Journal of Economic Research*, 40(2), 35-60. [In persian]
- Mahmoudi, R., & Salehi, F. (2021). Exchange rate fluctuations and their effects on selected macroeconomic variables in Iran. *Iranian Macroeconomics Journal*, 30(4), 89-112. [In persian]
- Meng, F. et al. (2013). Analysis for global characteristics of Lyapunov exponents in exchange rate time series. *Scientific Reports*, 12, 13411.
- Norouzi, H., Reshnovadi, Y., Firoozan-Sarneghi, T., & Beigi, Sh. (2019). Interactions between exchange rates and the Iranian stock market: A simultaneous equation system approach. *Economic Modeling Research*, 39(10), 20-56. [In persian]
- Oman Adjepong, E., Mensah, R., & Darko, F. (2023). Detecting nonlinearities and chaotic dynamics in foreign exchange markets: Evidence from multiple currency pairs. *Physica A*, 589, 126680.
- Özkaya, A. (2022). Evidence of chaotic behavior in the Turkish lira exchange rates: A nonlinear dynamics approach. *Physica A*, 594, 127032.
- Sadeghi, F. (2002). A review of chaos theory and its applications in economics. *Iranian Economic Research Quarterly*, 12, 29-50. [In persian]
- Sadeghi, A., & Tayebi, S. K. (2018). The effects of international sanctions and other determinants on inflation in Iran (1981-2017). *Iranian Economic Research*, 74, 33-57. [In persian]
- Salehi-Isfahani, D., & Pesaran, M. H. (2022). *The Iranian Economy in the Twentieth Century: A Global Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Shakeri, A. (2025). *Economic Historiography of Iran over Six Decades (1960-2021)*. Tehran: Ney Publishing. [In persian]
- Shaliari, F., Armen, S. A., & Salahmanesh, A. (2022). The effect of exchange rate uncertainty on inflation and interest rate volatility: The role of monetary and fiscal policy credibility. *Iranian Journal of Applied Economic Studies*, 11(43), 9-37. [In persian]