

Investigating the Mutual Information Content of Stock, Currency, and Gold Markets Based on Generalized Entropy Mutual Information Measure and Bayesian Network¹

Mohammad Javad Tavakoli², Asgar Noorbakhsh³

Received: 20 July

Revised: 20 February

Accepted: 22 February

Published Online: 27 February

Research Paper

Highlights:

- Strong information links exist among Iran's gold, currency, and stock markets.
- Currency and gold transmit shocks; the stock market mainly receives them.
- Currency–gold linkage is strongest; other ranking differences are negligible.
- Spillovers indicate inefficiency due to policy, exchange-rate, and trading frictions.
- Nonlinear, behavior-driven linkages suggest a rolling monitoring framework using leading indicators.

Abstract

This study investigates the mutual information content among Iran's gold, currency, and stock markets using a mutual information measure based on generalized entropies and Bayesian network analysis. The analysis is grounded in daily data on the total stock index, the free-market exchange

1 . doi:

Cite this article: Tavakoli, Mohammad Javad; Noorbakhsh, Asgar (2025). Investigating the Mutual Information Content of Stock, Currency, and Gold Markets Based on Generalized Entropy Mutual Information Measure and Bayesian Network. *Journal of Securities Exchange*, 59 (X), 1-20. <http://doi.org/>

2. Ph.D student, Department of Finance, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran. (mjtaavakoli@ut.ac.ir).

3. Assistant Professor, Department of Financial Management, Faculty of Management and Accounting, College of Farabi, University of Tehran, Qom, Iran. (Corresponding Author). (anoorbakhsh@ut.ac.ir).

rate (US dollar), and the price per gram of 18-carat gold over the period 2019–2025. Marginal and joint probability mass functions of the variables were estimated through optimal classification schemes, followed by the estimation of mutual information coefficients derived from Rényi entropy. The empirical findings reveal significant mutual information among the stock index, gold, and currency markets. According to the Bayesian network analysis, the magnitude of dependence-i.e., the mutual information content across markets- remained consistent across all causal structures. The strongest information linkage was observed between the currency and gold markets, while the weakest was between the stock and gold markets. A comparison of the two methodologies indicates that both approaches yield nearly identical rankings of the markets' mutual information content. These findings provide evidence in support of asset integration theory and confirm the existence of informational interdependence and spillovers among the gold, currency, and stock markets, which are inconsistent with full informational efficiency-particularly in its semi-strong form. Furthermore, the combined application of entropy-based and Bayesian network methods, grounded in the empirical probabilities of risky asset values, offers a novel and more transparent analytical tool for measuring information content across capital markets-an approach.

Keywords: Bayesian network, Information spillover, Mutual information

JEL classification: G14, C11, D85.

Introduction

This study focuses on analyzing the complex informational relationships between three core pillars of the global financial system: gold, currency, and stock markets. Understanding these interactions is crucial for comprehending financial system behavior. The research aims to evaluate the mutual informational content between these markets using advanced, non-linear methods to gain deeper insights into information transfer mechanisms and cross-market fluctuations.

The research employs two primary, complementary methods. First, it uses mutual information, a non-parametric measure capable of capturing all forms of linear and non-linear dependency between markets without assuming a specific data distribution, which is ideal for complex financial data. Second, it utilizes Bayesian network analysis to model causal relationships and conditional dependency structures, representing markets as nodes and informational flows as directed edges. Together, these methods allow for a multi-level analysis: mutual information quantifies the overall intensity of informational dependency, while Bayesian networks reveal its causal structure. Note that the directed links in the Bayesian network represent dominant directional conditional dependencies inferred from data under the modeling assumptions, and should not be interpreted as definitive structural causality.

While entropy and mutual information concepts are used in various financial physics applications, their combined use with Bayesian networks for evaluating mutual informational content across key markets is less explored. Specifically, the comparative performance of these probability-based methods has not been sufficiently studied. Therefore, this research seeks to fill this gap by applying both methods in tandem to the Iranian financial markets. Its central question is: What is the mutual informational content between Iran's gold, currency, and stock markets, and what common insights do the

mutual information measure and the Bayesian network method provide about this content?

Methodology

This research investigates the mutual informational relationships between Iran's gold, currency, and stock markets using daily data from 25/03/2019 to 15/03/2025. The study employs a method-oriented approach, relying on two primary tools—Mutual Information/Entropy and Bayesian Networks—to discover linear and non-linear dependencies without presupposing an explicit theoretical model. To measure the overall intensity of informational dependency, the Mutual Information measure is used, calculated based on Shannon entropy and its generalization, Rényi entropy (with parameter α). This measure can identify all forms of dependency. As the data are continuous, the series were discretized using an optimal binning procedure; several standard binning rules (e.g., Freedman–Diaconis, Scott, and Sturges) were evaluated and the best-performing rule was selected. In our data, the Freedman–Diaconis rule provided the optimal discretization for all three return series. To uncover the causal structure and direction of information flow, Bayesian Networks are employed. Two distinct causal structures (with either gold or currency as the primary causal variable) are designed. The network parameters are estimated using the Hill-Climbing learning algorithm, optimized against the Schwarz criterion. All analyses are conducted in the R software environment, version 4.3.3.

Results

The computed mutual information coefficients for all market pairs (gold-currency, gold-stock, currency-stock) across all levels of the α parameter (including 0.5, 1.01, 2, and 5) were positive and significantly greater than zero. A direct relationship was observed between an increase in the α value and an increase in the mutual

information coefficients, indicating that smaller α values (e.g., 0.5) yield more conservative results. Statistical tests on rolling windows of 200 observations also confirmed the significance of these informational relationships at the 0.05 error level.

Bayesian network analysis was conducted with two different causal structures (gold as the primary cause or currency as the primary cause). The results revealed that the choice of causal structure did not affect the estimated "strength of dependency" between the variables, which was measured reciprocally. Based on the reduction in the BIC criterion, the strongest informational relationship was identified between the currency and gold markets. Following that, and by a considerable margin, the relationship between currency and the stock market was ranked second, while the weakest link was observed between gold and the stock market.

Both methods identified the strongest informational link between the gold and currency markets, demonstrating a convergence of results. Regarding the weaker relationships (between the stock market and currency/gold), the ranking of the two methods differed slightly: the mutual information method ranked gold-stock second and currency-stock third, whereas the Bayesian network reversed this order. Given the small magnitude of these relationships, this minor discrepancy can be considered negligible, leading to the conclusion that the overall performance of both methods in assessing the mutual informational content of the markets is consistent and acceptable.

In the 200-day rolling-window analysis, the mean difference between the two weaker links is very small relative to their variability (Cohen's $d \approx 0.11$), confirming that this rank reversal does not change the main inference.

Conclusions

This research demonstrates that Iran's gold, currency, and stock markets do not operate in isolation; rather, a powerful and significant flow of information exists between them. The detected spillovers imply incomplete informational efficiency and, in Iran, can plausibly reflect policy-driven shocks, the dual exchange-rate regime, and stock-market microstructure frictions (e.g., price limits and trading halts) that can delay price discovery in equities relative to currency and gold.

The results from both analytical methods (mutual information and Bayesian networks) conclusively reveal that the strongest informational linkage is between the currency and gold markets. These two markets act as primary transmitters of information, largely explaining fluctuations in the stock market. In other words, the stock market primarily acts as a receiver of informational waves and systemic shocks transmitted through the currency and gold markets.

To better manage the systemic risks arising from these interconnections and prevent the spread of instability, an institutional solution is proposed: the establishment of an integrated financial system monitoring platform. Such a system, by continuously tracking information flows between markets, could facilitate the timely identification of high-risk periods and enable effective, informed policy interventions by regulators.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous referees for their constructive comments.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

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

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



سازمان بورس و اوراق بهادار، مدیریت پژوهش، توسعه و مطالعات اسلامی

فصلنامه بورس اوراق بهادار، سال، شماره، ۱۴۰۵، صص

بررسی محتوای اطلاعاتی متقابل بازار سهام، ارز و طلا مبتنی بر

اندازه اطلاع متقابل آنروپی های تعمیم یافته و شبکه بیزین^۱

محمدجواد توکلی^۲، عسگر نوربخش^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/.../... تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/.../...

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/.../... تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/.../...

مقاله پژوهشی

۱. کد doi مقاله:

۲. دانشجوی دکتری، گروه مدیریت مالی و حسابداری، پردیس بین المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران.

(mjtavakoli@ut.ac.ir)

۳. استادیار، گروه مدیریت مالی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشکده گان فارابی دانشگاه تهران، قم، ایران.

(نویسنده مسئول) (Email: anoorbakhsh@ut.ac.ir)

استناد: توکلی، محمدجواد؛ نوربخش، عسگر (۱۴۰۵). برآورد محتوای اطلاعاتی متقابل بازار سهام، ارز و طلا

مبتنی بر اندازه اطلاع متقابل آنروپی های تعمیم یافته و شبکه بیزین. **فصلنامه بورس اوراق بهادار**،

... (....)، ...-....

<http://doi.org/>

نکات برجسته:

- پیوندهای اطلاعاتی قوی بین بازارهای طلا، ارز و سهام ایران وجود دارد.
- ارز و طلا شوک‌ها را منتقل می‌کنند؛ بازار سهام عمدتاً آنها را دریافت می‌کند.
- پیوند ارز-طلا قوی‌ترین است؛ سایر تفاوت‌های رتبه‌بندی ناچیز هستند.
- سرریزها نشان‌دهنده ناکارآمدی ناشی از اصطکاک‌های سیاستی، نرخ ارز و معاملات هستند.
- پیوندهای غیرخطی و مبتنی بر رفتار، یک چارچوب نظارتی مداوم با استفاده از شاخص‌های پیشرو را نشان می‌دهند.

چکیده

پژوهش حاضر محتوای اطلاعاتی متقابل بازارهای طلا، ارز و سهام را با استفاده از اندازه اطلاع متقابل مبتنی بر آنتروپی‌های تعمیم‌یافته و تحلیل شبکه بیزین مورد تحلیل قرار داده است. در این تحقیق مقادیر شاخص کل بورس، نرخ ارز در بازار آزاد (دلار آمریکا) و قیمت هر گرم طلای ۱۸ عیار با تواتر روزانه طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۳ مبنای تحلیل قرار گرفت. برآورد توابع جرم احتمال حاشیه‌ای و توأم متغیرها با استناد به بهترین دسته‌بندی از متغیرها انجام شده و سپس ضرایب اطلاع متقابل مبتنی بر آنتروپی رنی برآورد شدند. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که شاخص بورس، بازار طلا و ارز، دارای محتوای اطلاعاتی متقابل از یکدیگر بوده‌اند. براساس تحلیل شبکه بیزین در هر ساختار علی بین این بازارها، اندازه وابستگی (محتوای اطلاعاتی متقابل بازارها) به یک اندازه بوده است. بیشترین محتوای اطلاعاتی بین بازار ارز و طلا و کمترین آن نیز بین بازار سهام و طلا وجود دارد. مقایسه نتایج دو روش نشان داد که عملکرد هر دو روش در رتبه‌بندی میزان محتوای اطلاعاتی بازارها از یکدیگر، تقریباً مشابه بوده است. از این رو یافته‌های تحقیق شواهدی در راستای تبیین نظریه ادغام دارایی‌ها و وجود وابستگی/سرریز اطلاعاتی بین بازارهای طلا، ارز و سهام ارائه می‌دهد که با کارایی اطلاعاتی کامل (به‌ویژه در معنای نیمه‌قوی) سازگار نیست. با استناد به نتایج تحقیق، بکارگیری دو روش آنتروپی و شبکه بیزین بر پایه احتمالات تجربی مقادیر دارایی‌های ریسکی در کنار یکدیگر، ابزاری برای شفاف‌سازی بیشتر در خصوص نحوه سنجش محتوای اطلاعاتی بین بازارهای سرمایه است.

واژه‌های کلیدی: اطلاع متقابل، سرریز اطلاعات، شبکه بیزین.

طبقه‌بندی موضوعی: G14, C11, D85

مقدمه

تحلیل روابط اطلاعاتی بین بازارهای مالی همواره به عنوان یکی از چالش‌برانگیزترین موضوعات در حوزه اقتصاد مالی مطرح بوده است. بازارهای طلا، ارز و سهام به عنوان سه رکن اصلی نظام مالی جهانی، در تعامل پیچیده‌ای با یکدیگر قرار دارند که شناخت این روابط می‌تواند به درک بهتر رفتار سیستم مالی در شرایط مختلف منجر شود (باور و لوسی^۱، ۲۰۱۰). در این راستا، ارزیابی محتوای اطلاعاتی متقابل این بازارها با استفاده از روش‌های نوین می‌تواند بینش عمیق‌تری از مکانیسم‌های انتقال اطلاعات و نوسانات بین بازاری ارائه دهد.

روش اندازه اطلاع متقابل به عنوان یک ابزار قدرتمند برای سنجش وابستگی‌های غیرخطی و غیرپارامتریک بین بازارها مطرح است (ربردو^۲، ۲۰۱۳). این روش برخلاف معیارهای سنتی مانند همبستگی، قادر است کلیه اشکال وابستگی (خطی و غیرخطی) را شناسایی کند و میزان اطلاعات مشترک بین بازارها را بدون هرگونه پیش‌فرضی درباره توزیع داده‌ها کمی‌سازی نماید. این ویژگی در تحلیل بازارهای مالی که معمولاً از توزیع‌های غیرگوسی و روابط پیچیده برخوردارند، مزیت قابل توجهی محسوب می‌شود (بنلاگا و العمری^۳، ۲۰۲۱). همچنین، تحلیل شبکه‌های بیزین نیز به عنوان مکمل روش‌های اطلاعاتی، امکان مدلسازی روابط علی و ساختارهای وابستگی شرطی بین بازارها را فراهم می‌آورد. این شبکه‌ها با ترکیب دانش پیشینی و داده‌های تجربی، قادرند ساختارهای پنهان انتقال اطلاعات بین بازارها را شناسایی کنند. در این چارچوب، هر بازار به عنوان یک گره و روابط اطلاعاتی به صورت یال‌های جهت‌دار نمایش داده می‌شوند که شدت و جهت انتقال اطلاعات را مشخص می‌کنند (الیوت^۴ و همکاران، ۲۰۱۴).

تحلیل اطلاع متقابل و شبکه‌های بیزین امکان تحلیل چندسطحی از روابط بین بازارها را فراهم می‌سازد. در سطح اول، اطلاع متقابل شدت کلی وابستگی اطلاعاتی را اندازه‌گیری

1. Baur & Lucey
2. Reboredo
3. Benlagha and El Omari
4. Elliott

می‌کند و در سطح دوم، شبکه‌های بیزین ساختار علی و روابط شرطی این وابستگی‌ها را آشکار می‌سازند. این رویکرد می‌تواند الگوهای پویای انتقال اطلاعات را با دقت بیشتری شناسایی کند. در این تحقیق برای سنجش محتوای اطلاعاتی بازارهای سرمایه از یکدیگر بر مفهوم آنتروپی و شبکه بیزین تکیه می‌شود، زیرا امکان تجزیه و تحلیل غیر خطی روابط در بازارهای سرمایه را بر اساس ترتیب و میزان به اشتراک گذاری اطلاعات در بازار و به منظور درک بهتر اثر بحران فراهم می‌کند. آنتروپی به عنوان مبحث اصلی در نظریه اطلاعات، به طور گسترده در زمینه‌های زیادی در فیزیک مالی (ژو^۱، ۲۰۱۸)، پیش بینی قیمت سهام (کاراجا^۲ و همکاران، ۲۰۲۰)، درآمد بازار سهام (وانگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۰)، بهینه سازی سبد سهام (آکسارایلی و پالا^۴، ۲۰۱۸) و خوشه بندی بازار (چنگ و وی^۵، ۲۰۰۹) مورد استفاده قرار گرفته است. در حالی که مفهوم آنتروپی چندمتغیره و اطلاعات متقابل در ارزیابی محتوای اطلاعاتی بازارهای سرمایه کمتر مورد توجه بوده است. از طرفی، شبکه بیزین نیز بر پایه احتمالات تجربی و شرطی مقادیر شاخص بورس و قیمت دارایی‌ها در بازارهای موازی، امکان بررسی وجود هر نوع ارتباط (خطی یا غیرخطی) را با اتکا به مفاهیم احتمالات شرطی فراهم می‌آورد. اما علی رغم اینکه هر دو روش آنتروپی و شبکه بیزین بر پایه احتمالات تجربی مقادیر دارایی‌های ریسکی انجام می‌گیرند، هنوز نحوه عملکرد آنها در مقایسه با یکدیگر مورد مطالعه قرار نگرفته است. از این رو بکارگیری هر دو روش در کنار یکدیگر می‌تواند تأییدی بر یافته‌های روش دیگر و یا شفاف سازی بیشتر در خصوص نحوه سنجش محتوای اطلاعاتی بین بازارهای سرمایه باشد.

بازارهای مالی ایران در سال‌های اخیر هم‌زمان با تحریم‌های مالی و تجاری، تورم بالا و ناپایداری‌های سیاسی-اقتصادی، با جهش‌ها و شکست‌های ساختاری مکرر مواجه بوده‌اند. وجود رژیم چندنرخ ارز (رسمی/آزاد) و نقش مداخلات سیاستی در بازار ارز و طلا موجب می‌شود بخشی از اطلاعات کلان ابتدا در نرخ ارز بازار آزاد (به عنوان قیمت سیگنال ساز) و قیمت طلا منعکس شود و سپس با وقفه به بازار سهام منتقل گردد. افزون بر این، قیود ریزساختاری بورس (مانند دامنه نوسان، توقف/تعطیل نمادها و برخی مداخلات حمایتی) می‌تواند سرعت

1. Xu
2. Karaca
3. Wang
4. Aksaraylı and Pala
5. Cheng and Wei

کشف قیمت را در بورس نسبت به بازارهای ارز و طلا کاهش دهد. بنابراین، انتظار می‌رود روابط بینابازاری در ایران نه تنها خطی نبوده، بلکه نامتقارن و زمان‌متغیر باشد.

در چنین بستری، تکیه صرف بر ابزارهای خطی (همبستگی، VAR/VECM و ...) ممکن است بخش مهمی از وابستگی‌ها، به‌ویژه وابستگی‌های غیرخطی و رژیم‌ها را نادیده بگیرد. اطلاع متقابل مبتنی بر آنتروپی رنی شدت وابستگی کلی^۱ را بدون تحمیل فروض سخت‌گیرانه در مورد خطی بودن یا نرمال بودن بازده‌ها اندازه‌گیری می‌کند؛ در حالی که شبکه بیزین با اتکا به استقلال‌های شرطی، ساختار شبکه‌ای ارتباطات و جهت غالب انتقال اطلاعات را آشکار می‌سازد. استفاده هم‌زمان از این دو رویکرد امکان تمایز بین «شدت کل وابستگی» و «ساختار/جهت وابستگی» را فراهم کرده و تفسیر نتایج را مستحکم‌تر می‌کند.

از این رو مسئله اصلی تحقیق حاضر این است که محتوای اطلاعاتی متقابل بازارهای طلا، ارز و سهام از یکدیگر در ایران چگونه است؟ و اندازه اطلاع متقابل و روش شبکه بیزین چه اطلاعات مشترکی نسبت به محتوای اطلاعاتی متقابل بازارهای طلا، ارز و سهام ارائه می‌دهند؟

مبانی نظری و توسعه فرضیه‌ها

ارتباط بین بازارهای مالی از طریق چندین کانال صورت می‌گیرد. کانال‌های نهادی مانند سرمایه‌گذاران نهادی که در چندین بازار فعالند، نقش مهمی در انتقال اطلاعات ایفا می‌کنند (منکوف^۲ و همکاران، ۲۰۱۱). کانال‌های روان‌شناختی مانند اثرات سرریز احساسات بازار نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (بیکر^۳ و همکاران، ۲۰۱۲). از دیدگاه تکنولوژیک، پیشرفت‌های فناوری اطلاعات و یکپارچگی پلتفرم‌های معاملاتی، همبستگی بین بازارها را افزایش داده است (چوردیا^۴ و همکاران، ۲۰۰۵). نظریه وابستگی متقابل بازارها استدلال می‌کند که سرریز قیمت نتیجه طبیعی جهانی‌سازی مالی است. با افزایش یکپارچگی بازارهای مالی، شوک‌ها سریع‌تر و با شدت بیشتری منتقل می‌شوند. این نظریه بر نقش عوامل بنیادی مانند تجارت بین‌المللی، جریان‌های سرمایه و همگرایی سیاست‌های اقتصادی تأکید دارد. مطالعات نشان داده‌اند که درجه سرریز قیمت بین بازارهای سهام کشورهای توسعه‌یافته در دو دهه اخیر

1. Unconditional Dependence

2. Menkhoff

3. Baker

4. Chordia

به طور قابل توجهی افزایش یافته است. نظریه بحران‌های هماهنگ بر این ایده استوار است که سرریز قیمت در دوره‌های بحران ماهیت متفاوتی دارد. ماسون^۱ (۱۹۹۸) این پدیده را «سرایت بحران» نامید و استدلال کرد که در شرایط خاص، شوک‌ها می‌توانند به بازارهایی سرریز کنند که هیچ ارتباط بنیادی با هم ندارند. این نظریه با مشاهده بحران آسیایی ۱۹۹۷ تقویت شد، زمانی که مشکلات تایلند به سرعت به سایر اقتصادهای نوظهور سرایت کرد، بدون آنکه این کشورها از نظر اقتصادی ارتباط نزدیکی با هم داشته باشند. نظریه شبکه‌های مالی رویکرد جدیدی برای تحلیل سرریز قیمت ارائه می‌دهد. این نظریه بازارهای مالی را به عنوان یک شبکه پیچیده مدلسازی می‌کند که در آن برخی نهادها یا بازارها نقش هاب مرکزی را ایفا می‌کنند (دیبولد و ییلماز^۲، ۲۰۱۲). شوک‌هایی که به این نقاط مرکزی وارد می‌شوند، می‌توانند اثرات نامتناسبی بر کل سیستم داشته باشند. این نظریه به ویژه برای درک بحران مالی ۲۰۰۸ مفید بود. نظریه رفتار گله‌ای رویکردی روان‌شناختی به پدیده سرریز قیمت دارد. این نظریه استدلال می‌کند که در شرایط عدم اطمینان، سرمایه‌گذاران تمایل دارند از رفتار دیگران تقلید کنند، حتی اگر این رفتار غیرمنطقی باشد (کافی^۳، ۲۰۲۱). این پدیده می‌تواند منجر به سرریز قیمت‌هایی شود که با عوامل بنیادی توجیه نمی‌شوند. بحران دات‌کام^۴ در سال ۲۰۰۰ مثال بارزی از این نوع سرریز قیمت بود، زمانی که حباب قیمت سهام فناوری بر سایر بخش‌های بازار نیز تأثیر گذاشت.

در ادبیات مالی، منشأ شوک‌ها را می‌توان دست‌کم در دو دسته کلی طبقه‌بندی کرد: (۱) شوک‌های بنیادی^۵ که از عوامل کلان و سیاستی ناشی می‌شوند (مانند تغییرات درآمد‌های ارزی، سیاست ارزی و پولی، تورم و شدت/تغییر تحریم‌ها) و (۲) شوک‌های نویزی/روانی^۶ که بیشتر از انتظارات کوتاه‌مدت، شایعات، رفتار گله‌ای و هیجانات معاملاتی منشأ می‌گیرند. در اقتصادهای تورمی و محدودیت‌زده، ارز و طلا غالباً نقش «دارایی ذخیره ارزش» پیدا می‌کنند و در دوره‌های بی‌ثباتی، سازوکار «گریز به دارایی‌های امن»^۷ می‌تواند باعث شود جریان اطلاعات/نقدینگی از دارایی‌های پرریسک (سهام) به سمت دارایی‌های امن‌تر (طلا و ارز)

1. Mason
2. Diebold & Yılmaz
3. Coffee
4. dot-com
5. Fundamental Shocks
6. Noise Shocks
7. Flight to Safety

حرکت کند. این چارچوب نظری می‌تواند هم پیوند قوی طلا-ارز و هم پیشرو بودن ارز/طلا و دریافت‌کننده بودن بورس را توضیح دهد. در عین حال، تفکیک تجربی دقیق شوک‌های بنیادی و نویزی نیازمند شاخص‌های مکمل (رویدادمحور، متغیرهای سیاستی یا شاخص‌های احساسات) است که به‌عنوان محدودیت پژوهش و مسیر مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

پیرو تئوری‌های مالی مطرح در حوزه ارتباط بین بازارهای مالی، مطالعات متعددی انجام شده است. امیدی و جمشیدی (۱۴۰۴) نشان داده‌اند که شاخص کل تمایل معناداری به واکنش همسو با تکانه‌های ناشی از بازارهای ارز، نفت و طلا دارد. رودری و همکاران (۱۴۰۱) نشان دادند که عمده ارتباط میان نوسانات نرخ ارز، تورم، قیمت سهام و مسکن به صورت کوتاه مدت است و با افزایش نوسانات ارزی، بازار سهام به شدت متلاطم می‌شود. بنابراین، کنترل نوسانات ارز در کوتاه مدت مانع از افزایش نوسانات تورم و قیمت مسکن خواهد شد. فیروزی (۱۳۹۹) نیز در تحقیقی ارتباط دینامیک بین قیمت طلا و نرخ ارز مستند کرده است. حمید انور (۱۳۹۹) با بررسی نحوه پاسخ بازارهای سهام کشورهای منتخب خاورمیانه به شوک ارزی نشان داده که نرخ ارز رابطه تنگاتنگی با بازارهای مالی دارد. تغییرات نرخ ارز بر ارزش‌داری‌ها و فعالیت‌های شرکت‌ها اثر می‌گذارد. همچنین یکی از مهمترین عوامل رونق اقتصادی و رونق بازار بورس، بازدهی سهام است.

در حوزه مطالعات انجام شده در خارج از کشور نیز، پژوهش بروداستوک^۱ و همکاران (۲۰۲۵) با تحلیل بیش از ۱۰۰ مقاله اخیر نشان داده که انتقال نوسانات بین بازارهای کالا و انرژی در سال‌های اخیر به طور قابل توجهی افزایش یافته است. مطالعه صدیقی^۲ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از شاخص‌هایی مانند نرخ رشد تولیدات صنعتی، تورم، نرخ ارز و هزینه‌های نظامی حاکی از این است که تغییرات در شاخص‌های کلان اقتصادی به طور مستقیم بر شاخص سهام تاثیرگذار است و این نتایج موید وجود محتوای اطلاعاتی از شاخص‌های کلان در بازار سهام است. دودیک^۳ (۲۰۲۰) نشان داده که شاخص‌های کلان اقتصادی و عملکرد بازارهای سرمایه ناکارآ هستند، به این معنی که قیمت سهام اطلاعات عمومی فعلی موجود را منعکس نمی‌کند. به عبارت دیگر، وقتی بازار شفاف است و رفتار سرمایه‌گذاران منطقی است، داده‌های کلان

1. Broadstock

2. Siddiqi

3. Dodig

اقتصادی باید در ارزش شاخص‌های سهام گنجانده شود. بویان و چوداری^۱ (۲۰۲۰) در تحقیقی نشان می‌دهد که بین متغیرهای کلان اقتصادی و شاخص‌های مختلف بازار سهام در ایالات متحده اما نه در کانادا، رابطه بلندمدت پایداری وجود دارد. روی^۲ (۲۰۲۰) با بررسی روابط علی بین بازار سهام و سایر بازارهای مالی نشان داده که سه معادله همجمعی بین این بازارها وجود دارد که نشان‌دهنده وجود روابط متعادل بلند مدت است و وقتی شاخص سهام به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود، شواهد علیت دو طرفه کوتاه مدت بین واردات و تولید ناخالص داخلی وجود دارد و وجود علیت گرنجر یک طرفه از صادرات به واردات نیز مشاهده شود. نتایج مطالعه پال و گارگ^۳ (۲۰۲۰) نیز نشان داده که شوک‌های کلان خارجی به طور مداوم بر بازار سهام هند تسلط دارد و تأثیر شوک‌های کلان اقتصادی داخلی بر آن نسبتاً کمتر است. محققان در این تحقیق معتقدند که درک پویایی بازار سهام در برابر شوک‌های کلان اقتصادی داخلی و عوامل جهانی می‌تواند به سیاست‌گذاران برای افزایش اثربخشی سیاست‌ها و متخصصان مالی شرکت‌ها برای تصمیم‌گیری کمک کند. جین و گو^۴ (۲۰۲۰) نیز با بررسی ارتباط پویای بین بازار سهام و اقتصاد کلان در بخش‌های مختلف نشان می‌دهند که برای بازار سهام ایالات متحده، سه شاخص بخشی شامل مصرف، صنعت و املاک از سال ۲۰۱۳ پیش بین متغیرهای کلان بوده‌اند. برای بازار سهام چین، روابط این بخش‌ها متفاوت است. شاخص بخش املاک و صنعت از سال ۲۰۱۰ پیش بین متغیرهای کلان اقتصادی مربوطه بوده‌اند و رابطه بین شاخص بخش مصرف و کل خرده‌فروشی‌ها همیشه مثبت یا منفی نیست، به این معنی که بخش مصرف همیشه میزان فروش خرده‌فروشی را تعیین نمی‌کند.

مرور مطالعات تجربی این حوزه نشان می‌دهد که تحقیقات متعددی به بحث در خصوص ارتباط بین بازار سهام و سایر بازارهای موازی به خصوص شاخص‌های کلان اقتصادی پرداخته‌اند و در این راستا از روش‌های متداول ارتباط سنجی که روابط خطی متغیرها را مورد سنجش قرار می‌دهد به بررسی این ارتباط پرداخته‌اند. آزمون‌های رایج در این خصوص تاکنون عبارتند از: روش‌های رگرسیون خطی، آزمون‌های همجمعی و مدل‌های خودرگرسیون برداری، آزمون‌های علیت گرنجر و ..، اما در این تحقیق با اتکا به ویژگی‌های توزیعی مقادیر داده‌ها

1. Bhuiyan and Chowdhury

2. Roy

3. Pal and Garg

4. Jin and Guo

به سنجش محتوای اطلاعاتی متقابل بازارهای سرمایه نسبت به یکدیگر پرداخته می‌شود و در این راستا از ابزار آنتروپی و ضریب اطلاع متقابل بازارها استفاده شده است که وجه تمایز اصلی تحقیق حاضر با سایر مطالعات پیشین در این حوزه است. بر این اساس، فرضیه‌های مورد آزمون در این تحقیق به این صورت تدوین شده‌اند:

فرضیه اول: بازارهای طلا، ارز و سهام در ایران دارای محتوای اطلاعاتی متقابل نسبت به یکدیگر هستند.

فرضیه دوم: اندازه اطلاع متقابل و روش شبکه بیزین دارای نتایج مشابه نسبت به محتوای اطلاعاتی متقابل بازارهای طلا، ارز و سهام هستند.

روش‌شناسی پژوهش

جامعه آماری این پژوهش بورس اوراق بهادار تهران است که اطلاعات آن در کنار بازارهای موازی ارز و طلا مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور اطلاعات شاخص کل بورس، نرخ ارز در بازار آزاد (دلار آمریکا) و قیمت هر گرم طلای ۱۸ عیار از تاریخ ۱۳۹۸/۰۱/۰۵ تا ۱۴۰۳/۱۲/۲۵ با تواتر روزانه جمع‌آوری و مبنای تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

در این تحقیق با استفاده از شبکه بیزین و آنتروپی توأم بازده دارایی‌های ریسکی در بازارهای مالی به تبیین محتوای اطلاعاتی متقابل این بازارها پرداخته شده است. بنابراین، رویکرد کلی پژوهش حاضر، روش-محور است و مدل صریح نظری برای تبیین این روابط تعریف نمی‌شود. در ادامه به تبیین هریک از این روش‌ها و چارچوب کلی روش تجزیه و تحلیل داده‌ها پرداخته شده است.

آنتروپی توأم برای دو متغیر تصادفی گسسته X و Y به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (مک کی، ۲۰۰۳).

$$H(X, Y) = - \sum \sum P(x, y) \log P(x, y) \quad (1)$$

این معیار میزان اطلاعات مورد نیاز برای توصیف حالت همزمان دو متغیر را نشان می‌دهد. در حالت پیوسته، آنتروپی توأم با استفاده از انتگرال روی توابع چگالی احتمال محاسبه می‌شود.

آنتروپی توأم دارای خاصیت زیرجمعی^۱ است، به این معنا که همواره رابطه (۲) برقرار است (کاور و توماس^۲، ۲۰۰۶).

$$H(X, Y) \leq H(X) + H(Y) \quad (۲)$$

این نابرابری نشان می‌دهد که توصیف مشترک دو متغیر معمولاً به اطلاعات کمتری نسبت به توصیف جداگانه آنها نیاز دارد. ضریب اطلاع متقابل بین دو متغیر X و Y به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (کاور و توماس^۲، ۲۰۰۶).

$$I(X; Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y) \quad (۳)$$

این معیار که همواره غیرمنفی است، میزان کاهش عدم قطعیت یک متغیر با دانستن متغیر دیگر را نشان می‌دهد. ضریب اطلاع متقابل دارای چندین ویژگی مهم است: متقارن بودن ($I(X; Y) = I(Y; X)$)، غیرمنفی بودن و رابطه مستقیم با میزان وابستگی بین متغیرها (کینی و اتوال^۳، ۲۰۱۳). مقدار صفر برای این ضریب نشان دهنده استقلال کامل متغیرهاست، در حالی که مقادیر بزرگتر نشانگر وابستگی قوی تر هستند.

آنتروپی توأم و ضریب اطلاع متقابل از طریق روابط ریاضی دقیقی به هم مرتبط هستند. به طور خاص، اطلاع متقابل را می‌توان به صورت تفاضل آنتروپی حاشیه‌ای و آنتروپی شرطی نیز بیان کرد:

$$I(X; Y) = H(X) - H(X|Y) \quad (۴)$$

این رابطه نشان می‌دهد که اطلاع متقابل در واقع میزان کاهش عدم قطعیت X با دانستن Y را اندازه‌گیری می‌کند. رابطه مشابهی نیز برای Y برقرار است. از دیدگاه هندسی، می‌توان این مفاهیم را در قالب نمودار ون نمایش داد که در آن آنتروپی توأم مساحت اشتراک دو دایره و اطلاع متقابل مساحت ناحیه همپوشانی را نشان می‌دهد (یئونگ^۴، ۲۰۰۸).

آنتروپی رنی^۵ یک تعمیم از آنتروپی شانون است و با پارامتر α (که $\alpha \geq 0$ و $\alpha \neq 1$ است) تعریف می‌شود. برای یک متغیر تصادفی گسسته X با توزیع احتمال $P(X)$ ، آنتروپی رنی از مرتبه α این گونه محاسبه می‌شود:

-
1. Subadditivity
 2. Cover & Thomas
 3. Kinney & Atwal
 4. Yeung
 5. Rényi Entropy

$$H_{\alpha}(X) = \frac{1}{1-\alpha} \log \left(\sum_x P^{\alpha}(x) \right) \quad (5)$$

در آنتروپی رنی با تغییر پارامتر α ، می توان بر جنبه های مختلف توزیع احتمال تمرکز کرد:

- ✓ $\alpha \rightarrow 1$ آنتروپی رنی به آنتروپی شانون همگرا می شود.
- ✓ $\alpha = 0$ آنتروپی هارتلی^۱ یا حداکثر آنتروپی را به دست می دهد که در آن فقط تعداد برآمدهای تصادفی ممکن مهم است، نه احتمالات آنها.
- ✓ $\alpha = 2$ آنتروپی برخورد^۲ نام دارد و در محاسبات عملی بسیار رایج است.
- ✓ $\alpha \rightarrow \infty$ آنتروپی مینی-آنتروپی^۳ را می دهد که به بدینانه ترین حالت (بدترین حالت) در رمزنگاری است.

همان طور که ضریب اطلاع متقابل کلاسیک بر پایه شانون ساخته شد، می توان معادلات مشابهی را با استفاده از آنتروپی رنی تعریف کرد. با این حال، برخلاف آنتروپی شانون، یک تعریف واحد و جهان شمول برای ضریب اطلاع متقابل رنی وجود ندارد. چندین تعریف مختلف پیشنهاد شده است که هر کدام کاربردها و ویژگی های خاص خود را دارند. رایج ترین و کاربردی ترین تعریف، حالت خاصی است که از واگرایی رنی^۴ مشتق می شود. بهترین و پذیرفته شده ترین راه برای تعریف ضریب اطلاع متقابل رنی، استفاده از مفهوم واگرایی آلفا-رنی^۵ است. واگرایی آلفا-رنی، معیاری برای فاصله بین دو توزیع احتمال (P و Q) است. برای متغیرهای گسسته داریم:

$$D_{\alpha}(P||Q) = \frac{1}{\alpha-1} \log \left(\sum_x P(x) \left(\frac{P(x)}{Q(x)} \right)^{\alpha-1} \right) \quad (6)$$

با این تعریف، اطلاع متقابل آلفا-رنی به صورت تقسیم رنی بین توزیع توأم $P(X, Y)$ و توزیع حاصلضرب آنها، یعنی $P(X)P(Y)$ تعریف می شود:

$$I_{\alpha}(X; Y) = D_{\alpha}(P(X, Y) | P(X)P(Y)) \quad (7)$$

این تعریف دقیقاً مشابه حالت کلاسیک (تقسیم کولبک-لیبلر) است که در آن،

$$I(X; Y) = D_{KL}(P(X, Y) | P(X)P(Y)) \quad (8)$$

-
1. Hartley Entropy
 2. Collision Entropy
 3. Min-Entropy
 4. Rényi Divergence
 5. α -Rényi Divergence

با جایگزینی P و Q در فرمول تقسیم رنی، به فرمول محاسباتی زیر می‌رسیم:

$$I_{\alpha}(X; Y) = \frac{1}{\alpha - 1} \log \left(\sum_x \sum_y P(x, y) \left(\frac{P(x, y)}{P(x)P(y)} \right)^{\alpha-1} \right) \quad (9)$$

از ویژگی‌های این آنتروپی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ غیرمنفی بودن: مانند ضریب اطلاع متقابل کلاسیک، $I_{\alpha}(X; Y) > 0$ است.
- ✓ استقلال: $I_{\alpha}(X; Y) = 0$ است، اگر و تنها اگر X و Y مستقل باشند.
- ✓ همگرایی به ضریب اطلاع متقابل شانون: وقتی $\alpha \rightarrow 1$ ، آنگاه $I_{\alpha}(X; Y) \rightarrow I(X; Y)$ (یعنی به ضریب اطلاع متقابل مبتنی بر شانون همگرا می‌شود). این را می‌توان با قاعده هوییتال^۱ اثبات کرد.

در نتیجه، محاسبه ضریب اطلاع متقابل رنی یک تعمیم انعطاف پذیر از مفهوم کلاسیک است که با انتخاب پارامتر α ، امکان تمرکز بر جنبه‌های مختلف وابستگی بین متغیرها را فراهم می‌کند.

از آنجا که متغیرهای مورد مطالعه در این تحقیق از نوع متغیرهای پیوسته-مقدار هستند، در محاسبه مقادیر آنتروپی رنی و ضریب اطلاع متقابل مبتنی بر آنتروپی رنی، نیاز به گسسته‌سازی مشاهدات و محاسبه احتمالات وقوع مشاهدات است. برای گسسته‌سازی متغیرهای پیوسته روش‌های متعددی پیشنهاد شده است (روش‌های: اسکات^۲، استارگس^۳، فریدمن-دیاکونیس^۴ یا دوان^۵) که هریک از آنها با توجه به ویژگی‌های داده‌ها عملکرد بهتری را در گسسته‌سازی منجر می‌شوند. پس از تعیین تعداد بهینه دسته‌ها، نسبت تعداد مشاهداتی که در هر دسته قرار می‌گیرند، به مجموع تعداد کل مشاهدات، به عنوان برآوردی از احتمال وقوع مقداری در آن دسته (بازه) برای متغیر در نظر گرفته شده است.

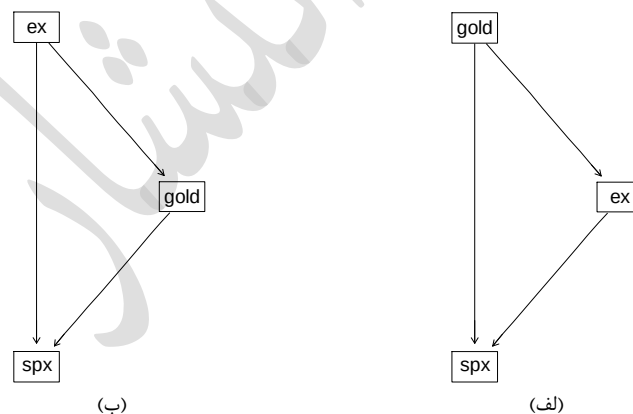
شبکه‌های بیزین^۶ که به عنوان شبکه‌های باور^۷ یا مدل‌های گرافیکی احتمالی نیز شناخته می‌شوند، ابزارهای گرافیکی-احتمالی قدرتمندی برای نمایش و تحلیل روابط علی بین متغیرها

-
1. L'Hôpital
 2. Scott
 3. Sturges
 4. Freedman-Diaconis
 5. Doane
 6. Bayesian Networks
 7. Belief Networks

هستند. این شبکه‌ها از دو بخش اصلی تشکیل شده‌اند: یک ساختار گراف غیرمدور جهت‌دار که نشان‌دهنده روابط علی بین متغیرهاست، و مجموعه‌ای از توزیع‌های احتمال شرطی که شدت این روابط را کمی می‌سازند (کالر و فریدمن^۱، ۲۰۰۹). هر گره در گراف نشان‌دهنده یک متغیر تصادفی و هر یال جهت‌دار نشان‌دهنده یک رابطه علی یا وابستگی احتمالی بین متغیرهاست. مبنای ریاضی شبکه‌های بیزین بر قضیه زنجیره‌ای بیز استوار است که امکان فاکتورگیری توزیع توأم متغیرها را فراهم می‌کند (نیپولیتان^۲، ۲۰۱۸). در یک شبکه بیزین با n متغیر $X_1, X_2, \dots, X_n$ ، توزیع توأم به صورت حاصل ضرب احتمالات شرطی نمایش داده می‌شود:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_n) \quad (10)$$

این خاصیت اجازه می‌دهد مدل‌های پیچیده با تعداد زیادی متغیر به صورت کارآمدی نمایش داده شوند. شبکه‌های بیزین از اصل جداسازی^۳ برای شناسایی استقلال شرطی بین متغیرها استفاده می‌کنند که پایه استنتاج احتمالاتی در این شبکه‌هاست (گیگر^۴ و همکاران، ۱۹۹۰). در این تحقیق، شبکه بیزین مبتنی بر دو ساختار علی شکل (۱) انجام شده است.



شکل ۱: ساختار علی شبکه‌های بیزین بازارهای ارز، طلا و بورس

1. Koller & Friedman
2. Neapolitan
3. d-separation
4. Geiger

در تبیین ساختار علی میان بازارها، بازار طلا به عنوان علت دو بازار ارز و سهام (بخش «آ» شکل ۱)، و بازار ارز به عنوان علت دو بازار طلا و سهام (بخش «ب» شکل ۱) در نظر گرفته شده‌اند و شبکه بیزین برای هر ساختار به طور جداگانه تحلیل شده است. توابع جرم احتمال شرطی برای هر یک از ساختارهای «آ» و «ب» در شکل (۱) به ترتیب به شکل روابط (۱۱) و (۱۲) برآورد شده‌اند.

$$P[SPX] = \sum_{Gold} \sum_{EX} P[Gold]P[EX|Gold]P[SPX|Gold, EX] \quad (11)$$

$$P[SPX] = \sum_{EX} \sum_{Gold} P[EX]P[Gold|EX]P[SPX|EX, Gold] \quad (12)$$

در محاسبه اندازه وابستگی یا ارتباط متقابل بازارها به یکدیگر از معیار شوارتز^۱ به عنوان تابع هدف استفاده شده و با الگوریتم یادگیری تپه نوردی^۲ به برآورد پارامترهای شبکه پرداخته شده است. الگوریتم تپه نوردی یک روش جستجوی محلی و بهینه‌سازی تدریجی است که برای یافتن مقدار بهینه یک تابع هدف به کار می‌رود. این الگوریتم از یک نقطه شروع در فضای جستجو آغاز شده و در هر مرحله، تنها همسایگان مستقیم وضعیت فعلی را بررسی می‌کند و به سمت وضعیتی حرکت می‌کند که مقدار بهتری دارد. تجزیه و تحلیل داده‌ها در نرم افزار آماری R ویرایش ۴.۳.۳ انجام شده است.

یافته‌های پژوهش

جدول ۱ شاخص‌های تمرکز و پراکنش هر یک از متغیرهای تحقیق را نشان می‌دهد. باتوجه به جدول ۱ میانگین نرخ ارز طی دوره مورد مطالعه برابر با ۳۵۷۶۲۵/۲ ریال بوده است. میانگین قیمت طلا در این دوره برابر با ۸۳۸۳۲۳۱ ریال و میانگین شاخص بورس نیز برابر با ۱۴۹۰۲۱۶ واحد بوده است. از آنجا که بیش از مقادیر اصلی متغیرها، مقادیر بازده‌های لگاریتمی به دلیل رهایی از مقیاس اندازه‌گیری، معیار مطلوب‌تری در تحلیل روابط ساختاری میان داده‌ها هستند

-
1. Bayesian Information Criteria (BIC)
 2. Hill-Climbing

و امکان مقایسه بین بازارهای مختلف را فراهم می آورند، در تمامی تحلیل ها از مقادیر بازده های لگاریتمی متغیرها استفاده شد.

جدول ۱. آمار توصیفی متغیرهای تحقیق

متغیر	نماد	میانگین	میانه	بیشینه	کمینه	انحراف معیار
نرخ ارز	EX	۳۵۷۶۲۵/۲	۲۷۵۶۰۵	۹۳۱۳۰۰	۱۱۱۰۰۰	۱۹۶۲۰۸/۵
قیمت طلا	Gold	۸۳۸۳۲۳۱	۱۲۹۳۹۰۰۰	۷۳۷۹۴۰۰۰	۳۹۳۷۴۰۰	۱۳۵۵۰۲۵۳
شاخص بورس	SPX	۱۴۹۰۲۱۶	۱۴۷۱۶۶۸	۲۹۴۴۶۳۷	۱۷۹۱۹۴	۶۷۹۷۹۸/۱
بازده لگاریتمی نرخ ارز	RetEX	۰/۰۰۱۳۸۲	۰	۰/۱۶۴۶۶۴	-۰/۱۶۶۱۴۳	۰/۰۱۸۳۱۵
بازده لگاریتمی قیمت طلا	RetGold	۰/۰۰۱۹۹۵	۰/۰۰۰۷۶۲	۰/۱۳۶۳۰۸	-۰/۱۵۲۲۹۹	۰/۰۱۸۷۵۲
بازده لگاریتمی شاخص بورس	RetSPX	۰/۰۰۱۹۱۱	۰/۰۰۱۰۱۶	۰/۰۵۸۱۱۰	-۰/۰۵۲۹۱۳	۰/۰۱۴۲۰۰

متوسط بازده لگاریتمی یک روزه نرخ ارز طی دوره تحقیق برابر با ۱/۳۸۲ درصد، متوسط بازده لگاریتمی طلا برابر با ۱/۹۹۵ درصد و متوسط بازده لگاریتمی یک روزه شاخص برابر با ۱/۹۱۱ درصد بوده است. مقایسه میانگین بازده ها نشان می دهد که تغییرات بازده های لگاریتمی متغیرها تقریباً یکسان بوده است، اما مقادیر بیشینه و کمینه ثبت شده برای بازده های لگاریتمی یک روزه این متغیرها نشان می دهد که شاخص بورس با بیشینه و کمینه کوچکتر، بازار کم نوسان تری برای سرمایه گذاری بوده است. پیش از برآورد ضریب اطلاع متقابل متغیرها بر پایه آنتروپی تعمیم یافته رنی، محاسبه توابع جرم احتمال حاشیه ای و توأم هریک از متغیرها مورد نیاز است و به منظور محاسبه این توابع احتمال، از گسسته سازی متغیرها استفاده شد. در گسسته سازی متغیرها، تعیین تعداد دسته ها تاثیر قابل توجهی بر نتایج نهایی دارد. بنابراین، تعداد دسته ها بر اساس ویژگی های هریک از متغیرها و با استناد به ۶ روش محاسبه تعداد دسته مورد ارزیابی قرار گرفته تا تعداد بهینه دسته ها در گسسته سازی متغیرها شناسایی گردد. در این تحلیل، روش فریدمن-دیاکونیس برای هر سه متغیر، روش بهینه تعیین دسته ها شناسایی شد. تعداد ۴۵ دسته برای بازده شاخص بورس، تعداد ۱۱۱ دسته برای بازده طلا و تعداد ۱۷۶ دسته برای بازده نرخ ارز به عنوان تعداد بهینه دسته ها شناسایی شد. احتمالات توأم و حاشیه ای هریک از متغیرها، در دسته های (بازه ها) شناسایی شده محاسبه و مبنای برآورد ضریب اطلاع متقابل بین بازارهای مختلف قرار گرفت. برآورد توابع احتمال حاشیه ای و توأم متغیرها بر پایه فراوانی نسبی مشاهدات

هر بازه نسبت به کل مشاهدات انجام شد. بر اساس رابطه (۹)، مقادیر ضریب اطلاع متقابل هر متغیر نسبت به متغیر دیگر، به ازای ۴ مقدار مختلف پارامتر α (مقادیر ۰/۵، ۱/۰۱، ۲ و ۵) برآورد شده که نتایج آن به شرح جدول ۲ بوده است. قابل ذکر است که مقدار ۱/۰۱ برای این پارامتر، به جهت همگرایی آنروپی رنی به آنروپی شانون در مقدار $\alpha=1$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. ضریب اطلاع متقابل بازده شاخص، طلا و ارز

پارامتر α	متغیر	شاخص بورس	طلا	ارز
$\alpha = 0.5$ (الف)	شاخص بورس	۲/۹۰۶۱۸۵۳	۰/۱۹۵۸۲۱	۰/۱۵۴۵۱۴۶
	طلا	۰/۱۹۵۸۲۱۰	۲/۱۴۷۰۰۴	۰/۱۵۲۵۹۷۰
	ارز	۰/۱۵۴۵۱۴۶	۰/۱۵۲۵۹۷	۱/۷۶۶۸۵۷۶
$\alpha = 1/0.1$ (ب)	شاخص بورس	۳/۰۸۷۶۴۹۶	۰/۳۰۱۱۴۳۱	۰/۲۴۸۴۴۱۹
	طلا	۰/۳۰۱۱۴۳۱	۲/۳۸۳۸۶۳۸	۰/۲۷۳۹۵۰۸
	ارز	۰/۲۴۸۴۴۱۹	۰/۲۷۳۹۵۰۸	۲/۰۶۴۵۴۸۴
$\alpha = 2$ (ج)	شاخص بورس	۳/۶۸۸۸۷۹۵	۰/۹۸۶۱۶۹۶	۰/۹۶۹۲۸۷۷
	طلا	۰/۹۸۶۱۶۹۶	۳/۵۸۳۵۱۸۹	۱/۶۳۲۹۷۴۹
	ارز	۰/۹۶۹۲۸۷۷	۱/۶۳۲۹۷۴۹	۳/۴۹۶۵۰۷۶
$\alpha = 5$ (د)	شاخص بورس	۵/۷۴۸۲۶۶	۳/۶۱۱۴۸۴	۴/۱۲۰۴۴۰
	طلا	۳/۶۱۱۴۸۴	۵/۹۹۶۳۰۸	۵/۴۹۰۷۵۱
	ارز	۴/۱۲۰۴۴۰	۵/۴۹۰۷۵۱	۶/۰۳۹۳۹۱

مقادیر ضریب اطلاع متقابل هر زوج از متغیرهای بازده شاخص، ارز و طلا نشان می‌دهد که این ضرایب، مقادیر مثبت (به طور مورد انتظار) و بزرگی نسبت به صفر بوده‌اند، یعنی به نظر می‌رسد که محتوای اطلاعاتی متقابل این داده‌ها از یکدیگر معنادار باشد. اگرچه آزمون معناداری این ضرایب، بر روی پنجره‌های غلتان مشاهدات انجام شده و نتایج ارائه شده است. برای تفسیر اقتصادی ضرایب اطلاع متقابل (که واحد پولی ندارند)، علاوه بر مقادیر خام، نسبت این ضرایب به آنروپی‌های حاشیه‌ای نیز به عنوان شاخص نرمال شده گزارش می‌شود. برای نمونه در $\alpha=0.5$ ، ضریب اطلاع متقابل (سهام، طلا) $=0.1958$ معادل حدود ۶.۷٪ آنروپی بازار سهام و ۹.۱٪ آنروپی بازار طلا است؛ در حالی که ضریب اطلاع متقابل (سهام، ارز) $=0.1545$ معادل حدود ۵.۳٪ آنروپی بازار سهام و ۸.۷٪ آنروپی بازار ارز است. بنابراین اختلاف ۰.۰۴۱

واحدی بین این دو ضریب، در مقیاس کاهش عدم قطعیت بازار سهام، حدود ۱.۴ واحد درصد از آنتروپی سهام را تشکیل می‌دهد. به بیان دیگر، طلا نسبت به ارز اندکی اطلاعات بیشتری درباره نوسانات شاخص سهام حمل می‌کند، اما تفاوت مزبور از منظر «شدت سیستمیک وابستگی» در مقایسه با پیوند غالب طلا-ارز (در نتایج نرمال شده و شبکه بیزین) نقش ثانویه تری دارد.

همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد، با افزایش مقدار پارامتر α ، هم آنتروپی هر متغیر و هم ضرایب اطلاع متقابل متغیرها نسبت به یکدیگر افزایش یافته است. بنابراین به نظر می‌رسد که بین ضرایب اطلاع متقابل متغیرها با مقادیر پارامتر α ارتباط مستقیم وجود داشته باشد، بنابراین در تحلیل محتوای اطلاعاتی متغیرها نسبت به یکدیگر، کوچکترین مقدار آلفای مورد آزمون، می‌تواند نتایج محافظه کارانه تری را ارائه دهد.

به منظور آزمون میزان محتوای اطلاعاتی متقابل بازده بازارها از یکدیگر، ضریب اطلاع متقابل آنها بر روی پنجره‌های غلتان به طول ۲۰۰ مشاهده برآورد شده است. بنابراین در برآورد این ضریب، تعداد ۱۲۲۸ مرتبه ضریب اطلاع متقابل بازده متغیرها بر روی پنجره‌های غلتان برآورد شده و مبنای آزمون قرار گرفته‌اند و در نهایت، فرض مخالف صفر بودن متوسط ضرایب اطلاع برآورد شده از طریق آزمون مقایسه میانگین تی-استودنت آزمون شده است. جدول ۳ نتایج این آزمون را نشان می‌دهد.

جدول ۳. آزمون معناداری محتوای اطلاعاتی متغیرها

آلفا	بازده شاخص و طلا			بازده شاخص و ارز			بازده طلا و ارز		
	میانگین	آماره t	معناداری	میانگین	آماره t	معناداری	میانگین	آماره t	معناداری
$\alpha = 0.5$	۰/۳۳۹۹۶۱۸	۱۰۹/۱۲	۰/۰۰۰	۰/۳۲۸۹۵۷۴	۱۲۰/۲۴	۰/۰۰۰	۰/۴۵۶۴۰۲۰	۱۵۲/۸۹	۰/۰۰۰
$\alpha = 1/0.1$	۰/۴۷۵۱۲۹۳	۱۰۵/۰۶	۰/۰۰۰	۰/۴۵۷۳۹۷۸	۱۲۰/۲۸	۰/۰۰۰	۰/۶۵۵۸۹۰۲	۱۶۳/۰۲	۰/۰۰۰
$\alpha = 2$	۱/۰۴۸۴۶۶۱	۷۹/۱۳۲	۰/۰۰۰	۱/۰۲۲۹۵۷۵	۹۲/۳۱۴	۰/۰۰۰	۱/۶۶۶۱۵۹۴	۱۷۲/۵۲	۰/۰۰۰
$\alpha = 5$	۲/۷۳۵۹۴۳۳	۹۶/۷۲	۰/۰۰۰	۲/۸۱۰۱۲۸۳	۱۲۵/۷۵	۰/۰۰۰	۳/۸۸۵۹۵۵۹	۳۲۳/۴۵	۰/۰۰۰

باتوجه به نتایج جدول ۳ محتوای اطلاعاتی متقابل بین هر زوج از متغیرهای بازده شاخص، ارز و طلا در سطح خطای ۰/۰۵ معنادار بوده‌اند. بنابراین، فرضیه اول تحقیق در این سطح خطا پذیرفته شده و می‌توان ادعا نمود که بازارهای طلا، ارز و سهام در ایران دارای محتوای اطلاعاتی

متقابل نسبت به یکدیگر هستند. در تحلیل شبکه بیزین بازارهای ارز، طلا و سهام، از توابع جرم احتمال شرطی هریک از متغیرها نسبت به دو متغیر دیگر بهره گرفته شد. در تحلیل شبکه بیزین، روابط خطی بین متغیرها، با اتکا به توابع جرم احتمال شرطی آنها و بر اساس مدل رگرسیون خطی ساده یا چندگانه مدل سازی می شود و بنابراین، یک الگوی ارتباطی خطی بین متغیرها برآورد می شود. توابع رگرسیون خطی در تبیین روابط بین متغیرها با استناد به توابع جرم احتمال شرطی آنها به شکل زیر بوده است. این توابع به تفکیک هریک از ساختارهای علی-معلولی شکل (۱) ارائه شده اند.

$$\begin{aligned} Gold &= 0.001995 + e \\ EX &= 0.00073662 + 0.323665 Gold + e \\ SPX &= 0.00167664 + 0.0739242 EX + 0.0659915 Gold + e \end{aligned} \quad (۱۳)$$

$$\begin{aligned} EX &= 0.00138244 + e \\ Gold &= 0.00152628 + 0.3392849 EX + e \\ SPX &= 0.00167664 + 0.0739242 EX + 0.0659915 Gold + e \end{aligned} \quad (۱۴)$$

به عنوان یک بنچمارک درون نمونه ای و برای نشان دادن حساسیت پیوندهای اطلاعاتی به شوک های رفتاری/بحرانی، میانگین ضرایب اطلاع متقابل پنجره های غلطان قبل و بعد از آغاز بحران بازار سهام در سال ۱۳۹۹ (۲۰ مرداد ۱۳۹۹) مقایسه شد. نتایج نشان می دهد پس از بحران، وابستگی بورس-طلا افزایش و وابستگی بورس-ارز و طلا-ارز کاهش یافته است ($p < 0.05$) برای $\alpha = 0.5$. این مشاهده با سازوکارهای رفتاری و «گریز به دارایی های امن» سازگار است و نشان می دهد شدت ارتباطات بینا بازاری می تواند با نوع شوک (رفتاری/بحرانی در برابر شرایط عادی) تغییر کند.

بر اساس روابط شرطی برآورد شده بین متغیرها و تخمین توابع جرم احتمال شرطی آنها، ساختار ارتباطی یا قدرت وابستگی متغیرها به یکدیگر، بر حسب میزان کاهش در امتیاز تابع هدف (آماره شوارتز) برآورد شده است که نتایج آن به شرح جدول ۵ بوده است. نتایج جدول ۴ نشان می دهد که ساختار علی «آ» و «ب»، در تحلیل روابط بین بازارها، تاثیری بر قدرت وابستگی برآورد شده بین متغیرها نداشته است، چرا که میزان کاهش شاخص BIC در رابطه علی ارز به طلا و رابطه علی طلا به ارز (که هریک معرف یک کمان در شبکه بیزین هستند)، یکسان است. بنابراین، به نظر می رسد که میزان کاهش BIC یا همان قدرت وابستگی متغیرها در

مدل بیزین، بر حسب یک ارتباط متقابل و دوسویه اندازه گیری می شود. با توجه به مقادیر بدست آمده برای قدرت وابستگی متغیرها (قدر مطلق میزان کاهش BIC)، بیشترین محتوای اطلاعاتی بین بازارهای ارز و طلا وجود داشته است. پس از آن و البته با اختلاف بسیار زیاد، بیشترین محتوای اطلاعاتی بین بازار ارز و سهام بوده و محتوای اطلاعاتی بین بازار طلا و شاخص بورس نیز کمترین میزان محتوای اطلاعاتی برآورد شده است.

جدول ۴. قدرت وابستگی بازده های ارز، طلا و سهام تحت ساختارهای علی مختلف

کاهش امتیاز BIC		
از	به	میزان کاهش (قدرت وابستگی)
ارز	طلا	-۷۹/۳۶۶۱۲۵
ارز	شاخص بورس	-۲/۲۴۸۵۴۲
طلا	شاخص بورس	-۱/۲۸۳۵۷۸
طلا	ارز	-۷۹/۳۶۶۱۲۵

به منظور مقایسه نتایج با نتایج برآورد ضرایب اطلاع متقابل، ضرایب اطلاع متقابل هر بازار از یکدیگر، برای پارامتر آلفای برابر با ۰/۵، مبنای مقایسه قرار گرفت و اولویت اندازه محتوای اطلاعاتی بازارها از یکدیگر، بر اساس ضرایب نرمال شده آنها به شرح جدول ۵ محاسبه شد.

جدول ۵. مقایسه نتایج ضریب اطلاع متقابل و شبکه بیزین

گروه	روش	شاخص بورس - طلا	شاخص بورس - ارز	طلا - ارز
مقادیر اصلی	ضریب اطلاع متقابل	۰/۳۳۹۹۶۱۸	۰/۳۲۸۹۵۷	۰/۴۵۶۴۰۲
	شبکه بیزین	۱/۲۸۳۵۷۸	۲/۲۴۸۵۴۲	۷۹/۳۶۶۱۳
ضرایب نرمال شده	ضریب اطلاع متقابل	٪۳۰/۲۱۰۲	٪۲۹/۲۳۲۳	٪۴۰/۵۵۷۵
	شبکه بیزین	٪۱/۵۴۸۴	٪۲/۷۱۲۴	٪۹۵/۷۳۹۲

مطابق جدول ۵، هر دو روش در تشخیص پیوند غالب سیستم (طلا-ارز) هم راستا هستند. در روش اطلاع متقابل ($\alpha=0.5$) سهم نرمال شده ارتباط طلا - ارز برابر ۴۰.۵۶٪ و سهم ارتباط بورس - طلا و بورس - ارز به ترتیب ۳۰.۲۱٪ و ۲۹.۲۳٪ است؛ بنابراین اختلاف دو پیوند رتبه دوم

و سوم کمتر از ۱ واحد درصد است. افزون بر این، بر مبنای آمار پنجره‌های غلتان (جدول ۳)، اختلاف میانگین دو ضریب بورس - طلا و بورس - ارز (حدود ۰.۰۱۱) در مقایسه با پراکندگی سری‌ها (انحراف معیار حدود ۰.۱۰) بسیار کوچک است و اندازه اثر استاندارد آن (Cohen's $d \approx 0.11$) در طبقه "اثر کوچک" قرار می‌گیرد. از این رو، جابه‌جایی رتبه دوم و سوم، نتیجه اصلی مقاله (غلبه محور طلا-ارز و نقش پیشرو ارز/طلا در ساختار انتقال اطلاعات) را تغییر نمی‌دهد. همچنین لازم به ذکر است که اطلاع متقابل شدت وابستگی کلی را می‌سنجد، در حالی که شبکه بیزین مبتنی بر وابستگی‌های شرطی/ساختار شبکه‌ای است؛ بنابراین تفاوت‌های جزئی رتبه‌بندی در پیوندهای ضعیف‌تر می‌تواند ناشی از تفاوت ماهیت دو سنج نیز باشد. از این رو فرضیه دوم تحقیق نیز قابل پذیرش است.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد بین بازارهای طلا، ارز و سهام در ایران وابستگی اطلاعاتی معناداری وجود دارد و بازارها به صورت مجزا از هم عمل نمی‌کنند. بر مبنای معیار اطلاع متقابل، وابستگی‌های غیرخطی و پویا میان بازارها مشاهده می‌شود و شبکه بیزین نیز ساختار شبکه‌ای ارتباطات را به گونه‌ای آشکار می‌کند که در آن بازارهای ارز و طلا در نقش فرستنده و بازار سهام عمدتاً در نقش گیرنده اطلاعات/شوگ قرار می‌گیرد. وجود سرریز اطلاعاتی به این معناست که بازارها با کارایی اطلاعاتی کامل سازگار نیستند و انتقال اطلاعات با وقفه و اصطکاک همراه است.

این الگو را می‌توان با ویژگی‌های نهادی-ساختاری اقتصاد ایران توضیح داد. نرخ ارز بازار آزاد به دلیل نقش آن در انتظارات تورمی، ریسک تحریم و شوک‌های سیاسی، معمولاً سریع‌تر از سایر بازارها اطلاعات کلان را جذب می‌کند. قیمت طلا در داخل نیز به شدت تحت تأثیر نرخ ارز آزاد و انتظارات تورمی/ریسک سیاسی است؛ لذا پیوند طلا-ارز به عنوان محور غالب انتقال اطلاعات قابل انتظار است. در مقابل، بازار سهام به دلیل قیود ریزساختاری (دامنه نوسان، توقف‌های معاملاتی)، ناهمگنی شرکت‌ها (صادراتی/وارداتی) و وجود برخی سیاست‌های کنترلی/قیمت‌گذاری در صنایع، ممکن است کشف قیمت کندتری داشته باشد و بخشی از شوک‌های کلان را با تأخیر منعکس کند. بنابراین مشاهده نقش گیرنده برای بورس،

یک «توجه کلیشه‌ای بازار نوظهور» نیست، بلکه می‌تواند حاصل مجموعه‌ای از اصطکاک‌های نهادی و معاملاتی مشخص در ایران باشد.

در ادبیات داخلی و خارجی، بخش قابل توجهی از مطالعات بینابازاری از ابزارهای خطی مانند همبستگی، VAR/VECM و هم‌انباشتگی استفاده کرده‌اند که عمدتاً وابستگی خطی یا میانگین‌محور را می‌سنجند. رویکرد این مقاله مکمل آن ادبیات است؛ زیرا اطلاع متقابل مبتنی بر آنتروپی رنی قادر است هر نوع وابستگی (خطی و غیرخطی) را در حضور دم‌کلفتی و شکست‌های ساختاری آشکار کند و شبکه بیزین نیز با اتکا به استقلال‌های شرطی، ساختار شبکه‌ای و جهت غالب انتقال اطلاعات را ارائه می‌دهد. از این منظر، حتی اگر در برخی دوره‌ها همبستگی‌های خطی ضعیف باشد، وجود اطلاعات مشترک و سرریز اطلاعاتی می‌تواند همچنان قابل توجه و سیاست‌پذیر باشد.

با توجه به غلبه محور طلا-ارز و نقش پیشرو ارز/طلا، پیشنهاد می‌شود سامانه پایش یکپارچه‌ای با مشارکت «سازمان بورس و اوراق بهادار» و «بانک مرکزی» طراحی شود. این سامانه می‌تواند به صورت روزانه شاخص کل، نرخ ارز بازار آزاد و قیمت طلای ۱۸ عیار را دریافت کرده و در پنجره‌های غلطان (مثلاً ۲۰۰ روزه) شاخص‌های اطلاع متقابل نرمال‌شده برای سه زوج بازار را محاسبه کند. به عنوان یک مکانیسم هشدار، عبور ضریب اطلاع متقابل (طلا، ارز) از آستانه‌های بالایی (مانند صدک ۹۰ تاریخی) همراه با روند افزایشی ضریب اطلاع متقابل (ارز، سهام) می‌تواند به عنوان «هشدار ریسک سرایت به بورس» تلقی شود. خروجی سامانه برای تنظیم‌گر بازار سرمایه می‌تواند در مدیریت نقدشوندگی، نظارت بر ریسک سیستماتیک و تصمیم‌های مربوط به محدودیت‌های معاملاتی در دوره‌های تنش به کار رود؛ و برای سیاست‌گذار پولی نیز این پیام را دارد که مداخله در بازار ارز/طلا ممکن است اثرات جانبی معناداری بر بازار سهام داشته باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در تمامی مراحل اجرا و نگارش مقاله تقریباً یکسان است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر فاقد حمایت مالی از سوی هر نوع نهاد دولتی یا خصوصی بوده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- امیدی، وحید؛ جمشیدی، امیر. (۱۴۰۴). بررسی اثر نرخ ارز، قیمت نفت و طلا بر بورس اوراق بهادار تهران در بازار خرسی و گاوی با رویکردی مالی رفتاری: شواهدی جدید از الگوی THSVAR. *بین رشته‌ای اقتصاد*، ۱(۲): ۸۳-۱۱۲. <https://doi.org/10.22091/ise.2025.11641.1005>
- رودری، سهیل؛ فراهانی فرد، سعید؛ شاه آبادی، ابوالفضل؛ عادلی، امیدعلی. (۱۴۰۱). بررسی فراوانی-زمان سرریز نوسانات میان نرخ ارز، تورم، قیمت سهام و مسکن در ایران. *فصلنامه اقتصاد و الگوسازی*، ۱۳(۲): ۶۵-۹۳. <https://doi.org/10.48308/jem.2022.228781.1783>
- حمید انور، نائله. (۱۳۹۹). بررسی نحوه پاسخ بازارهای سهام کشورهای منتخب خاورمیانه به شوک ارزی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده اقتصاد و علوم اجتماعی. <https://ganj.irandoc.ac.ir>
- فیروزی، مژده. (۱۳۹۹). رابطه دینامیکی بین بازار سهام و قیمت طلا و نرخ ارز در ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علامه طباطبائی، پردیس تحصیلات تکمیلی خودگردان. <https://ganj.irandoc.ac.ir>

References

- Aksaraylı, M., Pala, O. (2018). A polynomial goal programming model for portfolio optimization based on entropy and higher moments. *Expert Syst Appl*, 94:185-92. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.10.056>
- Baker, M., Wurgler, J., & Yuan, Y. (2012). Global, local and contagious investor sentiment. *Journal of Financial Economics*, 104(2), 272-287. <https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2011.11.002>
- Baur, D. G., & Lucey, B. M. (2010). Is gold a hedge or a safe haven? An analysis of stocks, bonds and gold. *The Financial Review*, 45(2), 217-229. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6288.2010.00244.x>

- Benlagha, N., El Omari, S. (2021). Connectedness of stock markets with gold and oil: New evidence from COVID-19 pandemic, *Finance Research Letters*, <https://doi.org/10.1016/j.frl.2021.102373>.
- Bhuiyan, E. M., Chowdhury, M. (2020). Macroeconomic variables and stock market indices: Asymmetric dynamics in the US and Canada, *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 77(C), 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.qref.2019.10.005>
- Broadstock, D. C., Fouquet, R., & Kim, J. W. (2025). Carbon pricing and stock performance: Are carbon prices already more influential than energy prices? *Energy Policy*, 206, 114775. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114775>
- Cheng C.H., Wei L.Y. (2009). Data spread-based entropy clustering method using adaptive learning. *Expert Syst Appl*, 36:12357–61. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2009.04.050>
- Chordia, T., Roll, R., & Subrahmanyam, A. (2005). Liquidity and market efficiency. *Journal of Financial Economics*, 87(2), 249-268. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.794264>
- Coffee, J. C. (2021). The future of disclosure: ESG, common ownership, and systematic risk. *Columbia Business Law Review*, 2022(1), 602-678. <https://doi.org/10.52214/cblr.v2021i2.8635>
- Cover, T. M., & Thomas, J. A. (2006). *Elements of information theory* (2nd ed.). Wiley. <https://www.wiley.com>
- Diebold, F. X., & Yilmaz, K. (2012). Better to give than to receive: Predictive directional measurement of volatility spillovers. *International Journal of Forecasting*, 28(1), 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2011.02.006>
- Dodig, A. (2020). Relationship between Macroeconomic Indicators and Capital Markets Performance in Selected Southeastern European Countries. *Policy Research Working Paper*; No. 9323. World Bank, Washington, DC. © World Bank. <https://ideas.repec.org>
- Elliott, M., Golub, B., & Jackson, M. O. (2014). Financial networks and contagion. *American Economic Review*, 104(10), 3115-53. <https://doi.org/10.1257/aer.104.10.3115>
- Firouzi, M. (2020). *The Dynamic Relationship Between Stock Market, Gold Price, and Exchange Rate in Iran*, Master's Thesis, Allameh Tabatabaei University, Autonomous Postgraduate Campus. <https://ganj.irandoc.ac.ir> (in Persian)
- Geiger, D., Verma, T., & Pearl, J. (1990). Identifying independence in Bayesian networks. *Networks*, 20(5), 507-534. <https://doi.org/10.1002/net.3230200504>
- Hamid Anvar, N. (2020). *Studying the Response of Stock Markets of Selected Middle Eastern Countries to Currency Shocks*, Master's Thesis, Bu Ali Sina University, Faculty of Economics and Social Sciences. <https://ganj.irandoc.ac.ir> (in Persian)
- Jin Z., Guo K., (2020). The Dynamic Relationship between Stock Market and Macroeconomy at Sectoral Level: Evidence from Chinese and US Stock Market. *Hindawi Complexity*, (2021), 1-16. <https://doi.org/10.1155/2021/6645570>

- Karaca Y , Zhang Y-D (2020). Muhammad K . Characterizing complexity and self-similarity based on fractal and entropy analyses for stock market forecast modelling. *Expert Syst Appl*, 144 Article 113098 .
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113098>
- Kinney, J. B., & Atwal, G. S. (2013). Equitability, mutual information, and the maximal information coefficient. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3354-3359.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1301.7745>
- Koller, D., & Friedman, N. (2009). *Probabilistic graphical models: Principles and techniques*. MIT Press. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1795555>
- MacKay, D. J. C. (2003). *Information theory, inference, and learning algorithms*. Cambridge University Press. <https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/971143>
- Menkhoff, L., Sarno, L., Schmeling, M., & Schrimpf, A. (2011). Currency momentum strategies. *Journal of Financial Economics*, 106(3), 660-684.
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1809776>
- Neapolitan, R. E. (2018). *Learning Bayesian networks*. Pearson Prentice Hall.
<https://doi.org/10.1145/1327942.1327961>
- Omidi, V., & Jamshidi, A. (2025). The Impact of Exchange Rate, Oil, and Gold Prices on the Tehran Stock Exchange in Bull and Bear Markets with a Behavioral Finance Approach: New Evidence from the THSVAR Model. *Interdisciplinary Studies in Economics*, 1(2), 83-112.
<https://doi.org/10.22091/ise.2025.11641.1005> (in Persian)
- Pal S., Garg A. J. (2020). Macroeconomic surprises and stock market responses in view of global linkage – A study of Indian stock market, *Cogent Economics & Finance*, 8:1. <https://doi.org/10.1080/23322039.2020.1839171>
- Reboredo, J. C. (2013). Is gold a hedge or safe haven against oil price movements?. *Resources Policy*, 38(2), 130-137.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.02.003>
- Roudari, S. , Farahanifard, S. , Shahabadi, A. and Adeli, O. (2022). Investigating the Time-Frequency Volatility Spillover among Exchange Rate, Inflation, Stocks and Housing Prices in Iran. *Journal of Economics and Modelling*, 13(2), 65-93. <https://doi.org/10.48308/jem.2022.228781.1783> (in Persian)
- Roy S., (2020). Causal Relationship Between Stock Market and Macroeconomic Variables: Indian Evidence, *EuroEconomica*, 39(3), 227-247.
<https://ideas.repec.org>
- Siddiqi M. M., Aziz A., Maria M., Mirza M. (2021). Impact of Macroeconomic Variables on Stock Market Liquidity, *Psychology and Education Journal*, 58 (3), <https://psychologyandeducation.net>
- Wang P , Zong L , Ma Y. (2020). An integrated early warning system for stock market turbulence. *Expert Syst Appl*, 153 Article 113463 .
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.12596>
- Xu X. (2018). Intraday price information flows between the CSI300 and futures market: an application of wavelet analysis, *Empirical Economics*, vol. 54, no. 3, pp. 1267–1295. <https://doi.org/10.1007/s00181-017-1245-2>

Yeung, R. W. (2008). *Information theory and network coding*. Springer Science & Business Media. <https://link.springer.com>

آماده انتشار