



<https://amf.ui.ac.ir>

Journal of Asset Management and Financing
E-ISSN: 2383-1189
Vol. 12, Issue 4, No. 47, Winter 2025, p 1-18
Received: 27/04/2024 Accepted: 08/06/2024

Research Paper
Examining the Long-Run and Short-Run Effects of Technical and Financial Factors on Bitcoin Blockchain Network Transaction Fees

Amin Rostami *

Assistant professor, Department of Accounting, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran
a.rostami@ase.ui.ac.ir

Mahdi Safaie

M.A. Student of Accounting, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran
safaiemahdi1999@ase.ui.ac.ir

Abstract

In recent years, Bitcoin has garnered increasing public and media attention, as well as investment in this field. This cryptocurrency currently has the highest market value among existing virtual currencies that can operate in a decentralized manner based on defined incentives. These incentives include a fixed mining reward for each block and a variable reward resulting from transaction fees in the blockchain network. The transaction fee in the Bitcoin network is unstable and is determined in real-time. Due to the reduction of the fixed mining reward, the transaction fees have become the primary source of income for miners. This study examined the long-term and short-term effects of technical and financial factors on user behavior in determining Bitcoin transaction fees. The autoregressive distributed lag (ARDL) model was used for this analysis. The dataset spanned from April 10, 2018, to July 24, 2023. The technical factors examined included the average daily block size in bytes, network difficulty, and daily transaction volume. The financial factors included the average daily value of transactions sent to Bitcoin and the average daily Bitcoin price in dollars. The results showed that the technical factor of network difficulty had the greatest long-term impact on transaction processing fees. Additionally, the average daily block size in bytes had a significant long-term impact on transaction fees. However, the Bitcoin price did not have a significant long-term impact on transaction fees. These findings can help users make more informed decisions when setting transaction fees. Additionally, the results can assist miners in adopting better strategies to maximize their earnings.

Keywords: Bitcoin, Fee Market, Technical Factors, Financial Factors, Blockchain, Transaction Fee.

Introduction

In 2008, Satoshi Nakamoto introduced Bitcoin as a peer-to-peer electronic cash system. The goal was to address the rising transaction confirmation costs that limited market participation. Nakamoto proposed a decentralized peer-to-peer network and public distributed ledger to record all transactions, preventing double-spending without intermediaries. The blockchain database was specifically designed for financial applications. Miners employ cryptographic hashing to compete and add validated blocks to the distributed ledger in exchange for block rewards, which occur approximately every 10 minutes. Transaction fees are determined by senders and miners select which transactions to include. This results in a market-based fee system. Factors like network capacity, transaction volume, and Bitcoin price fluctuations can influence user behavior in setting fees. As the fixed reward for mining blocks halves approximately every four years, transaction fees become increasingly critical for miners' revenue. Understanding the determinants of these fees is essential for users aiming to optimize transaction costs and for miners seeking to maximize their earnings. This study aimed to fill this knowledge gap by examining the long-run and short-run effects of various technical and financial factors on Bitcoin transaction fees. The findings provided insights into the dynamics of this decentralized financial system.

Materials & Methods

This study employed an autoregressive distributed lag (ARDL) cointegration model to analyze the relationship between various Bitcoin factors over time. The ARDL approach allowed examination of both the long-run and short-run relationships between variables that might be integrated of order zero $I(0)$ or order one $I(1)$. This modeling technique provided easily interpretable coefficients that

*Corresponding author

Rostami, A., & Safaei, M. (2025). Examining the Long-Run and Short-Run Effect of Technical and Financial Factors on Bitcoin Blockchain Network Transaction Fees. *Journal of Asset Management and Financing*, 12(4), 1-18.



2383-1189 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



10.22108/AMF.2024.141264.1877

that might be integrated of order zero $I(0)$ or order one $I(1)$. This modeling technique provided easily interpretable coefficients that directly showed the impacts of changes in the independent variables on the dependent variable. Many of the key Bitcoin factors, such as transaction value, fees paid, and block size, are measured on vastly different scales. For example, transaction values are measured in Bitcoin, while fees are typically measured as fractions of Bitcoin. To address this, the data were preprocessed by standardizing each variable to have a mean of zero and a standard deviation of 1 before estimating coefficients in the ARDL model. This helped produce more valid coefficient estimates of the true lagged predictive relationships between factors over time. The dataset spanned from April 10, 2018, to July 24, 2023. The factors under review included both technical and financial variables: 1) Technical factors (Average block size in bytes per day, Network difficulty per day, and Daily volume of transactions sent), and 2) Financial factors (Average daily value of transactions sent to Bitcoin and Average daily Bitcoin price in dollars)

Findings


The study employed an autoregressive distributed lag (ARDL) model to analyze the effects of Bitcoin transaction fees and various factors over time. Unit root tests were conducted on the variables using the Augmented Dickey-Fuller (ADF) test. Average block size in bytes per day, network difficulty per day, volume of transactions sent per day, and average daily Bitcoin price in dollars were found to be non-stationary at level but became stationary after first differencing, indicating they had been integrated of order 1. To validate the model, serial correlation and heteroskedasticity were tested using the serial correlation test and White test, respectively. The findings indicated that in the short run, all financial and technical factors - average block size, network difficulty, volume of transactions sent per day, average value of transactions sent, and average daily Bitcoin price - had an effect on determining transaction fees. Additionally, the average transaction fee of confirmed transactions from the previous day had the strongest effect on determining the fee in the short run. Regarding the long-run impact, network difficulty and average block size were found to have a significant effect on transaction fees, while the Bitcoin price did not show a significant long-run effect. The main conclusions were that in the short term, both technical and financial factors influenced fees, but only the technical fundamentals of network difficulty and average block size determined the fee levels in the long term.

Discussion & Conclusion

This study analyzed the factors affecting transaction fees on the Bitcoin network over time. The results showed that in the short run, both technical and financial factors significantly influenced transaction fees. The two factors with the highest lagged effects on the model in the short run were the previous day's transaction fee and the volume of transactions sent to the network. In the long run, the technical factor of network difficulty had the greatest impact on transaction processing fees. Additionally, the average block size in bytes per day had a significant impact on transaction processing fees. However, the Bitcoin price did not have a significant long-run effect on transaction fees. The coefficient of Error Correction Model (ECM) was around 6%, indicating a relatively slow adjustment to long-term equilibrium. These findings provided valuable insights for users aiming to optimize transaction costs and for miners seeking to develop strategies to maximize their earnings. Understanding these network dynamics can help stakeholders make more informed decisions in the decentralized financial ecosystem of Bitcoin.

مقاله پژوهشی

بررسی اثر بلندمدت و کوتاه‌مدت عوامل فنی و مالی بر کارمزد تراکنش شبکه بلاک‌چین بیت‌کوین

امین رستمی 

استادیار، گروه حسابداری، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

a.rostami@ase.ui.ac.ir

مهدی صفایی

کارشناسی ارشد، گروه حسابداری، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

Safaiemahdi1999@ase.ui.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، توجه عموم و رسانه‌ها به بیت‌کوین افزایش پیدا کرده و سرمایه‌گذاری در این حوزه افزایش یافته است. این رمزارز در حال حاضر، بیشترین ارزش بازار را در بین ارزهای مجازی دارد که براساس انگیزه‌های تعریف‌شده، می‌تواند به شکل غیرمتمرکز کار کند. این انگیزه شامل دو بخش است: پاداش ثابت استخراج هر بلاک و پاداش متغیر که ناشی از بازار کارمزد تراکنش‌ها است. کارمزد تراکنش‌ها در شبکه بیت‌کوین غیرپایدار است و در لحظه تعیین می‌شود و با توجه به کاهش پاداش ثابت ناشی از استخراج بلاک، روز به روز اهمیت آن به عنوان تنها منبع درآمد استخراج‌کنندگان افزایش می‌یابد. این پژوهش به بررسی اثر بلندمدت و کوتاه‌مدت عوامل فنی و مالی بر کارمزد تراکنش‌ها و بررسی رفتار کاربران در تعیین کارمزد تراکنش می‌پردازد. از مدل خودرگرسیون با وقفه توزیعی (ARDL) برای آزمون فرضیه‌های پژوهش استفاده شده است. داده‌های استفاده‌شده مربوط به بازه زمانی از ۱۰ آوریل ۲۰۱۸ تا ۲۴ جولای ۲۰۲۳ است. عوامل فنی شامل میانگین اندازه بلاک، سختی شبکه و حجم تراکنش‌های ارسالی به شبکه و عوامل مالی شامل میانگین ارزش تراکنش‌های ارسالی به شبکه و میانگین قیمت بیت‌کوین است. نتایج نشان داد که در کوتاه‌مدت عوامل فنی و مالی هر دو بر کارمزد تراکنش تأثیر معنی‌داری دارد و دو عامل کارمزد تراکنش و حجم تراکنش ارسالی بیشترین میزان وقفه اثرگذار بر مدل را در کوتاه‌مدت دارند. در بلندمدت نیز عامل فنی سختی شبکه بیشترین تأثیر را بر کارمزد پردازش تراکنش‌ها دارد. همچنین، میانگین اندازه بلاک، اثر معنی‌داری بر کارمزد پردازش تراکنش‌ها در طولانی‌مدت دارد؛ باین حال، قیمت بیت‌کوین تأثیر معنی‌داری در طولانی‌مدت بر کارمزد تراکنش ندارد. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به کاربران برای تصمیم‌گیری صحیح‌تر در هنگام تعیین کارمزد تراکنش‌ها و به استخراج‌کنندگان برای اتخاذ استراتژی‌های بهتر برای کسب درآمد کمک کند.

کلیدواژه‌ها: بیت‌کوین، بازار کارمزد، عوامل فنی، عوامل مالی، بلاک‌چین، هزینه تراکنش.

طبقه بندی JEL: G12، E42

* نویسنده مسئول

رستمی، امین، صفایی، مهدی. (۱۴۰۳). بررسی اثر بلندمدت و کوتاه‌مدت عوامل فنی و مالی بر کارمزد تراکنش شبکه بلاک‌چین بیت‌کوین. مدیریت دارایی و تأمین مالی، ۱۲(۴)، ۱-۱۸.



مقدمه

در سال ۲۰۰۸ ساتوشی ناکاموتو به منظور کاهش هزینه‌های انجام معاملات با هر ارزشی، شبکه مالی غیرمتمرکز بیت‌کوین را معرفی کرد و آن را سیستم پرداخت الکترونیک هم‌تا به هم‌تا نامید (Nakamoto, 2008; Huberman et al., 2019; Larimer, 2014). با افزایش هزینه‌های تأیید تراکنش، بازارها نیز به‌طور فزاینده‌ای کوچک می‌شوند؛ زیرا خریداران و فروشندگان کمتری معاملات را سودآور می‌دانند. زمانی که هزینه تأیید موفقیت‌آمیز یک معامله بیشتر از مزایای آن باشد، بازار دچار ازهم‌پاشیدگی می‌شود (Todороva, 2015; Catalini & Gans, 2020). شبکه مالی بیت‌کوین برای جلوگیری از دو بار خرج کردن و تأیید معاملات بدون نیاز به واسطه، راهکار ثبت تمامی معاملات در دفتر عمومی غیرمتمرکز را ارائه داد (Larimer, 2014). در این شبکه، اطلاعات بر روی واحدهایی به نام بلاک ثبت می‌شوند و برای تکمیل اهداف کارکرد غیرمتمرکز، ویژگی‌هایی همچون الگوریتم اجماع و فرایند استخراج معرفی می‌شوند (Franco, 2014; Gervais et al., 2016).

استخراج‌کنندگان با حدس عدد یک تابع ریاضی یک‌طرفه معروف به تابع هش می‌توانند بلاک (واحدهای ثبت اطلاعات) استخراج کنند (Franco, 2014) و به این شکل دیتابیس گسترش می‌یابد (Tan & Low, 2017). استخراج‌کننده با استفاده از قدرت محاسباتی در تلاش است تا بتواند هش صحیح را پیدا کند و بلاک جدید را استخراج کند (Bowden et al., 2018; Kraft, 2016). استخراج‌کننده موفق در حدس صحیح هش و استخراج بلاک معتبر، این موضوع را به شرکت‌کنندگان اطلاع می‌دهد و پس از تأیید آن‌ها این بلاک به زنجیره اصلی اضافه و اطلاعات بر روی شبکه بلاک‌چین آپدیت می‌شود (Bhaskar & Chuen, 2015; Velde, 2013). برای دستیابی به هدف متوسط سرعت استخراج در حدود ۶ بلاک در هر ساعت (هر بلاک در حدود ده دقیقه)، شبکه هر ۲۰۱۶ بلاک یا ۱۲۰۹۶۰۰ ثانیه یک بار، متوسط سرعت استخراج را محاسبه می‌کند و با استفاده از معیاری به نام سختی شبکه تعیین می‌کند که حل مسئله لازم برای استخراج هر بلاک چقدر سخت باشد تا متناسب با توان محاسباتی شبکه، مانع از استخراج سریع یا کند بلاک توسط استخراج‌کنندگان شود. پس از تعیین سختی، میزان آن تا ۲۰۱۶ بلاک بعدی ثابت است (Bowden et al., 2018; Kraft, 2016; Bhaskar & Chuen, 2015; Velde, 2013).

خرید بیت‌کوین به شکل مستقیم از داخل شبکه امکان‌پذیر نیست. خالق شبکه، بیت‌کوین را به این صورت تعریف کرد: رابطی برای برقراری تعادلی از منافع به شکل انگیزه برای کسانی که در شبکه شرکت می‌کنند و در پایداری شبکه نقش دارند. این انگیزه به دو شکل پاداش استخراج هر بلاک و کارمزد تراکنش تعریف شده است (O'Dwyer & Malone, 2014; Kaushal et al., 2017; Li et al., 2018). تعداد کل بیت‌کوین‌ها در پروتکل شبکه، ۲۱ میلیون تعریف شده است (Cusumano, 2014; Østbye, 2018; Van Alstyne, 2014). این الگوریتم توسط جامعه بیت‌کوین تغییرپذیر نخواهد بود (Franco, 2014). با در نظر گرفتن این موضوع که زمان استخراج هر بلاک در حدود ده دقیقه است، پاداش شبکه هر ۲۱۰۰۰۰ بلاک یا در حدود ۴ سال یک بار نصف می‌شود (Ghimire & Selvaraj, 2018; Grinberg, 2012; Franco, 2014). انگیزه و درآمد دیگر استخراج‌کنندگان از کارمزد تراکنش‌ها است. سائز هر بلاک در شبکه بیت‌کوین به حدود یک مگابایت محدود شده است که این مسئله در هسته شبکه بیت‌کوین تعریف و در حال حاضر همین میزان باقی مانده است (Rizun, 2015; Göbel & Krzesinski, 2017).

تعیین کارمزد تراکنش به عهده ارسال‌کننده تراکنش است. همچنین، انتخاب تراکنش‌ها برای قرارداد در بلاک استخراج‌شده، به عهده استخراج‌کنندگان همان بلاک است (Kroll et al., 2013; Huberman et al., 2019; Jiang & Wu, 2019). استفاده‌کنندگان شبکه برای قرارداد تراکنش خود در فضای محدود بلاک باید با یکدیگر رقابت کنند؛ در نتیجه، مکانیزم بازار و عرضه و تقاضا کارمزد تراکنش پرداختی را تعیین می‌کند. از طرفی اگر فرد بخواهد تراکنشش در اولین بلاک استخراج‌شده بعدی قرار گیرد یا به اصطلاح زودتر تأیید شود، باید کارمزد بیشتری بپردازد (Möser & Böhme, 2015).

در صورتی که افراد، کارمزد تراکنش پرداختی را بسیار کم تعیین کنند، تأیید این تراکنش‌ها زمان بیشتری خواهد برد (Kasahara & Kawahara, 2016). ممکن است تراکنش آن‌ها تأیید نشده باقی بماند یا زمانی تأیید شود که بار شبکه کمتر شده است که این اتفاق ممکن است تا چند روز طول بکشد. البته در بسیاری از کیف پول‌ها و صرافی‌ها کارمزد تراکنش‌ها برای شبکه بیت‌کوین به شکل خودکار تعیین شده و کاربران امکان تعیین آن را ندارند. یکی از اصلی‌ترین اهداف و کارکردهای اصلی دیگر کارمزد تراکنش‌ها، جلوگیری از ارسال بیش از حد تراکنش و مختل شدن شبکه است (Saad et al., 2019); به همین منظور، در هسته شبکه بیت‌کوین حداقل کارمزد تراکنش تعیین شده است و میزان آن ۱۰۰۰ ساتوشی به ازای هر کیلوبایت است (Okupski, 2014).

پاداش استخراج بلاک معتبر توسط شبکه و کارمزد تراکنش توسط افراد پرداخت می‌شود. افزایش قیمت بیت‌کوین باعث مشارکت بیشتر استخراج‌کنندگان می‌شود و در نتیجه، کسب درآمد بیشتر به قدرت استخراج و سرمایه‌گذاری بیشتری نیاز دارد. از طرف دیگر، پاداش ثابت شبکه که ناشی از استخراج بلاک است، در حال کاهش است؛ در نتیجه، تنها انگیزه و درآمد استخراج‌کنندگان در آینده فقط از طریق کارمزد تراکنش‌ها خواهد بود. از آنجاکه تعیین کارمزد تراکنش‌ها به عهده کاربران و انتخاب آن‌ها به عهده استخراج‌کنندگان بلاک است، در نتیجه می‌توان گفت که بازار کارمزد تراکنش‌ها، بازاری کامل و مبتنی بر عرضه و تقاضا است. مطالعات صورت گرفته در این رابطه نیز به تحلیل عرضه و تقاضا و بررسی کارکرد صحیح این بازار و بررسی وقایع صورت گرفته که منجر به افزایش کارمزد تراکنش‌ها شده است و گروه دیگری از مطالعات نیز کارمزدها و هزینه‌ها را در این شبکه با بازارهای مالی دیگر مقایسه کرده است. این در حالی است که میزان عرضه، یعنی سائز هر بلاک که فضایی است که در آن تراکنش‌ها قرار می‌گیرد، در شبکه بیت‌کوین تقریباً ثابت است. به علاوه، تقاضا تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله: تعداد تراکنش‌های ارسالی و سایر مسائل فنی شبکه و اطلاعات مالی بیت‌کوین است که می‌توانند تأثیر بااهمیتی بر رفتار کاربران در هنگام تعیین کارمزد بگذارند؛ به همین منظور، در این پژوهش عوامل فنی شبکه و عوامل مالی به منظور بررسی تأثیر آن‌ها بر روی کارمزد تراکنش بررسی شد و نتایج آن می‌تواند به کاربران برای تصمیم‌گیری صحیح‌تر در هنگام تعیین کارمزد تراکنش‌ها و همچنین به استخراج‌کنندگان برای اتخاذ استراتژی‌های بهتر برای کسب درآمد کمک کند.

مبانی نظری

به‌طور کلی، پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه کارمزد تراکنش و شبکه‌های بلاک‌چین در دو دسته قرار می‌گیرد: دسته اول پژوهش‌هایی هستند که بر تجزیه و تحلیل داده‌های تراکنش‌ها متمرکز شده است تا مشخص شود که چه چیزی باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود.

مطالعات هو و چن (Hou & Chen, 2020) و تسانگ و یانگ (Tsang & Yang, 2021) نشان داده‌اند که اندازه تراکنش به بابت تأثیر مثبت چشمگیری بر کارمزد دارد؛ زیرا تراکنش‌های بزرگ‌تر به پردازش بیشتری نیاز دارد. سایر ویژگی‌های تراکنش مانند تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها نیز با کارمزدهای بیشتر مرتبط هستند. علاوه بر این، اولویت زمانی که یک تراکنش پخش می‌شود، بر هزینه‌ها تأثیر می‌گذارد؛ زیرا کسانی که زودتر ارسال می‌کنند، معمولاً هزینه کمتری برای تأیید سریع‌تر توسط استخراج‌کنندگان می‌پردازند. ازدحام شبکه نیز عاملی مهم در هزینه‌ها شناسایی شده است. هنگامی که بلاک‌چین به دلیل افزایش تقاضای تراکنش، بار بیشتری متحمل می‌شود، بر همین اساس کارمزد استاندارد پیشنهاد شده توسط کیف پول‌ها افزایش می‌یابد. رفتار کیف پول‌ها به دلیل فضای محدود بلاک در دسترس برای استخراج‌کنندگان جهت انتخاب تراکنش است. میانگین کارمزدهای بالاتر، کاربران را تشویق می‌کند تا بیش از مقدار معمول کارمزد پیشنهادی را تعیین کنند تا از انبوه تراکنش‌های معلق (منتظر تأیید) متمایز شوند. در دوره‌های اوج استفاده از بیت‌کوین، کارمزدها به‌طور چشمگیری افزایش یافته است.

دسته دوم مانند لی و همکاران (Li et al., 2022) کارمزد تراکنش‌ها را در نقش واسطه بین کاربران و استخراج‌کنندگان شبکه (مسئول پردازش و اعتبارسنجی تراکنش‌ها) تأیید می‌کنند. از یک طرف، کارمزدهای زیاد تهدیدی برای جلوگیری از استفاده از سیستم بیت‌کوین برای پرداخت‌های کوچک است؛ اما از سوی دیگر، کارمزدها درآمد لازم را برای استخراج‌کنندگان فراهم می‌کند تا از طریق اثبات کار، بلاک‌چین را ایمن کنند.

در نتیجه، برخی از مطالعات مانند والانارو و همکاران (Vallarano et al., 2020) و باسو و همکاران (Basu et al., 2023) به شبیه‌سازی یا ارائه پیشنهاد برای تنظیم پویای ظرفیت‌ها یا هزینه‌های بلاک روی آورده‌اند، به گونه‌ای که نیازهای کاربران و نیز استخراج‌کنندگان را متعادل می‌کند تا از پایداری و رشد طولانی‌مدت شبکه بیت‌کوین اطمینان حاصل شود. به‌طور کلی، انواع فاکتورهای زنجیره‌ای و شبکه‌ای در تعامل هستند تا به طور جمعی بر کارمزد تراکنش‌هایی تأثیر بگذارد که در نهایت، کاربران بیت‌کوین می‌پردازند. با تجزیه و تحلیل پژوهش‌های صورت‌گرفته درباره بازار کارمزدی شبکه بلاک‌چین بیت‌کوین، متغیرها را می‌توان در دو گروه فنی و مالی شناسایی و نقش آن‌ها را در تغییرات کارمزد تحلیل کرد.

یکی از متغیرهای کلیدی شناسایی شده توسط تسانگ و یانگ (Tsang & Yang, 2021)، ازدحام شبکه است. همان‌طور که افراد بیشتری سعی می‌کنند در بلاک‌چین بیت‌کوین تراکنش انجام دهند، شبکه ترافیک بیشتری پیدا خواهد کرد و از آنجاکه هر بلاک در هر ده دقیقه استخراج می‌شود و ظرفیت تراکنش‌های تأییدشده دارای سقف است، در نتیجه هزینه‌های لازم برای تأیید تراکنش‌ها افزایش می‌یابد.

متغیر مهم دیگر شناسایی شده توسط هو و چن (Hou & Chen, 2020)، سطح رقابت بین کاربران است. همین مسئله باعث شده است تا حتی در دوره‌هایی که ترافیک شبکه وجود ندارد، کاربران برای کاهش ریسک تأییدنشدن و کاهش زمان انتظار تراکنش، کارمزد را به شکل غیرعادی بیشتر تعیین کنند. زمانی که رقابت زیادی برای فضای بلاک در بلاک‌چین بیت‌کوین وجود دارد، کاربران باید برای تأیید تراکنش‌های خود هزینه بیشتری بپردازند. باید اشاره کرد که در طول دوره‌های تقاضای زیاد، کاربران از طریق پیشنهاد کارمزد بیشتر به استخراج‌کنندگان برای فضای بلاک رقابت می‌کنند.

طبق پژوهش صورت‌گرفته توسط ایزلی و همکاران (Easley et al., 2019)، کارمزد تراکنش، نقشی مهم در پایداری شبکه دارد. از طرفی پاداش ثابت استخراج هر بلاک در تعیین سطح کارمزد در بلاک‌چین بیت‌کوین بااهمیت است؛ زیرا پاداش استخراج، مقدار بیت‌کوینی است که استخراج‌کنندگان برای افزودن یک بلاک جدید به بلاک‌چین دریافت می‌کنند. همان‌طور که پاداش استخراج در طول زمان کاهش می‌یابد، استخراج‌کنندگان برای کسب سود به طور فزاینده‌ای به کارمزد تراکنش متکی می‌شوند.

با شروع شکل‌گیری سیستم‌های پرداخت اولیه با بیت‌کوین، لاوی و همکاران (Lavi et al., 2022) دو چالش عمده را تشخیص دادند که برای دوام طولانی‌مدت شبکه بلاک‌چین باید به آن‌ها توجه شود. در راه‌اندازی اولیه، استخراج‌کنندگان پاداش بلاک و هزینه تراکنش را به‌عنوان پاداش برای تأیید بلاک‌های جدید دریافت می‌کردند. باین‌حال، پاداش‌های بلاک به‌گونه‌ای طراحی شده است که در طول زمان کاهش یابد. همان‌طور که این اتفاق می‌افتد، کارمزد تراکنش به‌تدریج به‌انگیزه اصلی اقدامات استخراج‌کنندگان تبدیل می‌شود. مسئله متغیربودن هزینه کارمزد تراکنش در هر لحظه باعث شد تا در پژوهش فوق، دو رویکرد مزایده‌ای «پرداخت پیشنهادی» و حراج‌های «انحصاری»^۱ را برای اولویت‌بندی تراکنش‌های منتظر تأیید، پیشنهاد و بررسی کنند. در یک مزایده با قیمت پیشنهادی، استخراج‌کنندگان تراکنش‌هایی را که بیشترین قیمت را پیشنهاد می‌دهند، برای گنجاندن در یک بلوک انتخاب می‌کنند و هر تراکنش مبلغی را پرداخت می‌کند که پیشنهاد داده است.

¹ pay-your-bid approach

² monopolistic auction

باین حال، این موضوع به تغییر در هزینه‌های پرداخت منجر شده است. این رویکرد، مطابق با رویکرد فعلی شبکه بیت کوین است. یک رویکرد حراج انحصاری جایگزین پیشنهاد شد که در آن همه تراکنش‌های منتخب در یک بلوک، هزینه‌ای برابر با کمترین پیشنهاد پرداخت و ساختار کارمزد را ساده‌تر می‌کنند. هر دو مدل شامل استخراج‌کنندگانی بودند که تراکنش‌ها را براساس پیشنهادات انتخاب می‌کردند، اما تمایز اصلی در نحوه تعیین کارمزدها است.

با گسترش استفاده از بیت کوین در بیش از یک دهه، داده‌های زنجیره‌ای بینش‌هایی را درباره تعاملات دنیای واقعی در شبکه ارائه کردند. هو و چن (Hou & Chen, 2020) با استفاده از بیش از ۹ سال سابقه تراکنش، یکی از اولین تحلیل‌های کمی را از رفتارهای استخراج‌کننده و کاربر انجام دادند. آن‌ها روندهایی را در کارمزد تراکنش شناسایی کردند. چندین الگوی درخور توجه ظاهر شد. پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که اکثر کاربران برای تسریع در تأیید و کاهش ریسک، هزینه‌های غیرمنتظره زیادی را به طور پیشگیرانه تعیین می‌کنند. استخراج‌کنندگان تراکنش‌های با پیشنهاد بالاتر را در اولویت قرار دادند و به طور بالقوه انتقال‌های کم‌ارزش را مسدود کردند. فعل و انفعالات غیراستاندارد نادر بود، اما گاهی اوقات به اشتباه اجرا می‌شد.

لزوم کارمزد تراکنش برای دوام طولانی مدت شبکه‌های بلاک‌چین به صورت ریاضی توسط ایزلی و همکاران (Easley et al., 2019) نشان داده شد. مدل‌های آن‌ها ثابت کرد که بدون پرداخت هزینه برای پردازش تراکنش‌ها ساختار مشوق در طول زمان از بین می‌رود و در نتیجه، کارمزدهای تراکنش نقش متعادل‌کننده کلیدی بین مشوق‌های مشارکت دارند. تسانگ و یانگ (Tsang & Yang, 2021) روابط متقابل پویا بین کارمزدها، حجم تراکنش‌ها و بار شبکه را بررسی کردند. آن‌ها شواهدی پیدا کردند که نشان می‌دهد، در طول دوره‌های شلوغی، کارمزدها و نیز سطح فعالیت در شبکه بیت کوین به طور هم‌زمان افزایش می‌یابد.

با ارزیابی اثرات عوامل فنی و مالی در بازه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، پژوهش فعلی به دنبال ارائه نمایه‌ای جامع‌تر از نحوه ارتباط متغیرهای فنی و مالی بر هزینه‌های تراکنش است که در نهایت، توسط استفاده‌کنندگان شبکه محتمل می‌شود. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، کارمزد تراکنش یکی از دغدغه‌های اصلی کاربران، استخراج‌کنندگان و سرمایه‌گذاران بیت کوین است. باتوجه به اینکه مسائل فنی شبکه و اطلاعات مالی بیت کوین می‌توانند تأثیر بااهمیتی بر کارمزد تراکنش بگذارند، فرضیه‌های این پژوهش به صورت زیر (در بازه زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت) تدوین شده است:

الف) کوتاه‌مدت

فرضیه ۱: متوسط ارزش تراکنش به بیت کوین در روز در کوتاه‌مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۲: حجم تراکنش‌های ارسال شده به بایت در روز در کوتاه‌مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۳: قیمت بیت کوین به دلار در روز در کوتاه‌مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۴: سختی شبکه در کوتاه‌مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۵: متوسط ساین بلاک‌ها به بایت در کوتاه‌مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۶: متوسط کارمزد تراکنش به بیت کوین در روز در کوتاه‌مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

ب) بلند مدت

فرضیه ۷: حجم تراکنش‌های ارسال شده به بایت در روز بر کارمزد تراکنش در بلندمدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۸: قیمت بیت کوین به دلار در روز بر کارمزد تراکنش در بلندمدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۹: سختی شبکه بر کارمزد تراکنش در بلندمدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۱۰: متوسط ساین بلاک‌ها به بایت بر کارمزد تراکنش در بلندمدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۱۱: متوسط ارزش تراکنش به بیت کوین در روز در بلندمدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

روش پژوهش

اطلاعات مربوط به متغیرهای پژوهش از دو منبع جمع‌آوری شده است. داده‌های مربوط به قیمت بیت‌کوین به دلار از سایت Bitcoinity.org و بر اساس اطلاعات صرافی کوین بیس و داده‌های مربوط به تراکنش‌ها، بلاک و سختی شبکه از سایت Blockchair.com استخراج شده است. دامنه زمانی پژوهش از ۱۰ آوریل ۲۰۱۸ تا ۲۴ جولای ۲۰۲۳ است؛ زیرا نشان‌دهنده دوره چالش مقیاس‌پذیری برای شبکه است. با افزایش قیمت رمزارزها پس از سال ۲۰۱۷، توان عملیاتی برای پردازش تراکنش‌ها به طور فزاینده‌ای به عاملی محدودکننده در شبکه بیت‌کوین تبدیل شد و مشکلات مقیاس‌پذیری که شبکه بیت‌کوین به صورت نظری با آن مواجه بود، به وضوح مشاهده شد. در این دوره به علت استفاده از حداکثر ظرفیت شبکه، کارمزدها به شدت به نوسانات متغیرهای شبکه مانند تراکنش ارسالی به شبکه، اندازه بلاک و سختی شبکه وابسته است. آماده‌سازی و استانداردسازی متغیرها برای کاربرد در مدل با استفاده از نرم‌افزار SPSS و تحلیل نهایی با استفاده از نسخه یک نرم‌افزار Eviews صورت گرفته است.

تحلیل داده‌ها با استفاده از مدل خودرگرسیون با وقفه توزیعی انجام شده است (Guizani & Nafti, 2019; Ye et al., 2023; Pesaran et al., 2001; Chen, 2021; Bouraoui, 2020; Pesaran & Shin, 1995) و پسران و همکاران (Pesaran et al., 2001) نشان دادند با استفاده از رویکرد ARDL می‌توان رابطه هم‌جمعی را درباره سری‌های مانا در سطح I (۰) و مانا با یک وقفه I (۱) بررسی کرد. علت استفاده از این روش، اهمیت داشتن تفسیرپذیری ضرایب به‌عنوان بخشی از هدف پژوهش است. این درحالی است که در سایر روش‌های اقتصادسنجی مانند مدل خودرگرسیون برداری، ضرایب تفسیرپذیر نیستند و از این مدل‌ها به‌منظور بررسی اثرات نوسانات متغیرهای مستقل و تأثیر آن بر نوسانات متغیر وابسته استفاده می‌شود. از طرف دیگر، رویکرد ARDL امکان بررسی روابط کوتاه‌مدت و بلندمدت بین متغیرها را فراهم می‌کند و ضرایب را ارائه می‌دهد که به راحتی تفسیرپذیر هستند.

هنگام استفاده از مدل ARDL برای مطالعه روابط بین عوامل مختلف بیت‌کوین در طول زمان، نیاز به پیش‌پردازش داده‌ها است تا تفاوت‌های ناشی از مقیاس بین عوامل، باعث اثرگذاری بر روی ضرایب نشود. باتوجه‌به اینکه متغیرهای پژوهش دارای مقیاس و دامنه‌های متفاوت هستند، روش نرمال‌سازی بررسی شد. درباره مقایسه روش‌های نرمال‌سازی که به شکل متداول استفاده شده است، بررسی ویژگی و ضعف روش‌ها به پژوهش‌های زیر مراجعه شده است (Freudenberg, 2003; Jacobs et al., 2004; Nardo et al., 2005; Ebert & Welsch, 2004; Joint Research Centre-European Commission, 2008)؛ همانند پژوهش‌های شانکر و همکاران (Shanker et al., 1996)، نایاک و همکاران (Nayak et al., 2014)، گال و روبینفلد (Gal & Rubinfeld, 2019) و کوماری و سوارنکار (Kumari & Swarnkar, 2020). در این روش داده‌ها باتوجه‌به میانگین و انحراف معیار (روش Z-score) استاندارد شده و داده‌های متغیرها تبدیل به مقیاسی با میانگین صفر و انحراف معیار یک تبدیل می‌شوند.

به‌منظور آزمون مانایی از تست دیکی _ فولر استفاده می‌شود. پس از بررسی مانایی داده‌ها نیاز است تا رابطه (۱) تخمین زده تا وجود رابطه بین متغیرها آزمایش شود. رابطه (۱) به شرح زیر است:

1. Autoregressive Distributed Lag (ARDL)

2. Vector autoregression

3. Augmented Dickey-Fuller test (ADF)

رابطه (۱):

$$\Delta TR_t = \alpha_1 + \beta_1 TR_{t-1} + \beta_2 M_{t-1} + \beta_3 P_{t-1} + \beta_4 S_{t-1} + \beta_5 D_{t-1} + \beta_6 V_{t-1} + \sum_{i=1}^p \alpha_{1i} \Delta TR_{t-i} + \sum_{j=0}^q \alpha_{2j} \Delta M_{t-j} + \sum_{k=0}^m \alpha_{3k} \Delta P_{t-k} + \sum_{l=0}^n \alpha_{4l} \Delta S_{t-l} + \sum_{w=0}^s \alpha_{5w} \Delta D_{t-w} + \sum_{z=0}^r \alpha_{6z} \Delta V_{t-z} + \mu_t$$

ضرایب مدل ARDL مستقیماً روابط بین تغییرات در متغیرها را به جای اثرات وقفه‌ها نشان می‌دهد. برآورد مدل ARDL، فرایندی چندمرحله‌ای برای همه ترکیبات ممکن، براساس وقفه‌های متفاوت متغیرها برآورد می‌شود. پژوهشگر حداکثر تعداد وقفه‌ها را براساس تعداد مشاهدات تعیین می‌کند. برای یافتن وقفه بهینه از معیار آکائیک استفاده شده است. بعد از مرحله برآورد، آزمون‌های ناهمسانی واریانس و خودهمبستگی انجام شده است تا از برآورد مدل در سطح بهینه اطمینان حاصل شود. برای بررسی ناهمسانی واریانس از آزمون وایت و برای بررسی خودهمبستگی سریالی از آزمون بروش _ گادفری استفاده شده است. وجود رابطه هم‌جمعی بین متغیرها با استفاده از آزمون باند انجام می‌شود که معنی‌دار بودن سطح اطمینان ضرایب متغیرهای دارای وقفه را در مدل ARDL بررسی می‌کند، تا وجود یک رابطه هم‌انباشتگی بلندمدت بین آن‌ها را آزمون کند. آزمون F متشکل از دو قسمت حد بالا و حد پایین است. اگر مقدار F بیشتر از حد بالا باشد، ثابت می‌شود که رابطه هم‌جمعی وجود دارد و اگر مقدار F کمتر از حد پایین باشد، فرضیه صفر را نمی‌توان رد کرد. اگر آماره F بین دو حد باشد، نتایج مشخص نخواهد بود. بعد از تشخیص برقراری یک رابطه هم‌جمعی، رابطه (۲) مدل بلندمدت ARDL برای محاسبه پویایی بلندمدت تخمین زده می‌شود. رابطه (۲) به شرح زیر است:

رابطه (۲):

$$TR_t = \pi_1 + \pi_2 M_{t-1} + \pi_3 P_{t-1} + \pi_4 S_{t-1} + \pi_5 D_{t-1} + \pi_6 V_{t-1} + v_t$$

در رابطه (۲)، ساختار بهینه وقفه با استفاده از معیار اطلاعاتی آکائیک انتخاب شده است. ضرایب π_i اثر بلندمدت متغیرهای مستقل بر کارمزد تراکنش را اندازه‌گیری می‌کنند. پس از برآورد رابطه (۲)، از باقیمانده‌ها به‌عنوان مدل تصحیح خطا استفاده می‌شود. این مدل نشان‌دهنده این است که چگونه متغیرها پس از یک شوک به سرعت به تعادل بلندمدت بازمی‌گردند. مدل تصحیح خطا باید دارای یک ضریب آماری با علامت منفی و مساوی یا کمتر از یک باشد (Kripfganz & Schneider, 2023). مدل تصحیح خطای رابطه (۱) به شرح رابطه (۳) فرموله شده است.

رابطه (۳):

$$\Delta TR_t = \delta_1 + \sum_{i=1}^p \delta_{1i} \Delta TR_{t-i} + \sum_{j=0}^q \delta_{2j} \Delta M_{t-j} + \sum_{k=0}^m \delta_{3k} \Delta P_{t-k} + \sum_{l=0}^n \delta_{4l} \Delta S_{t-l} + \sum_{w=0}^s \delta_{5w} \Delta D_{t-w} + \sum_{z=0}^r \delta_{6z} \Delta V_{t-z} + \theta ECM_{t-1} + \varepsilon_t$$

1 Wite

2 Beusch-Godfrey

3 Cointegration

4 Bund

5 HCM

متغیر وابسته، متوسط کارمزد تراکنش به بیت‌کوین در روز است. متغیرهای توضیحی، عوامل فنی شامل سختی شبکه در روز و متوسط سایز بلاک‌ها به بایت در روز و عوامل مالی شامل حجم تراکنش‌های ارسال‌شده به شبکه به بایت، قیمت روزانه بیت‌کوین به دلار و متوسط ارزش تراکنش‌ها به بیت‌کوین است. در جدول (۱) تعریف و نحوه اندازه‌گیری هر یک از متغیرها ارائه شده است.

جدول (۱): متغیرهای پژوهش

Table (1): Research variables

TR	متوسط کارمزد تراکنش‌ها به بیت‌کوین در روز
میانگین کارمزد پرداختی تراکنش‌هایی است که توسط استخراج‌کنندگان انتخاب و تأیید شده‌اند و به واحد بیت‌کوین اندازه‌گیری می‌شوند.	
D	سختی شبکه در روز
معیاری است از دشواری یافتن یک بلاک جدید و به طور خودکار توسط شبکه در هر ۲۰۱۶ بلاک تنظیم مجدد می‌شود تا تقریباً هر ده دقیقه یک بلاک جدید استخراج شود. سختی با مقایسه مقدار سختی فعلی با میانگین قدرت هش شبکه اندازه‌گیری می‌شود.	
P	قیمت روزانه بیت‌کوین به دلار در روز
با محاسبه میانگین روزانه قیمت بیت‌کوین در صرافی‌های اصلی ارزش‌های دیجیتال که بیت‌کوین به طور فعال معامله می‌شود، مانند کوین بیس، بایننس، کراکن و غیره اندازه‌گیری می‌شود. میانگین قیمت روزانه از داده‌های قیمت ساعتی جمع‌آوری شده و در هر دوره ۲۴ ساعته محاسبه می‌شود.	
S	متوسط سایز بلاک‌ها به بایت در روز
نشان‌دهنده متوسط اندازه تمام بلاک‌های استخراج‌شده در آن روز است. داده‌های اندازه بلاک در کاوشگرهای بلاک‌چین موجود است و میانگین روزانه را می‌توان با جمع‌کردن اندازه تمام بلاک‌های استخراج‌شده در یک دوره ۲۴ ساعته و تقسیم بر تعداد کل بلاک‌ها محاسبه کرد.	
V	متوسط ارزش تراکنش‌ها به بیت‌کوین در روز
با محاسبه تعداد کل بیت‌کوین‌های جابه‌جاشده در تمام تراکنش‌های تأییدشده در یک روز و تقسیم آن بر تعداد تراکنش‌های تأییدشده بر حسب بیت‌کوین محاسبه می‌شود. داده‌های تراکنش از جمله مقدار معامله در بلاک‌چین بیت‌کوین ثبت می‌شود.	
M	حجم تراکنش‌های ارسال‌شده به شبکه به بایت در روز
به مپول برحسب بایت در روز اندازه‌گیری می‌شود. مپول جایی است که تراکنش‌های تأییدشده که هنوز در یک بلاک قرار نگرفتند، در آن قرار دارد. جمع‌کردن این داده‌های روزانه حجم کلی تراکنش ارسال‌شده به شبکه مپول را فراهم می‌کند.	

یافته‌ها

طبق نتایج، چهار متغیر حجم تراکنش‌های ارسال‌شده به بایت در روز (M)، قیمت بیت‌کوین به دلار در روز (P)، سختی شبکه (D) و متوسط سایز بلاک‌ها به بایت (S) در سطح پایا نیستند؛ بنابراین پایایی متغیرها را در حالت تفاضل بررسی می‌کنیم. نتایج حاصل از آزمون دیکی فولر تعمیم‌یافته برای تفاضل مرتبه اول متغیرها نشان می‌دهد که هر چهار متغیر حجم تراکنش‌های ارسال‌شده به بایت در روز (M)، قیمت بیت‌کوین به دلار در روز (P)، سختی شبکه (D) و متوسط سایز بلاک‌ها به بایت (S) با یک بار تفاضل‌گیری پایا می‌شوند؛ بنابراین در سطح اول مانا هستند. باتوجه به تعداد زیاد مشاهدات، معیار اطلاعاتی آکائیک، مدل (۱، ۰، ۱، ۰، ۱، ۰، ۱) ARDL را بهترین مدل برآوردی انتخاب می‌کند. بعد از مرحله برآورد، فروض کلاسیک رگرسیون بررسی شد.

1 Cibase
2 Bance
3 Kaken
4 Mnpool

برای بررسی خودهمبستگی از آزمون همبستگی سریالی استفاده شد که نتایج برای مدل، نشان‌دهنده پذیرش فرض صفر و وجودناشتن خودهمبستگی است. برای بررسی ناهمسانی واریانس از آزمون وایت استفاده شد که نتایج حاصل برای مدل، رد فرض صفر و وجود همسانی واریانس در جملات خطاست. به همین منظور در هنگام برآورد مدل، از مدل ARDL با استفاده از برآوردکننده وایت استفاده شد تا ناهمسانی واریانس را در جملات خطا در هنگام تخمین ملاحظه کند. نتایج اثرات کوتاهمدت الگو در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول (۲): نتایج برآورد اثرات کوتاهمدت با استفاده از مدل ARDL

Table (2): Short-run effects estimation results using the ARDL model

متغیرها	ضرایب	آماره t	احتمال
(۱-)TR	۱/۰۰۳۳۶۹	۴۳/۹۲۸۶۰	۰/۰۰۰۰
(۲-)TR	۰/۲۴۸۹۴۴	-۷/۷۴۳۴۸۴	۰/۰۰۰۰
(۳-)TR	۰/۲۱۵۰۴۶	۶/۶۵۶۴۴۳	۰/۰۰۰۰
(۴-)TR	-۰/۰۷۴۴۹۴	-۲/۳۲۰۸۸۹	۰/۰۲۰۴
(۵-)TR	-۰/۰۱۸۱۲۸	-۰/۵۶۴۸۵۵	۰/۵۷۲۲
(۶-)TR	۰/۰۹۰۱۹۵	۲/۸۱۴۳۷۶	۰/۰۰۴۹
(۷-)TR	۰/۱۳۰۱۶۱	۴/۰۴۷۸۵۸	۰/۰۰۰۱
(۸-)TR	-۰/۱۹۸۱۶۶	-۶/۱۷۷۸۰۴	۰/۰۰۰۰
(۹-)TR	-۰/۰۱۴۸۵۳	-۰/۴۶۶۶۱۲	۰/۶۴۰۸
(۱۰-)TR	۰/۰۵۵۹۲۰	۲/۴۸۲۴۳۱	۰/۰۱۳۱
M	-۰/۰۳۸۰۲۴	-۸/۹۳۵۹۶۸	۰/۰۰۰۰
(۱-)M	۰/۰۱۸۶۳۰	۴/۰۰۵۳۲۶	۰/۰۰۰۱
(۲-)M	۰/۰۰۹۵۳۰	۲/۰۶۶۷۸۳	۰/۰۳۸۹
(۳-)M	-۰/۰۰۹۱۳۴	-۱/۹۷۳۶۴۳	۰/۰۴۸۶
(۴-)M	۰/۰۰۵۶۳۷	۱/۳۰۹۴۰۹	۰/۱۹۰۶
(۵-)M	-۰/۰۱۳۷۶۴	-۳/۲۵۶۰۸۳	۰/۰۰۱۱
(۶-)M	۰/۰۲۴۴۵۶	۵/۷۱۷۱۳۹	۰/۰۰۰۰
(۷-)M	۰/۰۳۶۲۱۱	۷/۵۸۲۴۰۳	۰/۰۰۰۰
(۸-)M	-۰/۰۰۹۸۷۹	-۲/۰۳۴۰۲۴	۰/۰۴۲۱
(۹-)M	-۰/۰۰۸۵۵۲	-۱/۷۸۰۱۵۸	۰/۰۷۵۲
(۱۰-)M	-۰/۰۱۱۵۵۳	-۲/۶۶۴۹۹۵	۰/۰۰۷۸
ZP	۰/۰۳۱۵۷۸	۲/۶۰۱۲۷۴	۰/۰۰۹۴
(۱-)ZP	-۰/۰۳۰۸۶۹	-۲/۵۳۵۰۱۳	۰/۰۱۱۳
S	۰/۰۱۸۸۷۲	۵/۰۹۹۷۱۱	۰/۰۰۰۰
(۱-)S	-۰/۰۱۳۳۹۶	-۳/۶۰۰۷۶۰	۰/۰۰۰۳
D	-۰/۰۰۳۷۲۵	-۲/۵۳۲۳۳۷	۰/۰۱۱۴
V	۰/۰۰۴۶۹۴	۲/۷۶۵۷۸۶	۰/۰۰۵۷
(۱-)V	-۰/۰۰۴۱۷۴	-۲/۴۸۱۵۸۰	۰/۰۱۳۲
C	-۰/۰۱۸۹۶۷	-۴/۹۴۱۰۴۰	۰/۰۰۰۰

$۰/۹۰۰۲۷۴ = R^2$

$۲/۰۰۹۷۳ = DW\text{-statistic}$

$۰/۸۹۸۸۰۷ = \bar{R}^2$

همان‌طور که در جدول (۲) ملاحظه می‌شود، مدل برآوردشده دارای ضریب تعیین (R^2) ۹۰ درصد است که نشان از قدرت زیاد توضیح‌دهندگی متغیرهای مستقل دارد. انتخاب وقفه‌ها توسط معیار آکائیک در مشخصات مدل ARDL نشان می‌دهد که دو متغیر کارمزد تراکنش و حجم تراکنش ارسالی، اثرات وقفه‌ای روی متغیر وابسته دارد که برای دوره‌های زمانی

متعدد باقی می‌مانند. به طور خاص، برآوردها نشان می‌دهد که کاربران در تعیین کارمزد تراکنش، توجه بسیار زیادی به کارمزد تراکنش پرداختی روز قبل دارند؛ به طوری که یک واحد افزایش در کارمزد روز قبل، یک واحد افزایش در کارمزد تعیینی این دوره را داراست و سایر متغیرها به اندازه کارمزد تراکنش روز قبل اثرگذار نیستند.

وقفه‌های اول و دوم هر دو متغیر توضیحی اول و دوم از نظر آماری معنی‌دار هستند. دو متغیر میانگین کارمزد پرداختی تراکنش‌های تأییدشده روز قبل و حجم تراکنش‌های ارسالی به شبکه، دارای بیشترین وقفه در تعیین کارمزد هستند. این در حالی است که سایر عوامل فنی شبکه این تعداد وقفه‌های تأثیرگذار را بر روی تعیین کارمزد پرداختی ندارد. اثرگذاری این دو متغیر با تعداد وقفه‌های بالا در حقیقت، رفتار کاربران را در هنگام تعیین کارمزد و پاسخ استخراج‌کنندگان به خوبی توصیف می‌کند. با توجه به این، کاربران می‌توانند کارمزد تراکنش خود را تعیین و استخراج‌کنندگان نیز می‌توانند تراکنش‌های مورد نظر خود را انتخاب، پردازش و تأیید کنند. این سازوکار باعث شده تا کاربران هنگام تعیین کارمزد پرداختی، بیشتر از همه عوامل به کارمزد پرداختی تراکنش‌های تأییدشده روز قبل توجه کنند و در نتیجه تا ۱۰ وقفه کارمزد تراکنش پرداختی بر کارمزد تراکنش تعیینی اثرگذار است.

این واقعیت که حجم کارمزد تراکنش ارسالی، دارای ضرایب مثبت و منفی در طول ۱۰ وقفه خود است، نشان می‌دهد که رابطه بین حجم تراکنش واردشده به شبکه و میانگین کارمزد تراکنش در طول زمان پیچیده و پویا است. بسته به محیط اقتصادی و سایر عوامل هم‌زمان، حجم تراکنش‌ها می‌تواند به طرق مختلف بر کارمزدها تأثیر بگذارد. اگر بار شبکه زیاد نباشد، گاه حجم بیشتر ممکن است با کارمزدهای کمتر مطابقت داشته باشد. باین‌حال، در صورتی که حجم تراکنش‌های ارسالی شبکه شروع به افزایش کند، که نشانی از بار شدید بر روی شبکه است، این حجم تراکنش می‌تواند کارمزدها را افزایش دهد.

اثرگذاری شدید کارمزد تراکنش روز قبل (وقفه ۱ دوره‌ای TR) به عنوان متغیر مستقل به کنترل تعدیل‌های کوتاه‌مدت ناشی از سایر متغیرها در کارمزد تراکنش، در حدود سطح قبلی کارمزد کمک می‌کند. این بدان معنی است که کارمزدهای روز قبل، محدوده پایه کارمزد روز جاری را تعیین می‌کنند. این چسبندگی کارمزد تراکنش در کوتاه‌مدت، جداکردن پویایی روابط کوتاه‌مدت از روابط بلندمدت را تسهیل می‌کند و دیدگاه شفاف‌تری از نقش حجم کارمزد تراکنش ارسالی در شکل دادن به میانگین کارمزدهای تراکنش، فراتر از واکنش‌های فوری تعیین‌شده توسط سطح کارمزد قبلی ارائه می‌دهد؛ در نتیجه، اجازه می‌دهد تا اثرات طولانی‌مدتی را که حجم تراکنش ارسالی ممکن است در بازه‌های زمانی متعدد در گذشته اعمال کند، جدا کرده و در بلندمدت بررسی شود. از طرفی چسبندگی کارمزد تراکنش نشان‌دهنده این است که استخراج‌کنندگان می‌توانند بر اساس هزینه‌های استخراج بر پایه قیمت انرژی در رابطه با استخراج در بازه کوتاه‌مدت با اطمینان معقول تصمیم‌گیری کنند. سایز بلاک از متغیرهای دیگری است که می‌تواند به شدت بر کارمزد تراکنش اثرگذار باشد. استخراج بلاک بزرگ‌تر، ریسک استخراج‌کننده را افزایش می‌دهد؛ زیرا احتمال دارد در همان زمان یک استخراج‌کننده دیگر بلاک را کشف کرده و به زنجیره بلوکی متصل کند و بلاک وی نامعتبر شود. به همین دلیل، سایز بلاک در طول زمان معمولاً ثابت است؛ اما در زمانی که شبکه در اوج ترافیک خود باشد، تنها راه ممکن برای افزایش ظرفیت شبکه، افزایش سایز بلاک است. سختی شبکه عامل بعدی تأثیرگذار بر روی کارمزد تراکنش است. از آنجاکه فرایند استخراج نوعی فرایند رقابتی است، افزایش سختی شبکه به معنی رقابت بیشتر است و در نتیجه، این افزایش رقابت منجر به کاهش کارمزد پذیرفته‌شده از سوی استخراج‌کنندگان می‌شود و به همین علت سختی شبکه بر کارمزد تراکنش اثرگذار است.

در نهایت، متغیر ارزش تراکنش نیز بر کارمزد تراکنش تأثیرگذار است. نتایج نشان می‌دهد که متوسط ارزش تراکنش‌ها در روز تا دو وقفه بر روی کارمزد تراکنش اثرگذار است، ولی این اثرگذاری بسیار اندک است. اگر ارزش تراکنش‌های کاربران در طول یک روز به طور متوسط افزایش یابد، آن‌ها کارمزد را به شکل بیشتری تعیین می‌کنند. با عنایت به نتایج حاصل‌شده، کلیه فرضیه‌های مربوط به دوره کوتاه‌مدت (فرضیه ۱ تا ۶) پذیرفته می‌شود.

برآورد ضرایب بلندمدت

قبل از آنکه ضرایب بلندمدت مدل را با استفاده از روش ARDL برآورد کنیم، لازم است آزمون هم‌جمعی را انجام داده تا از وجود رابطه بلندمدت برای متغیرهای مدل، اطمینان حاصل شود. برای انجام آزمون هم‌جمعی از روش پسران و شین (۱۹۹۷) استفاده می‌شود. نتایج آزمون باند نشان داد، F محاسبه شده آزمون هم‌جمعی (۵/۹۹) بزرگ‌تر از کمیت بحرانی (۴/۱۵) است و در نتیجه، فرض صفر مبتنی بر نبود رابطه بلندمدت رد می‌شود (Usman, 2023) و متغیرهای مدل مذکور دارای رابطه بلندمدت هستند که برآورد مدل در زیر ارائه می‌شود.

جدول (۳): نتایج برآورد اثرات بلندمدت با استفاده از مدل ARDL

Table (3): Long-run effects estimation results using the ARDL model

متغیر	ضریب	انحراف معیار	آماره t	p-value
M	۰/۰۵۹۴۲۱	۰/۰۳۹۶۱۹	۱/۴۹۹۸۰۵	۰/۱۳۳۸۰
P	۰/۰۱۱۸۳۵	۰/۰۱۵۵۳۰	۰/۷۶۲۱۲۸	۰/۴۴۶۱
S	۰/۰۹۱۴۳۳	۰/۰۴۶۲۳۷	۱/۹۷۷۴۹۱	۰/۰۴۸۱
D	-۰/۰۶۲۱۹۷	۰/۰۲۱۹۲۶	-۲/۸۳۶۷۱۹	۰/۰۰۴۶
V	۰/۰۰۸۶۶۹	۰/۰۲۰۴۰۲	۰/۴۲۴۸۹۵	۰/۶۷۱۰
C	-۰/۳۱۶۶۶۶	۰/۰۴۰۲۴۶	-۷/۸۶۸۲۴۳	۰/۰۰۰۰

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، متوسط ساینز بلاک‌ها در کنار سختی شبکه دو متغیر اثرگذار بر کارمزد تراکنش‌ها در بلندمدت است. ساینز بلاک‌ها، طرف عرضه و توانایی شبکه را در پردازش تراکنش‌ها نشان می‌دهد. از آنجاکه هرچه ساینز بلاک استخراجی بزرگ‌تر شود، احتمال کشف هم‌زمان بلاک و اتصال آن به زنجیره اصلی توسط استخراج‌کننده دیگر، افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، ساینز بلاک در شبکه بیت‌کوین، نوسانات چندانی ندارد، مگر آنکه شبکه با افزایش بار شدیدی روبه‌رو شود و از آنجاکه در شبکه بیت‌کوین هر بلاک به طور متوسط در ده دقیقه استخراج می‌شود، در نتیجه، تعداد بلاک استخراجی و حجم کل تراکنش تأییدشده در هر روز محدود است. به همین دلیل در بلندمدت افزایش ساینز بلاک، اثر معنی‌داری بر کارمزد تراکنش دارد.

از طرف دیگر در بلندمدت قیمت بیت‌کوین به دلار، تأثیر معنی‌دار بر کارمزد تراکنش ندارد. این بدین معنی است که افزایش قیمت یا کاهش قیمت بیت‌کوین نمی‌تواند تأثیر مستقیمی در بلندمدت بر کارمزد تراکنش بگذارد. همچنین، استخراج‌کنندگان لازم نیست برای سرمایه‌گذاری در دستگاه‌های استخراج‌کننده، نگران تغییر شدید در کارمزد پرداختی در اثر تغییر در قیمت بیت‌کوین در بلندمدت باشند.

از طرف دیگر، حجم تراکنش‌های ارسالی به شبکه دارای تأثیر بلندمدت بر کارمزد تراکنش نیستند، بدین معنی که شبکه در بلندمدت به طرف تقاضا حساس نیست. این امکان برای استخراج‌کنندگان وجود دارد تا در هر دوره زمانی که سطح کارمزد تعیینی کاربران کاهش می‌یابد، آن‌ها اقدام به انتخاب تراکنش‌هایی مربوط به دوره‌های قبل‌تر، ولی با کارمزد تراکنش بیشتر کنند و هرچه میزان تراکنش ارسالی بیشتر باشد، این انتخاب برای استخراج‌کنندگان بیشتر خواهد بود. از طرفی کاربران نیز باتوجه به روز قبل یک حد پایینی در نظر دارند.

عامل بعدی سختی شبکه است. همان‌طور که بیان شد، سختی شبکه بیشتر به معنی مصرف انرژی بیشتر خواهد بود و در نتیجه، استخراج‌کننده، انتظار بیشتری برای کسب درآمد به‌منظور جبران سرمایه‌گذاری خود دارد؛ اما از طرفی نتایج نشان می‌دهد، رفتار استخراج‌کنندگان نوعی رقابت در میان استخراج‌کنندگان شکل می‌دهد که باعث می‌شود کارمزد تراکنش در کوتاه‌مدت کاهش یابد؛ اما این رقابت در بلندمدت به نفع استخراج‌کنندگان بوده و باعث شده که بیشترین میزان تأثیرگذاری

در بلندمدت بر کارمزد تراکنش مربوط به سختی شبکه باشد و برخلاف دوره کوتاهمدت در بلندمدت مثبت است. متغیر دیگر متوسط ارزش تراکنش‌ها به بیت‌کوین است. این متغیر در بلندمدت رابطه مستقیم با کارمزد تراکنش ندارد؛ در نتیجه، فرضیه ۸، فرضیه ۱۰ و فرضیه ۱۱ رد و فرضیه ۷ و فرضیه ۹ پذیرفته می‌شود.

نتیجه‌گیری

امروزه بیت‌کوین بیشترین ارزش بازار را در میان ارزهای مجازی داراست و توجه سرمایه‌گذاران و استخراج‌کنندگان را به خود جلب کرده است. باید دانست که استفاده‌کنندگان شبکه و استخراج‌کنندگان بلاک‌ها، دارای تضاد منافع بالقوه در مسئله کارمزد تراکنش‌ها هستند. استخراج‌کنندگان درآمد خود را به دو طریق کسب می‌کنند: یکی از طریق پاداش شبکه، بابت استخراج هر بلاک که در هر چهار سال نصف می‌شود و دیگری از طریق کارمزد تراکنش‌ها که به منظور قرارداد و پردازش تراکنش‌ها در بلاک اکتشافی آن‌ها توسط کاربران پرداخت می‌شود؛ در نتیجه در آینده نزدیک، کارمزد تراکنش تنها منبع درآمد استخراج‌کنندگان خواهد بود.

صنعت استخراج رمزارز، امروزه بسیار توسعه پیدا کرده و شرکت‌ها و استارت‌آپ‌هایی با تمرکز بر حوزه استخراج ایجاد شده‌اند. فعالیت این شرکت‌ها ساخت دستگاه‌های استخراج با راندمان بیشتر یا تولید سخت‌افزار مورد نیاز دستگاه‌های استخراج را شامل می‌شود. بعضی این شرکت‌ها امروزه در بازارهای بورس جهانی معامله می‌شوند و ارزش بازار آن‌ها میلیارد دلاری است.

از طرف دیگر، اساس ایجاد شبکه بلاک‌چین بیت‌کوین، ایجاد یک سیستم پرداخت غیرمتمرکز است؛ در نتیجه، تمرکز اصلی آن باید بر رضایت استفاده‌کنندگان شبکه از رقبا متمرکز باشد؛ بنابراین باید بتواند تراکنش‌ها را با کارمزد منطقی و بدون نوسانات زیاد پردازش کند، تا وظیفه اصلی خود را انجام دهد. اگر میزان تأخیر در پردازش تراکنش‌ها افزایش یابد یا کاربران مجبور به پرداخت کارمزدهای زیادی باشند، در نهایت شبکه را ترک خواهند کرد. کارمزد تراکنش به‌عنوان نقطه تضاد منافع میان دو گروه، نقش اصلی در پایداری و عدم فروپاشی شبکه بیت‌کوین دارد؛ لذا اهمیت بررسی کارمزد تراکنش و عوامل تعیین‌کننده آن برای استفاده‌کنندگان، استخراج‌کنندگان و توسعه‌دهندگان شبکه‌های غیرمتمرکز حیاتی است.

نتایج این پژوهش می‌تواند به کاربران هنگام تعیین کارمزد و از طرف دیگر، به استخراج‌کنندگان و سرمایه‌گذاران به اتخاذ رویکرد برای کاهش هزینه و افزایش سود کمک کند. این پژوهش اهمیت عوامل فنی و مالی را بر کارمزد تراکنش در کوتاه‌مدت و بلندمدت نشان می‌دهد. یافته‌های پژوهش نشان داد که در کوتاه‌مدت عامل میانگین کارمزد پرداختی تراکنش‌های تأییدشده روز قبل، قیمت و حجم تراکنش‌های ارسالی، سختی شبکه و ساینز بلاک بر کارمزد تراکنش اثرگذار بودند. دو عامل کارمزد تراکنش‌ها و حجم تراکنش‌های ارسالی دارای بیشترین میزان وقفه اثرگذار بر روی تعیین کارمزد تراکنش در کوتاه‌مدت بودند.

نتیجه‌گیری دیگر در بررسی کوتاه‌مدت این است که مبنای اصلی تصمیم‌گیری کاربران هنگام تعیین کارمزد تراکنش‌های خود با اختلاف بسیار زیاد، کارمزد پرداختی تراکنش‌های تأییدی روزهای گذشته است. همچنین در بلندمدت مهم‌ترین عوامل، شامل متوسط ساینز بلاک و سختی شبکه است. سختی شبکه بیشترین اثرگذاری بلندمدت را بر روی کارمزد تراکنش دارد. سختی شبکه بیشتر به معنای قدرت محاسباتی قوی‌تر شبکه است و از طرفی قدرت محاسباتی قوی‌تر به تجهیزات محاسباتی و استخراج قوی‌تر، گران‌تر و مصرف انرژی بیشتری نیاز دارد. تمامی این موارد باعث می‌شود تا هزینه استخراج بیشتر شود.

نتایج پژوهش نشان داد که در کوتاه‌مدت با افزایش سختی شبکه، باوجود افزایش هزینه‌های استخراج، کارمزد تراکنش‌ها کاهش می‌یابد؛ اما در بلندمدت این روند برعکس شده و افزایش سختی شبکه به معنی افزایش کارمزد شبکه است. نتایج نشان داد که در کوتاه‌مدت چسبندگی کارمزد وجود دارد و همین مسئله باعث می‌شود تا نوسانات متغیرهای توضیحی، تأثیر

زیادی بر کارمزد تراکنش نداشته باشد. همین مسئله به تصمیم‌گیری کاربران در تعیین سطح کارمزد و پایداری سطح آن کمک خواهد کرد. از طرفی استخراج‌کنندگان با در نظر داشتن پایداری کارمزد در کوتاه‌مدت، می‌توانند براساس قیمت انرژی و سایر هزینه‌ها در خصوص استخراج در کوتاه‌مدت تصمیم‌گیری کنند. در بلندمدت نیز نتایج نشان داد که اگرچه کارمزد تراکنش دچار چسبندگی است، اما با توجه به وظیفه متعادل‌کننده‌ای که در شبکه دارد، در بلندمدت انعطاف‌پذیر بوده و منجر به پویایی کارمزد تراکنش با توجه به عرضه و تقاضا می‌شود.

در انتها پیشنهاد می‌شود که کاربران هنگام تعیین کارمزد تراکنش، عوامل اثرگذار کوتاه‌مدت را در نظر بگیرند تا بتوانند کارمزد تراکنش بهینه‌تری را تعیین کنند. از طرف دیگر، با کاهش پاداش استخراج هر بلاک در سال‌های آتی و سرعت عالی رشد توان محاسباتی شبکه در سال‌های اخیر، استخراج‌کنندگان با در نظر گرفتن عوامل کوتاه‌مدت و بلندمدت می‌توانند استراتژی درآمدی کارا و بهینه‌ای را برای کسب درآمد با تمرکز بیشتر بر کارمزد تراکنش‌ها اتخاذ کنند. همچنین پیشنهاد می‌شود، در پژوهش‌های بعدی شبیه‌سازی سناریو رفتار استخراج‌کنندگان با استفاده از نظریه بازی‌ها صورت گیرد تا از این طریق بتوان به افزایش کارایی سرمایه‌گذاری در این حوزه کمک کرد.

References

- Basu, S., Easley, D., O'Hara, M., & Siner, E. G. (2023). StableFees: A predictable fee market for cryptocurrencies. *Management Science*, 69(11), 6508-6524. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2023.4735>
- Bhaskar, N. D., & Chuen, D. L. K. (2015). Bitcoin mining technology. In *Handbook of Digital Currency*, 45-65. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802117-0.00003-5>
- Bouraoui, T., (2020). The drivers of Bitcoin trading volume in selected emerging countries. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 76, 218-229. <https://doi.org/10.1016/j.qref.2019.07.003>
- Bouzmit, M., & Pablo-Romero, M. D. P. (2016). CO2 emission and economic growth in Algeria. *Energy Policy*, 96, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.036>
- Bowden, R., Keeler, H. P., Krzesinski, A. E., & Taylor, P. G. (2018). Block arrivals in the bitcoin blockchain. *Arxiv Preprint Arxiv:07447/1801*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.07447>
- Catalini, C., & Gans, J. S. (2020). Some simple economics of the blockchain. *Communications of the ACM*, 63(7), 80-90. <https://doi.org/10.1145/3359552>
- Chen, Y. (2021). Empirical analysis of bitcoin price. *Journal of Economics and Finance*, 45(4), 692-715. <https://doi.org/10.1007/s12197-021-09549-5>
- Cusumano, M. A. (2014). The bitcoin ecosystem. *Communications of the ACM*, 57(10), 22-24. <https://doi.org/10.1145/2661047>
- Easley, D., O'Hara, M., & Basu, S. (2019). From mining to markets: The evolution of bitcoin transaction fees. *Journal of Financial Economics*, 134(1), 91-109. <https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2019.03.004>
- Ebert, U., & Welsch, H. (2004). Meaningful environmental indices: A social choice approach. *Journal of Environmental Economics and Management*, 47(2), 270-283. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2003.09.001>
- Engle, R. F., & Granger, C. W. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 55(2), 251-276. <https://doi.org/10.2307/1913236>
- Franco, P. (2014). *Understanding Bitcoin: Cryptography, Engineering and Economics*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119019138>
- Freudenberg, M. (2003). *Composite Indicators of Country Performance: A Critical Assessment*. OECD. <https://doi.org/10.1787/18151965>
- Gal, M. S., & Rubinfeld, D. L. (2019). Data Standardization. *NYU Law and Economics Research*, 94, 17-19. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3326377>
- Gervais, A., Karame, G. O., Wüst, K., Glykantzis, V., Ritzdorf, H., & Capkun, S. (2016). On the security and performance of proof of work blockchains. *ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, 3-16. <https://doi.org/10.1145/2976749.2978341>

- Ghimire, S., & Selvaraj, H. (2018). A survey on bitcoin cryptocurrency and its mining. *26th International Conference on Systems Engineering (ICSEng)*. <https://doi.org/10.1109/ICSENG.2018.8638208>
- Göbel, J., & Krzesinski, A. E. (2017). Increased block size and Bitcoin blockchain dynamics. *27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*. <https://doi.org/10.1109/ATNAC.2017.8215367>
- Grinberg, R. (2012). Bitcoin: An innovative alternative digital currency. *Hastings Science & Technology Law Journal*, 4, 159. https://repository.uclawsf.edu/hastings_science_technology_law_journal/vol4/iss1/3
- Guizani, S., & Nafti, I. K. (2019). The determinants of bitcoin price volatility: An investigation with ARDL model. *Procedia Computer Science*, 164, 233-238. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.12.177>
- Hayes, A. S. (2017). Cryptocurrency value formation: An empirical study leading to a cost of production model for valuing bitcoin. *Telematics and Informatics*, 34(7), 1308-1321. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2016.05.005>
- Hou, B., & Chen, F. (2020). A study on nine years of Bitcoin transactions: Understanding real-world behaviors of bitcoin miners and users. *IEEE 40th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. <https://doi.org/10.1109/ICDCS47774.2020.00091>
- Huberman, G., Leshno, J. D., & Moallemi, C. (2019). An economist's perspective on the bitcoin payment system. In *AEA Papers and Proceedings*, 109, 93-96. <https://doi.org/10.1257/pandp.20191019>
- Jacobs, R., Smith, P., & Goddard, M. (2004). *Measuring performance: An examination of composite performance indicators*. The University of York. <https://www.york.ac.uk/che/pdf/tp29.pdf>
- Jiang, S., & Wu, J. (2019). Bitcoin mining with transaction fees: A game on the block size. *IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain)*. <https://doi.org/10.1109/Blockchain.2019.00023>
- Joint Research Centre-European Commission. (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>
- Kasahara, S., & Kawahara, J. (2016). Effect of Bitcoin fee on transaction-confirmation process. *Arxiv Preprint Arxiv:00103/1604*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.00103>
- Kaushal, P. K., Bagga, A., & Sobti, R. (2017). Evolution of Bitcoin and security risk in bitcoin wallets. *International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix)*. <https://doi.org/10.1109/COMPTELIX.2017.8003959>
- Kim, T. (2017). On the transaction cost of Bitcoin. *Finance Research Letters*, 23, 300-305. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2017.07.014>
- Kraft, D. (2016). Difficulty control for blockchain-based consensus systems. *Peer-to-peer Networking and Applications*, 9, 397-413. <https://doi.org/10.1007/s12083-015-0347-x>
- Kripfganz, S., & Schneider, D. C. (2023). ARDL: Estimating autoregressive distributed lag and equilibrium correction models. *The Stata Journal*, 23(4), 983-1019. <https://doi.org/10.1177/1536867X231212434>
- Kroll, J. A., Davey, I. C., & Felten, E. W. (2013). The economics of Bitcoin mining, or Bitcoin in the presence of adversaries. In *Proceedings of WEIS*, 2013(11), 1-21
- Kumari, B., & Swarnkar, T. (2020). Importance of data standardization methods on stock indices prediction accuracy. In *Advanced Computing and Intelligent Engineering: Proceedings of ICACIE 2018*, 1, 309-318. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1081-6_26
- Larimer, D. (2014). Delegated proof-of-stake (dpos). *Bitshare Whitepaper*, 81, 85. Retrieved from: <https://blog.bitmex.com/wp-content/uploads/2018/06/173481633-BitShares-White-Paper.pdf>
- Lavi, R., Sattath, O., & Zohar, A. (2022). Redesigning Bitcoin's fee market. *ACM Transactions on Economics and Computation*, 10(1), 1-31. <https://doi.org/10.1145/3530799>
- Li, J., Yuan, Y., & Wang, F. Y. (2022). Analyzing Bitcoin transaction fees using a queueing game model. *Electronic Commerce Research*, 22, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10660-020-09414-3>
- Li, J., Yuan, Y., Wang, S., & Wang, F. Y. (2018). Transaction queueing game in bitcoin blockchain. In *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IV*, 114-119. <https://doi.org/10.1109/IVS.2018.8500403>
- Mihăilescu, R. (2018). Blockchain technologies: A new approach to old challenges. *Revista tinerilor Economisti*, 31, 7-21. <https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=1031642>

- Möser, M., & Böhme, R. (2015). Trends, tips, tolls: A longitudinal study of Bitcoin transaction fees. In *Financial Cryptography and Data Security: FC 2015 International Workshops, BITCOIN, WAHC, and Wearable, San Juan, Puerto Rico*. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48051-9_2
- Nakamoto, S., & Bitcoin, A. (2008). A peer-to-peer electronic cash system. *Bitcoin*.—URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>, 4(2), 15.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, H., & Giovannini, E. (2005). Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide. *Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). Statistics Working Paper JT00188147*, OECD, France, 164. <https://doi.org/10.1787/18152031>
- Nayak, S. C., Misra, B. B., & Behera, H. S. (2014). Impact of data normalization on stock index forecasting. *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, 6, 257-269.
- Nguyen, G. T., & Kim, K. (2018). A survey about consensus algorithms used in blockchain. *Journal of Information processing systems*, 14(1), 101-128. <https://dx.doi.org/10.3745/JIPS.01.0024>
- O'Dwyer, K. J., & Malone, D. (2014). Bitcoin mining and its energy footprint. *China-Ireland International Conference on Information and Communities Technologies (ISSC 2014/CICT 2014)*, <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0699>
- Okupski, K. (2014). *Bitcoin Developer Reference*. Eindhoven. https://www.lopp.net/pdf/Bitcoin_Developer_Reference.pdf
- Ostbye, P. (2018). The Case for a 21 million Bitcoin Conspiracy. *SSRN Electronic Journal*, 3136044, <https://doi.org/10.2139/ssrn.3136044>
- Pesaran, M. H., & Shin, Y. (1995). *An Autoregressive Distributed Lag Modelling Approach to Cointegration Analysis*. Department of Applied Economics, University of Cambridge. <http://dx.doi.org/10.1017/CCOL0521633230.011>
- Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16(3), 289-326. <https://doi.org/10.1002/jae.616>
- Rizun, P. R. (2015). A transaction fee market exists without a block size limit. *Block Size Limit Debate Working Paper*, 2327-4697. <https://blog.bitmex.com/wp-content/uploads/2018/01/feemarket.pdf>
- Saad, M., Njilla, L., Kamhoua, C., Kim, J., Nyang, D., & Mohaisen, A. (2019). Mempool optimization for defending against DDoS attacks in PoW-based blockchain systems. In *2019 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC)*, 285-292. <https://doi.org/10.1109/BLOC.2019.8751476>
- Shanker, M., Hu, M. Y., & Hung, M. S. (1996). Effect of data standardization on neural network training. *Omega*, 24(4), 385-397. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(96\)00010-2](https://doi.org/10.1016/0305-0483(96)00010-2)
- Tan, B. S., & Low, K. Y. (2017). Bitcoin—its economics for financial reporting. *Australian Accounting Review*, 27(2), 220-227. <https://doi.org/10.1111/auar.12167>
- Todorova, T. (2015). The transaction-cost roots of market failure. *Journal of Advanced Research in Management (JARM)*, 6(11), 30-44. https://mpira.ub.uni-muenchen.de/66757/1/MPRA_paper_66757.pdf
- Tsang, K. P., & Yang, Z. (2021). The market for bitcoin transactions. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 71, 101282. <https://doi.org/10.1016/j.intfin.2021.101282>
- Usman, K. (2023). The linkages between trade, financial openness, and economic growth in China: An ARDL-bound test approach. *Journal of Applied Economics*, 26(1), 2258616. <https://doi.org/10.1080/15140326.2023.2258616>
- Vallarano, N., Tessone, C. J., & Squartini, T. (2020). Bitcoin transaction networks: an overview of recent results. *Frontiers in Physics*, 8, 286. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00286>
- Van Alstyne, M. (2014). Why Bitcoin has value. *Communications of the ACM*, 57(5), 30-32. <https://doi.org/10.1145/2594288>
- Velde, F. (2013). *Bitcoin: A Primer*. <https://www.chicagofed.org/publications/chicago-fed-letter/2013/december-317>

Ye, W., Wong, W. K., Arnone, G., Nassani, A. A., Haffar, M., & Faiz, M. F. (2023). Crypto currency and green investment impact on global environment: A time series analysis. *International Review of Economics & Finance*, 86, 155-169. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2023.01.030>