



Analyzing Fee Market Dynamics over the Bitcoin Lifecycle

Amin Rostami *

*Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Accounting, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: a.rostami@ase.ui.ac.ir

Mahdi Safaei

PhD Candidate, Department of Accounting, Faculty of Accounting and Financial Sciences, College of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: safaiemahdi1999@gmail.com

Abstract

Objective

Since its inception in 2009, Bitcoin has experienced tremendous growth in terms of public acceptance as the oldest cryptocurrency. However, transitioning from an experimental digital currency to a mainstream payment network introduced new challenges related to scalability and capacity. This study investigates how bitcoin transaction fees respond to financial and technical factors within the network over different periods of its lifespan. The investigation provides novel insights into the dynamics of a decentralized currency and the maturity of a payment network.

Methods

Bitcoin blockchain data from 2009 to 2023 was categorized into three distinct periods for analysis: the Initial Period (2009-2014), Speculation Period (2014-2018), and Scalability Challenge Period (2018-2023). Autoregressive Distributed Lag (ARDL) modeling was used to analyze short-term and long-term relationships. The dependent variable was the transaction fee, and the explanatory variables included the bitcoin price, average transaction value, average block size, network difficulty, and transaction volume.

Results

The results showed that during the Initial Period, in the short term, the price and the previous day's fee had a significant effect on the transaction fee, and in the long term, the price also

Citation: Rostami, Amin & Safaei, Mahdi (2025). Analyzing Fee Market Dynamics over the Bitcoin Lifecycle. *Financial Research Journal*, 27(4), 1010-1035. <https://doi.org/10.22059/FRJ.2025.375585.1007592> (in Persian)



affected the transaction fee. During the Speculation Period, the transaction volume, block size, and the previous day's fee in the short term, as well as network difficulty in the long term, had a significant effect on the transaction fee. During the Scalability Challenge Period, in the short term, the previous day's transaction fee, Bitcoin price, the average value of transactions in Bitcoin, block size, network difficulty, and transaction volume had significant effects on the transaction fee, while in the long term, network difficulty and block size remained significant. Moreover, during the Scalability Challenge Period, the previous day's fee had a strong effect on the current day's fee, creating a kind of stickiness that persisted until the end of the period. Overall, fees were stabilized over time as users and miners learned the factors influencing them, optimizing their behavior around block limits and mining reward incentives. During the Initial Period, transaction fees were highly volatile due to Bitcoin's nascency and limited usage. As cryptocurrencies increasingly became utilized as a payment mechanism in the Speculation Period, the technical parameters affecting block sizes and processing capacity caused fees to be more reflective of demand on the network. The emergence of scalability constraints facing the blockchain in the Scalability Challenge Period has led to linking the dynamics of fees to more metrics that act as proxies for the level of activity and network usage.

Conclusion

As bitcoin has become a payment network in the new concept, the fees have been aligned with the demand and motivations of network participants during the scaling challenge period, instead of randomly fluctuating during the Initial Period. The separation of bitcoin network data into three time periods provides a new perspective on how decentralized networks work and the factors affecting the fee market in different periods of network maturity.

Keywords: Behavioral finance, Bitcoin, Blockchain, Fee market, International finance, Transaction fee.

تجزیه و تحلیل پویایی بازار کارمزد در چرخه عمر شبکه بیت کوین

امین رستمی*

* نویسنده مسئول، استادیار، گروه حسابداری، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: a.rostami@ase.ui.ac.ir

مهدی صفائی

دانشجوی دکتری، گروه حسابداری، دانشکده حسابداری و علوم مالی، دانشکدگان مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: safaiemahdi1999@gmail.com

چکیده

هدف: بیت کوین از زمان آغاز به کار خود در سال ۲۰۰۹، از نظر پذیرش عمومی به عنوان قدیمی ترین ارز دیجیتال، رشد فوق العاده ای را تجربه کرده است؛ با این حال، تحول آن از یک ارز دیجیتال آزمایشی، به یک شبکه پرداخت مالی اصلی، چالش های جدیدی را در رابطه با مقیاس پذیری و ظرفیت ایجاد کرد. این مطالعه به دنبال بررسی چگونگی پاسخ کارمزد تراکنش بیت کوین به عوامل مالی و فنی درون شبکه در دوره های مختلف عمر آن است. این پژوهش دیدگاه نوینی درباره پویایی یک ارز و بلوغ شبکه پرداخت غیرمتمرکز ارائه می دهد.

روش: داده های شبکه بلاکچین بیت کوین از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ جمع آوری و در سه دوره، شامل دوره پذیرش اولیه (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴)، دوره سوداگرانه (۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸) و دوره چالش مقیاس پذیری (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳) تفکیک و تحلیل شده است. مدل سازی ARDL برای تحلیل روابط کوتاه مدت و بلندمدت استفاده شده است. متغیر وابسته کارمزد تراکنش و متغیرهای توضیحی، شامل قیمت بیت کوین، متوسط ارزش تراکنش ها به بیت کوین، اندازه بلاک، سختی شبکه و حجم تراکنش است.

یافته ها: نتایج نشان می دهد که در دوره پذیرش اولیه که قیمت و کارمزد روز قبل در دوره کوتاه مدت بر کارمزد تراکنش مؤثر است، قیمت نیز در بلندمدت بر کارمزد تراکنش تأثیر می گذارد. در دوره سوداگرانه، حجم تراکنش ارسالی، اندازه بلاک و کارمزد روز قبل در کوتاه مدت و در بلندمدت سختی شبکه، بر کارمزد تراکنش اثرگذاری معناداری دارد. در دوره چالش مقیاس پذیری، در کوتاه مدت کارمزد تراکنش روز قبل، قیمت بیت کوین، متوسط ارزش تراکنش ها به بیت کوین، اندازه بلاک، سختی شبکه و حجم تراکنش و در بلندمدت سختی شبکه و سایز بلاک بر کارمزد اثر معناداری دارد. همچنین در دوره چالش مقیاس پذیری، کارمزد روز قبل اثرگذاری بالایی بر کارمزد روز جاری دارد؛ به طوری که نوعی چسبندگی را ایجاد کرده است که تا پایان دوره ادامه می یابد. به طور کلی، کارمزدها در طول دوره ها از طریق یادگیری عوامل مؤثر بر آن تثبیت می شوند؛ زیرا رفتار کاربران و استخراج کنندگان پیرامون محدودیت های بلاک و انگیزه های پاداش استخراج، بهینه شده اند. در طول دوره پذیرش اولیه، کارمزد تراکنش ها به دلیل نوپا بودن بیت کوین و استفاده محدود، نوسان های بالایی داشت. همان طور که ارزهای دیجیتال به طور فزاینده به عنوان سازوکار پرداخت در دوره سوداگرانه مورد استفاده قرار گرفت، پارامترهای فنی اثرگذار بر اندازه بلاک و ظرفیت پردازش باعث شد که کارمزدها بیشتر منعکس کننده تقاضای در شبکه باشند. ظهور

استناد: رستمی، امین و صفائی، مهدی (۱۴۰۴). تجزیه و تحلیل پویایی بازار کارمزد در چرخه عمر شبکه بیت کوین. *تحقیقات مالی*، ۳۷(۴)، ۱۰۱۰-۱۰۳۵.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

doi: <https://doi.org/10.22059/FRJ.2025.375585.1007592>

تحقیقات مالی، ۱۴۰۴، دوره ۲۷، شماره ۴، صص. ۱۰۳۵-۱۰۱۰

ناشر: دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

نوع مقاله: علمی پژوهشی

© نویسندگان

محدودیت‌های مقیاس‌پذیری که بلاکچین در دوره چالش مقیاس‌پذیری با آن مواجه است، باعث شد که پویایی کارمزدها به معیارهای بیشتری مرتبط شود که به‌عنوان نماینده‌هایی برای سطح فعالیت و استفاده از شبکه عمل می‌کنند.

نتیجه‌گیری: همان‌طور که بیت‌کوین در مفهوم جدید به شبکه پرداخت تبدیل شد، کارمزدها به‌جای نوسان تصادفی در دوره پذیرش اولیه، با تقاضا و انگیزه‌های مشارکت‌کنندگان شبکه در دوره چالش مقیاس‌پذیری هم‌سو شده است. تفکیک داده‌های شبکه بیت‌کوین به سه دوره زمانی، دیدگاه نوینی از چگونگی کارکرد شبکه‌های غیرمتمرکز و عوامل مؤثر بر بازار کارمزد در دوره‌های مختلف بلوغ شبکه را فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها: بیت‌کوین، مالی رفتاری، مالی بین‌الملل، بازار کارمزد، بلاکچین، هزینه تراکنش.

مقدمه

در سال ۲۰۰۸ ساتوشی ناکاموتو مقاله‌ای منتشر و در آن بیت کوین را سیستم پرداخت الکترونیک همتا به همتا معرفی کرد (ناکاموتو^۱، ۲۰۰۸). شبکه بیت کوین، دیتابیس غیرمتمرکزی است که به شکل تخصصی برای مسائل مالی و جلوگیری از دو بار خرج کردن ایجاد شده است. در این شبکه اطلاعات بر روی واحد هایی به نام بلاک ثبت می شوند. استخراج کنندگان با حدس عدد یک تابع ریاضی یک طرفه معروف به تابع هش می توانند بلاک (واحد های ثبت اطلاعات) استخراج کنند (فرانکو^۲، ۲۰۱۴) و به این شکل دیتا بیس گسترش می یابد (تان و لو^۳، ۲۰۱۷). استخراج کننده با استفاده از قدرت محاسباتی در تلاش اند تا بتوانند هش صحیح را پیدا کند و بلاک جدید را استخراج کند (بودن، کیلر، کرزینسکی و تیلور^۴، ۲۰۱۸؛ کرفت^۵، ۲۰۱۶). استخراج کننده موفق در حدس صحیح هش و استخراج بلاک معتبر، این موضوع را به شرکت کنندگان اطلاع می دهد و پس از تأیید آن ها این بلاک به زنجیره اصلی اضافه و اطلاعات روی شبکه بلاکچین آپدیت می شود (باسکار و چوئن^۶، ۲۰۱۵؛ ولده^۷، ۲۰۱۳). 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 می کند و با استفاده از معیاری به نام سختی شبکه، تعیین می کند 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 استخراج کنندگان شود. پس از تعیین سختی، میزان آن تا ۲۰۱۶ بلاک بعدی ثابت است (بودن و همکاران، ۲۰۱۸؛ کرفت، ۲۰۱۶؛ باسکار و چوئن، ۲۰۱۵؛ ولده، ۲۰۱۳).

خرید بیت کوین به شکل مستقیم از داخل شبکه امکان پذیر نیست. خالق شبکه، بیت کوین را به عنوان رابطی برای برقراری تعادلی از منافع به شکل انگیزه برای کسانی که در شبکه شرکت می کنند و در پایداری شبکه نقش دارند، تعریف کرد. این انگیزه به دو شکل پاداش استخراج هر بلاک و کارمزد تراکنش تعریف شده است (اودی^۸، ۲۰۱۴؛ کاوشال، باگا و سوبتی^۹، ۲۰۱۷؛ لی، یوان، ونگ و ونگ^{۱۰}، ۲۰۱۸). تعداد کل بیت کوین ها در پروتکل شبکه ۲۱ میلیون تعریف شده است (کوسومانو^{۱۱}، ۲۰۱۴؛ اوست بای^{۱۲}، ۲۰۱۸؛ ون آلیستینه^{۱۳}، ۲۰۱۴). این الگوریتم توسط جامعه بیت کوین تغییر کردنی نخواهد بود (فرانکو، ۲۰۱۴). با در نظر گرفتن این موضوع که زمان استخراج هر بلاک در حدود ده دقیقه است، پاداش

1. Nakamoto
2. Franco
3. Tan & Low
4. Bowden, Keeler, Krzesinski & Taylor
5. Kraft
6. Bhaskar & Chuen
7. Velde
8. O'Dwyer & Malone
9. Kaushal, Bagga & Sobti
10. Li, Yuan, Wang & Wang
11. Cusumano
12. Østbye
13. Van Alstyne

شبکه هر ۲۱۰۰۰۰ بلاک و یا در حدود ۴ سال یک بار نصف می‌شود (فرانکو، ۲۰۱۴؛ قمیره و سلوراج، ۲۰۱۸؛ گرینبرگ^۲، ۲۰۱۲). 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 (ریزون^۳، ۲۰۱۵؛ گوبل و کرزینسکی^۴، ۲۰۱۷).

تعیین کارمزد تراکنش به عهده ارسال‌کننده تراکنش است. در طرف دیگر، انتخاب تراکنش‌ها برای قرار دادن در بلاک استخراج شده، به عهده استخراج‌کنندگان همان بلاک است (کرو، دیوی و فلتن^۵، ۲۰۱۳؛ هوبرمن و همکاران، ۲۰۱۹؛ جیانگ و وو^۶، ۲۰۱۹). استفاده‌کنندگان شبکه برای قرار دادن تراکنش خود در فضای محدود بلاک باید با یکدیگر یکدیگر رقابت کنند. در نتیجه مکانیزم بازار و عرضه و تقاضا، کارمزد تراکنش پرداختی را تعیین می‌کند. از طرفی اگر فرد بخواهد تراکنش‌اش در اولین بلاک استخراج شده بعدی قرار گیرد و یا به اصطلاح زودتر تأیید شود، باید کارمزد بالاتری بپردازد (موزر و بوم^۷، ۲۰۱۵). در صورتی که افراد کارمزد تراکنش پرداختی را بسیار کم تعیین کنند، تأیید این تراکنش‌ها زمان بیشتری خواهد برد (کاساهارا و کاواهارا^۸، ۲۰۱۶). ممکن است تراکنش آن‌ها تأیید نشده باقی بماند یا زمانی تأیید شود که بار شبکه کمتر شده که این اتفاق ممکن است تا چند روز طول بکشد. یکی از اصلی‌ترین اهداف و کارکردهای اصلی دیگر کارمزد تراکنش‌ها، جلوگیری از ارسال بیش از حد تراکنش و مختل شدن شبکه است (سعد و همکاران^۹، ۲۰۱۹). به همین منظور در هسته شبکه بیت‌کوین حداقل کارمزد تراکنش تعیین شده است که در هسته شبکه بیت‌کوین میزان آن ۱۰۰۰ ساتوشی به ازای هر کیلوبایت است (اوکپسکی^{۱۰}، ۲۰۱۴).

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 آنجا که 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. این در حالی است که میزان عرضه یعنی سائز هر بلاک که فضایی است که در آن تراکنش‌ها قرار بگیرند، 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 با اهمیتی بر رفتار کاربران در هنگام تعیین کارمزد بگذارند.

1. Ghimire & Selvaraj
2. Grinberg
3. Rizun
4. Göbel & Krzesinski
5. Kroll, Davey & Felten
6. Jiang & Wu
7. Möser & Böhme
8. Kasahara & Kawahara
9. Saad et al.
10. Okupski

شبکه بیت کوین از زمان آغاز به کارش در سال ۲۰۰۹ بسیار تکامل یافته است. در آغاز کار، بیت کوین یک ارز دیجیتال آزمایشی با موارد استفاده محدود حساب می شد، ولی امروزه به یک دارایی سوداگرانه تبدیل و به عنوان یک زیرساخت پرداخت معتبر، شناخته می شود. این تحولات را به سه دوره پذیرش اولیه^۱ (۲۰۰۹-۲۰۱۴)، دوره سوداگرانه^۲ (۲۰۱۴-۲۰۱۸)، و دوره چالش مقیاس پذیری^۳ (۲۰۱۸-۲۰۲۳) می توان تقسیم کرد. تقسیم بندی این دوره های زمانی، بر اساس تغییرات قابل توجه در رفتار بازار بیت کوین، الگوهای متنوع استفاده و محدودیت های فنی شبکه است. در دوره پذیرش اولیه، بیت کوین یک ارز دیجیتال آزمایشی با حداقل فعالیت شبکه و حجم تراکنش بود. همان طور که بیت کوین به رسمیت شناخته شد و پذیرش آن افزایش یافت، دوره سوداگرانه ظهور کرد که مشخصه آن افزایش حجم و ارزش معاملات بود. دوره سوم، دوره چالش مقیاس پذیری است که در آن شبکه بیت کوین با محدودیت ظرفیت پردازش تراکنش روبرو شد. به عبارت دیگر، با افزایش حجم تراکنش های ارسالی روزانه، شبکه بیت کوین به دلیل اندازه و تعداد بلاک ثابت و توان عملیاتی محدود با تراکم فزاینده ای مواجه شد. به همین منظور در این پژوهش، عوامل فنی شبکه و عوامل مالی مؤثر بر کارمزد تراکنش در سه دوره مذکور مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن می تواند به کاربران برای تصمیم گیری صحیح تر در هنگام تعیین کارمزد تراکنش ها و همچنین به استخراج کنندگان برای اتخاذ استراتژی های بهتر برای کسب درآمد کمک کند.

فرضیه های پژوهش

با ارزیابی اثرهای عوامل فنی و مالی در بازه های کوتاه مدت و بلندمدت، پژوهش فعلی به دنبال ارائه نمایه ای جامع تر از نحوه ارتباط متغیرهای فنی و مالی بر هزینه های تراکنش است که در نهایت توسط استفاده کنندگان شبکه متحمل می شود. همان طور که در بخش های قبلی اشاره شد، کارمزد تراکنش یکی از دغدغه های اصلی کاربران، استخراج کنندگان و سرمایه گذاران بیت کوین است. با توجه به اینکه مسائل فنی شبکه و اطلاعات مالی بیت کوین می توانند تأثیر با اهمیتی بر کارمزد تراکنش بگذارند، فرضیه های این پژوهش به صورت زیر (در بازه زمانی کوتاه مدت و بلندمدت) تدوین شده است:

الف) کوتاه مدت

- فرضیه ۱-۱. متوسط ارزش تراکنش به بیت کوین در روز در کوتاه مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.
- فرضیه ۱-۲. حجم تراکنش های ارسال شده به بایت در روز در کوتاه مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.
- فرضیه ۱-۳. قیمت بیت کوین به دلار در روز در کوتاه مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.
- فرضیه ۱-۴. سختی شبکه در کوتاه مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.
- فرضیه ۱-۵. متوسط اندازه بلاک ها به بایت در کوتاه مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.
- فرضیه ۱-۶. متوسط کارمزد تراکنش به بیت کوین در روز در کوتاه مدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

1. Initial Period
2. Speculation Period
3. Scalability Challenge Period

ب) بلند مدت

فرضیه ۱-۲. حجم تراکنش‌های ارسال شده به بایت در روز بر کارمزد تراکنش در بلندمدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۲-۲. قیمت بیت‌کوین به دلار در روز بر کارمزد تراکنش در بلندمدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۳-۲. سختی شبکه بر کارمزد تراکنش در بلندمدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۴-۲. متوسط اندازهٔ بلاک‌ها به بایت بر کارمزد تراکنش در بلندمدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

فرضیه ۵-۲. متوسط ارزش تراکنش به بیت‌کوین در روز در بلندمدت بر کارمزد تراکنش تعیینی توسط کاربر اثر دارد.

پیشینه پژوهش

به‌طور خلاصه مطالعات متعددی برای درک بهتر عوامل مؤثر بر کارمزد تراکنش‌ها در شبکه بیت‌کوین انجام شده است. از آنجایی که بیت‌کوین از بازار کارمزد برای تشویق استخراج‌کنندگان برای پردازش تراکنش‌ها استفاده می‌کند، هدف محققان شناسایی متغیرهای کلیدی است که میزان کارمزدی را که کاربران می‌پردازند را تعیین می‌کند.

پیشینه نظری

به‌طور کلی پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه در سه دسته قرار می‌گیرند. دسته اول پژوهش‌هایی هستند که بر تجزیه و تحلیل داده‌های تراکنش‌ها، متمرکز شده است تا مشخص شود که چه چیزی باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود (هو و چن^۱، ۲۰۲۰؛ تسانگ و یانگ^۲، ۲۰۲۱). بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که اندازه تراکنش در بایت، تأثیر مثبت قابل توجهی بر کارمزد دارد، زیرا تراکنش‌های بزرگ‌تر به منابع محاسباتی بیشتری از استخراج‌کنندگان نیاز دارند. سایر ویژگی‌های تراکنش مانند تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها نیز با کارمزدهای بالاتر 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. وضعیت شبکه نیز به‌عنوان یک عامل مهم در هزینه‌ها شناسایی شده است. هنگامی که بلاکچین به دلیل افزایش تقاضای تراکنش، بار بیشتری متحمل می‌شود، پیشنهادهای کارمزد استاندارد که توسط کیف پول‌ها پیشنهاد می‌شود، افزایش می‌یابد. این موضوع 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.

1. Hou & Chen

2. Tsang & Yang

در دسته دوم، محققان همچنین نقش کارمزد تراکنش‌ها را به عنوان یک واسطه بین کاربران و استخراج کنندگان شبکه (مسئول پردازش و اعتبارسنجی تراکنش‌ها) تأیید می‌کنند. از یک طرف، کارمزدهای بالا تهدیدی برای جلوگیری از استفاده از سیستم بیت کوین برای پرداخت‌های کوچک است. از سوی دیگر، کارمزدها درآمد لازم را برای استخراج کنندگان فراهم می‌کند تا از طریق اثبات کار، بلاکچین را ایمن کنند (لی و همکاران^۱، ۲۰۲۲؛ ایزلی، اوهارا و باسو^۲، ۲۰۱۹؛ لاوی، ساتات و زوهر^۳، ۲۰۲۲). در دسته سوم برخی از مطالعات به شبیه سازی یا ارائه پیشنهاد برای تنظیم پویای ظرفیت‌ها یا هزینه‌های بلاک روی آورده‌اند، به گونه‌ای که هم نیازهای کاربران و هم استخراج کنندگان را متعادل می‌کند تا از پایداری و رشد طولانی مدت شبکه بیت کوین اطمینان حاصل شود (والارنو، تسون و اسکوارتینی^۴، ۲۰۲۰؛ باسو، ایزلی، اوهارا و سایر^۵، ۲۰۲۳). به طور کلی، انواع فاکتورهای زنجیره‌ای و شبکه‌ای در تعامل هستند تا به طور جمعی بر کارمزد تراکنش‌هایی که در نهایت کاربران بیت کوین می‌پردازند تأثیر بگذارند.

با تجزیه و تحلیل پژوهش‌های صورت گرفته در رابطه با بازار کارمزدی شبکه بلاکچین بیت کوین، 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 پژوهش تسانگ و یانگ (۲۰۲۱)، ازدحام شبکه است. همان طور که افراد بیشتری سعی می‌کنند در بلاکچین بیت کوین تراکنش انجام دهند، شبکه ترافیک بیشتری پیدا خواهد کرد و از آنجا که هر بلاک در هر ده دقیقه استخراج می‌شود و ظرفیت تراکنش‌های تأیید شده دارای سقف است، در نتیجه هزینه‌های مورد نیاز برای تأیید تراکنش‌ها افزایش می‌یابد.

متغیر مهم دیگر شناسایی شده توسط پژوهش هو و چن (۲۰۲۰)، سطح رقابت بین کاربران است. همین مسئله باعث شده تا حتی در دوره‌هایی که ترافیک شبکه وجود ندارد، کاربران برای کاهش ریسک تأیید نشدن و کاهش زمان انتظار تراکنش، کارمزد را به شکل غیرعادی بالاتر تعیین کنند. زمانی که رقابت زیادی برای فضای بلاک در بلاکچین بیت کوین وجود دارد، کاربران باید برای تأیید تراکنش‌های خود هزینه بیشتری بپردازند. باید اشاره کرد که در طول دوره‌های تقاضای بالا، کاربران از طریق پیشنهاد کارمزد بالاتر به استخراج کنندگان، برای فضای بلاک رقابت می‌کنند. طبق پژوهش صورت گرفته توسط ایزلی و همکاران (۲۰۱۹)، کارمزد تراکنش، نقشی مهم در پایداری شبکه دارد. از طرفی پاداش ثابت استخراج هر بلاک در تعیین سطح کارمزد در بلاکچین بیت کوین با اهمیت است. زیرا پاداش استخراج مقدار بیت کوینی است که استخراج کنندگان، برای افزودن یک بلاک جدید به بلاکچین دریافت می‌کنند. همان طور که پاداش استخراج در طول زمان کاهش می‌یابد، استخراج کنندگان برای کسب سود به طور فزاینده ای به کارمزد تراکنش متکی می‌شوند.

1. Li et al.

2. Easley, O'Hara & Basu

3. Lavi, Sattath & Zohar

4. Vallarano, Tessone & Squartini

5. Basu, Easley, O'Hara & Sirer

پیشینه تجربی

تحقیقات موجود بینش‌های ارزشمندی را در مورد عواملی که بر کارمزد تراکنش بیت‌کوین تأثیر می‌گذارند ارائه می‌دهد. با شروع شکل‌گیری سیستم‌های پرداخت اولیه با بیت‌کوین، لای و همکاران (۲۰۱۹) دو چالش عمده را تشخیص دادند که برای دوام طولانی‌مدت شبکه بلاکچین باید مورد توجه قرار گیرد. در راه اندازی اولیه، ماینرها پاداش بلاک و هزینه تراکنش را به‌عنوان پاداش برای تأیید بلاک‌های جدید دریافت می‌کردند. با این حال، پاداش‌های بلاک به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در طول زمان کاهش یابد. همان‌طور که این اتفاق می‌افتد، کارمزد تراکنش به تدریج به انگیزه اصلی اقدامات استخراج‌کنندگان تبدیل می‌شود. مسئله متغیر بودن هزینه کارمزد تراکنش در هر لحظه، باعث شد تا این پژوهش دو رویکرد مزایده‌های «پرداخت پیشنهادی»^۱ و حراج‌های «انحصاری»^۲ را برای اولویت‌بندی تراکنش‌ها منتظر تأیید پیشنهاد و بررسی کنند. در یک مزایده با قیمت پیشنهادی، ماینرها تراکنش‌هایی را که بالاترین قیمت را پیشنهاد می‌دهند، برای گنجاندن در یک بلاک انتخاب می‌کنند و هر تراکنش می‌بایست مبلغی را که پیشنهاد داده است، پرداخت کند. با این حال، این به تغییر در هزینه‌های پرداخت منجر شده است. این رویکرد، مطابق با رویکرد فعلی شبکه بیت‌کوین است. یک رویکرد حراج انحصاری جایگزین پیشنهاد شد، که در آن همه تراکنش‌های منتخب در یک بلاک، هزینه‌ای برابر با کمترین پیشنهاد پرداخت می‌کنند و ساختار کارمزد را ساده‌تر می‌کند. هر دو مدل شامل استخراج‌کنندگانی بودند که تراکنش‌ها را بر اساس پیشنهادها انتخاب می‌کردند، اما تمایز اصلی در نحوه تعیین کارمزدها است.

با گسترش استفاده از بیت‌کوین در بیش از یک دهه، داده‌های زنجیره‌ای بینش‌هایی را در مورد تعاملات دنیای واقعی در شبکه ارائه کردند. هو و چن^۳ (۲۰۲۰) 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 قابل توجه ظاهر شد. علی‌رغم توصیه‌های موجود، پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که اکثر کاربران برای تسریع در تأیید و کاهش ریسک، هزینه‌های غیرمنتظره بالایی را پیشگیرانه تعیین می‌کنند. ماینرها تراکنش‌های با پیشنهاد بالاتر را در اولویت قرار دادند و به‌طور بالقوه انتقال‌های کم ارزش را مسدود کردند. فعل و انفعالات غیر استاندارد نادر بود؛ اما گاهی اوقات به اشتباه اجرا می‌شد.

لزوم کارمزد تراکنش برای دوام طولانی‌مدت شبکه‌های بلاکچین به‌صورت ریاضی توسط ایزلی و همکاران (۲۰۱۹) 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^۴ (۲۰۲۱) روابط متقابل پویا بین کارمزدها، حجم تراکنش‌ها و بار شبکه را بررسی کردند. آن‌ها شواهدی پیدا کردند

1. Pay-Your-Bid Approach
2. Monopolistic Auction
3. Hou & Chen
4. Tsang & Yang

که نشان می‌دهد در طول دوره‌های شلوغی، هم هزینه‌ها و هم سطح فعالیت در شبکه بیت کوین به‌طور هم‌زمان افزایش می‌یابد.

هوی^۱ (۲۰۱۴) اقتصاد کارمزد تراکنش بیت کوین را از طریق یک مدل تعادل جزئی استاتیک ساده مورد مطالعه قرار می‌دهد. هدف آن تحلیل تأثیر اعمال هزینه تراکنش ثابت یا محدود کردن حداکثر اندازه بلاک است. استخراج یک رابطه کلاسیک ارائه می‌دهد: به‌صورت فردی، به‌عنوان مکانیزم سود برای استخراج‌کنندگان از طریق پاداش و کارمزد عمل می‌کند، اما از نظر اجتماعی، شبکه بیت کوین را ایمن می‌کند. این عدم توازن بین مزایای فردی و اجتماعی به این معنی است که رویکرد بازار آزاد برای کارمزد معاملات ناکارآمد خواهد بود. کارمزد تراکنش‌ها و محدودیت‌های اندازه بلاک به‌عنوان ابزارهای نظارتی عمل می‌کنند تا انگیزه‌های فردی را با مزایای اجتماعی هماهنگ کنند و امنیت پایدار را تضمین کنند. یافته‌های پژوهش همچنین نشان می‌دهد که امنیت بیت کوین یا مستلزم تحمیل کارمزد تراکنش به اندازه کافی از طریق پروتکل یا محدود کردن اندازه بلاک است، زیرا بازار آزاد نمی‌تواند انگیزه استخراج کافی را ایجاد کند. این کارمزد یا اندازه بلاک بهینه را مشخص می‌کند که کل مازاد را به حداکثر می‌رساند.

تسانگ و یانگ (۲۰۲۱) به‌منظور بررسی پویایی بازار معاملات بیت کوین، رابطه میان کارمزد تراکنش، حجم تراکنش و تراکم شبکه بررسی می‌کند. نویسندگان از تجزیه و تحلیل مدل خودرگرسیون برداری (VAR) برای مطالعه این رابطه استفاده می‌کنند و نتایج نشان می‌دهد که هزینه و حجم تراکنش‌ها در شبکه بیت کوین در زمان تراکم شبکه افزایش می‌یابد. پژوهشگران مدلی را پیشنهاد کرده که در آن کاربران و استخراج‌کنندگان به‌طور مشترک کارمزد و حجم تراکنش را با در نظر گرفتن ماهیت نوسان کارمزد در سیستم بیت کوین تعیین می‌کنند. پژوهش تأکید می‌کند که در حالی که کارمزدهای نوسان باعث عدم اطمینان کاربران می‌شود، هزینه استفاده از شبکه بیت کوین برای تراکنش‌ها همچنان کمتر از نرخ کارمزد تراکنش ثابت در سیستم‌های پرداخت معمولی است. با این حال، اثر ترافیک شبکه، ممکن است منجر به دست کم گرفتن هزینه تراکنش‌های کوچک شود که نتیجه آن عدم تأیید این تراکنش‌ها است.

روش‌شناسی پژوهش

تحلیل داده‌ها با استفاده از مدل خودرگرسیونی با وقفه‌های توزیعی^۲ انجام شده است. پیش شرط استفاده از روش حداقل مربعات معمولی^۳ این است که تمام متغیرها در سطح، پایا باشند (پسران، شین و اسمیت^۴، ۲۰۰۱). اما به ندرت این مورد پیش می‌آید. پسران و شین^۵ (۱۹۹۵) و پسران و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند با استفاده از رویکرد خودرگرسیونی با وقفه‌های توضیحی می‌توان رابطه هم‌جمعی را در مورد سری‌های مانا در سطح I(۰) و مانا با یک وقفه I(۱) مورد بررسی قرار داد.

2. Houy

2. Autoregressive Distributed Lag

3. Ordinary least squares

4. Pesaran, Shin & Smith

5. Pesaran & Shin

علت استفاده از این روش، اهمیت داشتن، تفسیر پذیر بودن ضرایب به عنوان بخشی از هدف پژوهش است. این درحالی است که در سایر روش های اقتصادسنجی مانند مدل خودرگرسیون برداری^۱، ضرایب تفسیرپذیر نیستند و از این مدل ها به منظور بررسی اثرات نوسانات متغیرهای مستقل و تأثیر آن بر نوسات متغیر وابسته استفاده می شود. از طرف دیگر رویکرد خودرگرسیونی با وقفه های توضیحی امکان بررسی روابط کوتاه مدت و بلندمدت بین متغیرها را فراهم می کند و ضرایبی را ارائه می دهد که به راحتی قابل تفسیر هستند.

هنگام استفاده از مدل خودرگرسیونی با وقفه های توزیعی برای مطالعه روابط بین عوامل مختلف بیت کوین در طول زمان، نیاز به پیش پردازش داده ها است تا تفاوت های ناشی از مقیاس بین عوامل، باعث اثرگذاری بر روی ضرایب نشود. با توجه به این که متغیرهای پژوهش دارای مقیاس و دامنه های متفاوت هستند، روش نرمال سازی مورد بررسی قرار گرفت. درباره مقایسه روش های نرمال سازی که به شکل متداول مورد استفاده شده است. بررسی ویژگی و ضعف روش ها به پژوهش های زیر مراجعه شده است (فردونبرگ^۲، ۲۰۰۳؛ جیکوب، اسمیت و گدارد^۳، ۲۰۰۴؛ ناردو و همکاران^۴، ۲۰۰۵؛ ابرت و ولش^۵، ۲۰۰۴، مرکز تحقیقات مشترک - کمیسیون اروپا^۶، ۲۰۰۸). همانند پژوهش های شانکر، هو و هانگ^۷ (۱۹۹۶)، نایاک و همکاران^۸ (۲۰۱۴)، گال و روبینفلد^۹ (۲۰۱۹) و کوماری و سوارنکار^{۱۰} (۲۰۲۰) در این روش داده ها با توجه به میانگین و انحراف معیار (روش z-score) استاندارد شده و داده های متغیرها تبدیل به مقیاسی با میانگین صفر و انحراف معیار یک تبدیل می شوند.

به منظور آزمون مانایی از تست دیکی - فولر^{۱۱} استفاده می شود. پس از آزمون و تعیین مانایی داده ها، نیاز است تا رابطه (۱) را تخمین زده تا وجود رابطه ی بین متغیرها مورد آزمون قرار گیرد.

$$\begin{aligned} \Delta TR_t = & \alpha_0 + \beta_1 TR_{t-1} + \beta_2 M_{t-1} + \beta_3 P_{t-1} + \beta_4 S_{t-1} + \beta_5 D_{t-1} + \beta_6 V_{t-1} \\ & + \sum_{i=1}^p \alpha_{1i} \Delta TR_{t-i} + \sum_{j=0}^q \alpha_{2j} \Delta M_{t-j} + \sum_{k=0}^m \alpha_{3k} \Delta P_{t-k} + \sum_{l=0}^n \alpha_{4l} \Delta S_{t-l} \\ & + \sum_{w=0}^s \alpha_{5w} \Delta D_{t-w} + \sum_{z=0}^r \alpha_{6z} \Delta V_{t-z} + \mu_t \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱)}$$

ضرایب مدل خودرگرسیونی با وقفه های توزیعی^{۱۲} مستقیماً روابط بین تغییرات در متغیرها را به جای اثرهای وقفه ها

1. Vector autoregression
2. Freudenberg
3. Jacobs et al.
4. Nardo et al.
5. Ebert & Welsch
6. Joint Research Centre-European Commission
7. Shanker, Hu & Hung
8. Nayak et al.
9. Gal & Rubinfeld
10. Kumari & Swarnkar
11. Augmented Dickey-Fuller test
12. ARDL

نشان می‌دهد. برآورد الگوی خودرگرسیون با وقفه‌های توضیحی، یک فرایند چند مرحله‌ای برای همه ترکیبات ممکن، براساس وقفه‌های متفاوت متغیرهای برآورد می‌شود. حداکثر تعداد وقفه‌ها، توسط پژوهشگر و بر اساس تعداد مشاهدات تعیین می‌گردد. برای یافتن وقفه بهینه از معیار آکائیک استفاده شده است.

بعد از مرحله برآورد، آزمون‌های برآورد ناهمسانی واریانس و خودهمبستگی انجام شده است تا برآورد الگو در سطح بهینه به اثبات برسد. برای بررسی ناهمسانی واریانس از آزمون وایت استفاده شده است (وایت^۱، ۱۹۸۰). در فرض صفر این آزمون نشان‌دهنده همسانی واریانس و وجود نداشتن دلایل کافی برای رد فرض صفر است (کافمن^۲، ۲۰۱۳). برای بررسی وجود خودهمبستگی سریالی از آزمون بروش-گادفری^۳ استفاده شده است (ادگرتون و شکور^۴، ۱۹۹۹). فرض صفر صفر آزمون مذکور برابر وجود نداشتن خودهمبستگی و فرض مخالف آن وجود خودهمبستگی است (گجراتی^۵، ۲۰۰۲). با استفاده از برآورد کننده وایت^۶ در صورت وجود ناهمسانی واریانس جملات خطا و با استفاده از برآورد کننده HAC می‌توان وجود خودهمبستگی و ناهمسانی واریانس در جملات خطا را در هنگام تخمین مدل خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی مورد ملاحظه قرار داد.

وجود رابطه هم‌جمعی^۷ بین متغیرها با استفاده از آزمون باند^۸ انجام می‌شود (پسران و همکاران^۹، ۲۰۰۲). معنادار بودن سطح اطمینان ضرایب متغیرهای دارای وقفه در مدل ARDL را بررسی می‌کند تا وجود یک رابطه هم‌انباشستگی بلندمدت بین آن‌ها را آزمون کند. اگر مقدار F بیش‌تر از حد بالا باشد، ثابت می‌شود که یک 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. این آزمون شامل دو فرض است. فرض H0 این است که تمامی ضرایب صفر باشند و فرض H1 این است که حداقل یکی از ضرایب مخالف صفر باشد. 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:

$$TR_t = \pi_0 + \pi_1 M_{t-1} + \pi_2 P_{t-1} + \pi_3 S_{t-1} + \pi_4 D_{t-1} + \pi_5 V_{t-1} + v_t \quad (\text{رابطه } ۲)$$

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، باقی‌مانده‌ها به‌عنوان مدل تصحیح خطا^{۱۰} مورد استفاده قرار خواهند گرفت. این مدل نشان‌دهنده این است که چگونه متغیرها پس از یک شوک به سرعت به تعادل بلندمدت باز می‌گردند. ECM باید دارای یک ضریب آماری با علامت منفی و مساوی یا کمتر از یک باشد. مدل

1. White
2. Kaufman
3. Breusch-Godfrey
4. Edgerton & Shukur
5. Gujarati
6. White
7. Cointegration
8. Bound
9. Pesaran et al
10. Error correcetion model (ECM)

تصحیح خطای رابطه ۱ به شرح رابطه ۳ فرموله شده است.

$$\Delta TR_t = \delta + \sum_{i=1}^p \delta_{1i} \Delta TR_{t-i} + \sum_{j=0}^q \delta_{2j} \Delta M_{t-j} + \sum_{k=0}^m \delta_{3k} \Delta P_{t-k} + \sum_{l=0}^n \delta_{4l} \Delta S_{t-l} \\ + \sum_{w=0}^s \delta_{5w} \Delta D_{t-w} + \sum_{z=0}^r \delta_{6z} \Delta V_{t-z} + \theta ECM_{t-1} + \varepsilon_t \quad \text{رابطه ۳}$$

در ادامه تعریف هریک از متغیرها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. متغیرهای پژوهش

متغیرهای پژوهش			
P	قیمت روزانه بیت کوین به دلار در روز	D	سختی شبکه در روز
V	متوسط ارزش تراکنش ها به بیت کوین در روز	S	متوسط اندازه بلاک ها به بایت در روز
TR	متوسط کارمزد تراکنش ها به بیت کوین در روز	M	حجم تراکنش های ارسال شده به شبکه به بایت در روز

متوسط روزانه کارمزد تراکنش به بیت کوین (TR): میانگین کارمزد پرداختی تراکنش هایی است که توسط

استخراج کنندگان انتخاب و تأیید شده اند و به واحد بیت کوین اندازه گیری می شوند.

سختی شبکه (D): معیاری است از دشواری یافتن یک بلاک جدید و به طور خودکار توسط شبکه در هر ۲۰۱۶ بلاک تنظیم مجدد می شود تا تقریباً هر ۱۰ دقیقه یک بلاک جدید استخراج شود. سختی با مقایسه مقدار سختی فعلی با میانگین قدرت هش شبکه اندازه گیری می شود.

قیمت روزانه بیت کوین به دلار (P): با محاسبه میانگین روزانه قیمت بیت کوین در صرافی های اصلی ارزهای دیجیتال که بیت کوین به طور فعال معامله می شود مانند کوین بیس^۱، بایننس^۲، کراکن^۳ و غیره اندازه گیری می شود. میانگین قیمت قیمت روزانه از داده های قیمت ساعتی جمع آوری شده و در هر دوره ۲۴ ساعته محاسبه می شود.

اندازه متوسط بلاک (S): نشان دهنده متوسط اندازه تمام بلاک های استخراج شده در آن روز است. داده های اندازه بلاک در کاوشگرهای بلاکچین موجود است و میانگین روزانه را می توان با جمع کردن اندازه تمام بلاک های استخراج شده در یک دوره ۲۴ ساعته و تقسیم بر تعداد کل بلاک ها محاسبه کرد.

میانگین ارزش تراکنش ها (V): با محاسبه تعداد کل بیت کوین های جابجا شده در تمام تراکنش های تأیید شده در یک روز و تقسیم آن بر تعداد تراکنش های تأیید شده بر حسب بیت کوین محاسبه می شود. داده های تراکنش از جمله مقدار معامله در بلاکچین بیت کوین ثبت می شود.

1. Coinbase
2. Binance
3. Kraken

حجم تراکنش‌های ارسال شده (M): به ممپول^۱ بر حسب بایت در روز اندازه‌گیری می‌شود. ممپول جایی است که تراکنش‌های تأیید نشده که هنوز در یک بلاک قرار نگرفتند، در آن قرار دارند. جمع کردن این داده‌های روزانه حجم کلی تراکنش ارسال شده به شبکه ممپول را فراهم می‌کند.

یافته‌های پژوهش

روش (ARDL) مستلزم آن است که کلیه متغیرها حداکثر مانا مرتبه اول (I(1) باشند (بزنیت و پابلو رومرو^۲، ۲۰۱۶). طبق نتایج چهار متغیر حجم تراکنش‌های ارسال شده به بایت در روز (M)، قیمت بیت کوین به دلار در روز (P)، سختی شبکه (D) و متوسط اندازه بلاک‌ها به بایت (S) برای دو دوره دوم و سوم و برای دوره اول، سه متغیر حجم تراکنش‌های ارسال شده به بایت در روز (M)، قیمت بیت کوین به دلار در روز (P) و متوسط اندازه بلاک‌ها به بایت (S) در سطح پایا نیستند؛ بنابراین پایایی متغیرها را در حالت تفاضل بررسی می‌کنیم. نتایج حاصل از آزمون دیکی فولر تعمیم یافته (ADF) برای تفاضل مرتبه اول متغیرها نشان می‌دهد که هر چهار متغیر حجم تراکنش‌های ارسال شده به بایت در روز (M)، قیمت بیت کوین به دلار در روز (P)، سختی شبکه (D) و متوسط اندازه بلاک‌ها به بایت (S) برای دو دوره دوم و سوم و برای دوره اول هر سه متغیر حجم تراکنش‌های ارسال شده به بایت در روز (M)، قیمت بیت کوین به دلار در روز (P) و متوسط اندازه بلاک‌ها به بایت (S) با یک بار تفاضل‌گیری پایا می‌شوند؛ بنابراین مانای مرتبه اول هستند.

با توجه به تعداد بالای مشاهدات، معیار اطلاعاتی آکائیک، برای دوره اول (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴) مدل (۸،۰،۰،۰،۰) و برای دوره دوم (۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸) مدل (۳،۲،۰،۳،۰،۰) و برای دوره سوم (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳) مدل (۱۰،۱۰،۱،۱۰،۰،۱) را به عنوان بهترین مدل برآوردی انتخاب می‌کند. بعد از مرحله برآورد به بررسی فروض کلاسیک رگرسیون پرداخته شد.

فروض کلاسیک

به منظور بررسی خود هم‌بستگی از آزمون هم‌بستگی سریالی استفاده شد که نتایج برای هر سه دوره، نشان‌دهنده پذیرش فرض صفر و عدم وجود خود هم‌بستگی است. برای بررسی ناهمسانی واریانس، از آزمون وایت استفاده شد که نتایج حاصل برای مدل دوره اول، پذیرش فرض صفر و نبود همسانی واریانس و برای دوره‌های دوم و سوم، رد فرض صفر و وجود همسانی واریانس در جملات خطا است. به همین منظور در هنگام برآورد مدل در دوره‌های دوم و سوم، از برآوردکننده وایت (White) استفاده شد تا ناهمسانی واریانس در جملات خطا را هنگام تخمین مدل مورد ملاحظه قرار دهد.

1. Mempool

2. Bouznit & Pablo-Romero

نتایج اثرهای کوتاه مدت الگو

جدول ۲. برآورد اثرهای کوتاه مدل برای دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴

متغیرها	ضرایب	آماره t	احتمال
TR-(۱)	۰/۴۶۶۰۳۸	۳/۴۶۲۲۷۹	۰/۰۰۰۵
TR-(۲)	-۰/۱۴۴۱۹۴	-۱/۴۷۱۵۲۹	۰/۱۴۱۳
TR-(۳)	۰/۰۸۰۴۸۹	۱/۶۴۰۶۳۱	۰/۱۰۱۱
TR-(۴)	۰/۰۰۷۲۸۴	۰/۲۴۳۴۹۶	۰/۸۰۷۶
TR-(۵)	۰/۰۱۶۲۸۹	۰/۷۸۶۵۱۸	۰/۴۳۱۷
TR-(۶)	۰/۰۱۹۱۴۶	۱/۰۴۶۲۰۷	۰/۲۹۵۶
TR-(۷)	۰/۰۱۸۰۶۷	۰/۸۰۳۹۳۷	۰/۴۲۱۵
TR-(۸)	۰/۰۵۰۴۲۰	۱/۹۷۰۶۲۲	۰/۰۴۸۹
M	۰/۳۴۳۶۷۱	۱/۰۴۶۳۹۸	۰/۲۹۵۵
P	-۵/۵۷۷۸۹۱	-۴/۶۵۳۱۵۱	۰/۰۰۰۰
S	-۰/۲۶۲۶۷۰	-۰/۹۰۱۲۹۴	۰/۳۶۷۶
V	۰/۰۱۰۷۱۳	۱/۱۸۶۲۱۱	۰/۲۳۵۷
C	-۳/۰۴۴۰۰۲	-۴/۸۹۹۷۲۹	۰/۰۰۰۰
$R^2 = ۰/۱۹۸۴۱۱$	DW-statistic = ۲/۰۰۲۶۶۹	$R^2 = ۰/۲۰۳۸۳۷$	

جدول ۳. برآورد اثرهای کوتاه مدل برای دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸

متغیرها	ضرایب	آماره t	احتمال
TR-(۱)	۰/۲۶۶۵۵۴	۲/۲۰۴۱۴۲	۰/۰۲۷۸
TR-(۲)	۰/۱۱۱۸۲۱	۱/۷۴۱۸۷۵	۰/۰۸۱۹
TR-(۳)	۰/۰۷۶۰۲۲	۱/۸۷۱۴۰۵	۰/۰۶۱۷
M	-۰/۰۴۲۲۹۰	-۲/۴۰۹۳۶۸	۰/۰۱۶۲
M-(۱)	۰/۰۰۲۱۱۳	۰/۱۰۸۰۱۳	۰/۹۱۴۰
M-(۲)	۰/۰۳۸۳۱۱	۱/۶۲۳۰۲۸	۰/۱۰۵۰
P	۰/۰۳۳۷۴۶	۰/۶۹۰۸۹۰	۰/۴۸۹۸
S	۰/۰۶۰۵۶۵	۲/۵۷۵۵۱۴	۰/۰۱۰۲
S-(۱)	۰/۰۰۹۸۱۹	۰/۵۷۰۹۷۲	۰/۵۶۸۲
S-(۲)	-۰/۰۲۱۹۱۱	-۱/۴۰۹۵۵۸	۰/۱۵۹۱
S-(۳)	-۰/۰۲۷۷۹۰	-۱/۵۸۱۵۱۸	۰/۱۱۴۲
D	-۰/۱۰۴۴۲۵	-۱/۱۳۴۲۴۴	۰/۲۵۷۰
V	۰/۰۰۰۶۴۹	۱/۵۱۳۸۱۷	۰/۱۳۰۵
C	-۰/۱۴۴۶۳۳	-۳/۴۹۸۲۵۶	۰/۰۰۰۵
$R^2 = ۰/۱۹۶۰۸۵$	DW-statistic = ۱/۹۹۷۷۸۵	$R^2 = ۰/۲۰۹۴۱۵$	

جدول ۴. برآورد اثرهای کوتاه مدل برای دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳

متغیرها	ضرایب	آماره t	احتمال
TR(-1)	۱/۰۰۳۳۶۹	۴۳/۹۲۸۶۰	۰/۰۰۰۰
TR(-2)	۰/۲۴۸۹۴۴	-۷/۷۴۳۴۸۴	۰/۰۰۰۰
TR(-3)	۰/۲۱۵۰۴۶	۶/۶۵۶۴۴۳	۰/۰۰۰۰
TR(-4)	-۰/۰۷۴۴۹۴	-۲/۳۲۰۸۸۹	۰/۰۲۰۴
TR(-5)	-۰/۰۱۸۱۲۸	-۰/۵۶۴۸۵۵	۰/۵۷۳۲
TR(-6)	۰/۰۹۰۱۹۵	۲/۸۱۴۳۷۶	۰/۰۰۴۹
TR(-7)	۰/۱۳۰۱۶۱	۴/۰۴۷۸۵۸	۰/۰۰۰۱
TR(-8)	-۰/۱۹۸۱۶۶	-۶/۱۷۷۸۰۴	۰/۰۰۰۰
TR(-9)	-۰/۰۱۴۸۵۳	-۰/۴۶۶۶۱۲	۰/۶۴۰۸
TR(-10)	۰/۰۵۵۹۲۰	۲/۴۸۲۴۳۱	۰/۰۱۳۱
M	-۰/۰۳۸۰۲۴	-۸/۹۳۵۹۶۸	۰/۰۰۰۰
M(-1)	۰/۰۱۸۶۳۰	۴/۰۰۵۳۲۶	۰/۰۰۰۱
M(-2)	۰/۰۰۹۵۳۰	۲/۰۶۶۷۸۳	۰/۰۳۸۹
M(-3)	-۰/۰۰۹۱۳۴	-۱/۹۷۳۶۴۳	۰/۰۴۸۶
M(-4)	۰/۰۰۵۶۳۷	۱/۳۰۹۴۰۹	۰/۱۹۰۶
M(-5)	-۰/۰۱۳۷۶۴	-۳/۲۵۶۰۸۳	۰/۰۰۱۱
M(-6)	۰/۰۲۴۴۵۶	۵/۷۱۷۱۳۹	۰/۰۰۰۰
M(-7)	۰/۰۳۶۲۱۱	۷/۵۸۲۴۰۳	۰/۰۰۰۰
M(-8)	-۰/۰۰۹۸۷۹	-۲/۰۳۴۰۲۴	۰/۰۴۲۱
M(-9)	-۰/۰۰۸۵۵۲	-۱/۷۸۰۱۵۸	۰/۰۷۵۲
M(-10)	-۰/۰۱۱۵۵۳	-۲/۶۶۴۹۹۵	۰/۰۰۷۸
P	۰/۰۳۱۵۷۸	۲/۶۰۱۲۷۴	۰/۰۰۹۴
P(-1)	-۰/۰۳۰۸۶۹	-۲/۵۳۵۰۱۳	۰/۰۱۱۳
S	۰/۰۱۸۸۷۲	۵/۰۹۹۷۱۱	۰/۰۰۰۰
S(-1)	-۰/۰۱۳۳۹۶	-۳/۶۰۰۷۶۰	۰/۰۰۰۳
D	-۰/۰۰۳۷۲۵	-۲/۵۳۲۳۳۷	۰/۰۱۱۴
V	۰/۰۰۴۶۹۴	۲/۷۶۵۷۸۶	۰/۰۰۵۷
V(-1)	-۰/۰۰۴۱۷۴	-۲/۴۸۱۵۸۰	۰/۰۱۳۲
C	-۰/۰۱۸۹۶۷	-۴/۹۴۱۰۴۰	۰/۰۰۰۰
$R^2 = ۰/۹۰۰۲۷۴$	$R^2 = ۰/۸۹۸۸۰۷$	$DW-statistic = ۲/۰۰۹۷۳$	

مدل های ARDL برآورد شده برای سه دوره متمایز به ضریب تعیین (R^2) متفاوتی منجر شدند. به طور خاص، ضریب تعیین مدل های مربوط به دوره پذیرش اولیه ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ و دوره سوداگرانه ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ حدود ۲۰ درصد است. در مقابل، ضریب تعیین مدل دوره چالش مقیاس پذیری ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ حدود ۹۰ درصد است. نتایج ارائه شده در جدول های ۲، ۳ و ۴ نشان می دهد که عوامل مالی و فنی، رفتار کارمزد تراکش در دوره های مختلف را به میزان متفاوتی توضیح می دهد. مقادیر ضریب تعیین کمتر در دوره های اول و دوم، می تواند به این دلیل باشد که بیت کوین در مراحل

اولیه توسعه، با موارد استفاده آزمایشی بیشتر همراه بود و در نتیجه تغییرات کارمزد به طور کامل به محرک‌های مالی و فنی مرتبط نبود. توجه به میزان تغییرات ضریب تعیین، نشان می‌دهد که رفتار کارمزد تراکنش بیت‌کوین را نمی‌توان در طول تکامل آن ثابت فرض کرد. بنابراین برای درک عوامل مؤثر بر کارمزد، ضروری است که تجزیه و تحلیل در دوره‌های جداگانه عمر بیت‌کوین صورت پذیرد.

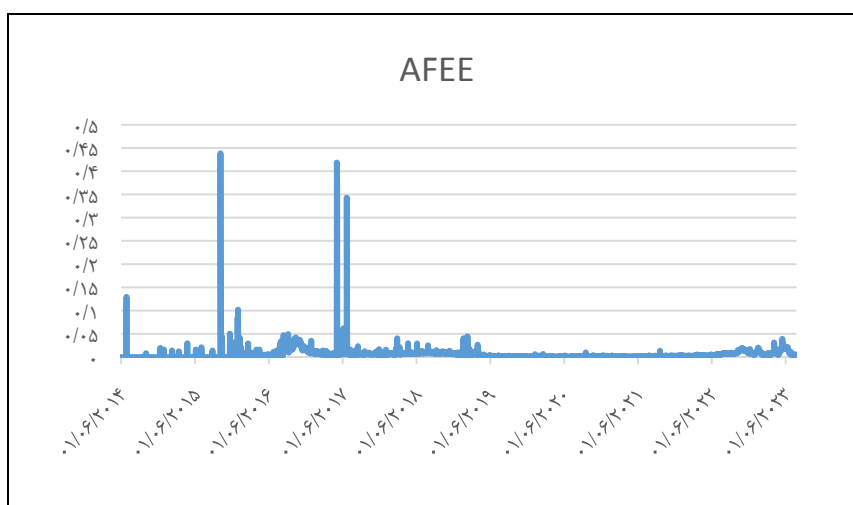
در دوره چالش مقیاس‌پذیری، کلیه فرضیه‌های مربوط به بازه کوتاه‌مدت (۱-۱، ۱-۲، ۱-۳، ۱-۴، ۱-۵، ۱-۶) پذیرفته می‌شود. انتخاب وقفه‌ها توسط معیار آکائیک در مشخصات مدل ARDL نشان می‌دهد که دو متغیر کارمزد تراکنش و حجم تراکنش ارسالی اثرهای وقفه‌ای روی متغیر وابسته دارند که برای دوره‌های زمانی متعدد باقی می‌مانند. 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 دارد و سایر متغیرها به اندازه کارمزد تراکنش روز قبل اثرگذار نیستند. 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 معناست که کارمزدها در دوره قبل، اغلب انتظارات و محدوده پایه را تعیین می‌کنند که کارمزدها در آینده نزدیک در آینده باقی می‌مانند. اندازه بلاک از متغیرهای دیگری است که می‌تواند به شدت بر کارمزد تراکنش اثر گذار باشد. استخراج بلاک بزرگ‌تر ریسک استخراج‌کننده را افزایش می‌دهد؛ زیرا احتمال دارد در همان زمان یک استخراج‌کننده دیگر بلاک را کشف و به زنجیره بلوکی متصل کند و بلاک وی نامعتبر شود. سختی شبکه، عامل بعدی تأثیرگذار روی کارمزد تراکنش است، از آنجا که فرایند استخراج نوعی فرایند رقابتی است، افزایش سختی شبکه به معنای رقابت بیشتر است و در نتیجه این افزایش رقابت به کاهش کارمزد مورد قبول از سوی استخراج‌کنندگان منجر 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 ۲ وقفه 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 بالاتری تعیین می‌کنند.

مدل ARDL (۸,۰,۰,۰,۰) به عنوان بهترین تناسب برای دوره پذیرش اولیه ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ بر اساس معیار اطلاعات آکائیک (AIC) انتخاب شد. بر اساس نتایج پژوهش، دو متغیر قیمت و وقفه کارمزد تراکنش ارسالی دارای p-value کمتر از ۵ درصد هستند. بنابراین بایستی نتایج مدل با احتیاط تفسیر کرده و فقدان نهایی قطعیت آماری را تصدیق کرد. در نتیجه، فرضیه‌های مربوط به دوره کوتاه‌مدت (۱-۱، ۱-۳، ۱-۶) پذیرفته می‌شود. بیشترین ضریب مربوط به متغیر قیمت بیت‌کوین است که برابر با ۵/۵۷- است.

متغیر کارمزد تراکنش به عنوان متغیر وابسته تا ۸ وقفه بر روی کارمزد تراکنش اثرگذار است که نشان می‌دهد کارمزد تراکنش یک الگوی تعدیل کوتاه‌مدت پیچیده را دارد. ضریب اثرگذاری وقفه اول کارمزد تراکنش ۰/۴۶ است که از این حیث دومین متغیر با بیشترین میزان اثرگذاری بر روی کارمزد تراکنش است. در دوره چالش مقیاس، کارمزد تراکنش

روز قبل در مقایسه با سایر متغیرها بیشترین ضریب تأثیر را بر روی کارمزد تراکنش دارا است و به نوعی چسبندگی کارمزد ایجاد کرده است، اما در دوره پذیرش اولیه، کارمزد تراکنش به شدت تحت تأثیر قیمت بیت کوین است. دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ دوره مهمی برای بیت کوین بود که با افزایش رفتار سوداگرانه و افزایش تراکنش ارسالی به شبکه و پذیرش بیت کوین به عنوان یک ارز مبادله یا دارایی قابل سرمایه گذاری روبرو شد. مدل $ARDL(3, 2, 0, 3, 0, 0)$ مدل انتخابی معیار آکائیک برای این دوره است. نتایج نشان می دهد که هیچ متغیری به شکل قابل توجهی ضریب تأثیر گذار بالاتری نسبت به سایر متغیرها در این دوره ندارد. یک توضیح می تواند تغییرات شدید همه متغیرهای شبکه از جمله متغیر وابسته کارمزد تراکنش باشد. در این دوره، سه فرضیه بازه کوتاه مدت $(1-2, 1-5, 1-6)$ پذیرفته شد. ضریب متغیر حجم تراکنش های ارسال شده به شبکه، منفی است که نشان می دهد حجم تراکنش های بالاتر با کارمزد تراکنش های کمتر همراه بوده است. کارمزد تراکنش یک الگوی تعدیل کوتاه مدت پیچیده را نشان می دهد، که ارزش فعلی آن تحت تأثیر تأخیرهای خود تا ۳ دوره است. وقفه اول کارمزد تراکنش (کارمزد تراکنش روز گذشته) در مقایسه با دو دوره پذیرش اولیه (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴) و دوره چالش مقیاس پذیری (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳) کمترین تأثیر را روی کارمزد تراکنش دارد که نشان دهنده سرعت تعدیل نسبتاً آهسته کارمزد تراکنش در کوتاه مدت نسبت به دو دوره دیگر است. این می تواند به دلیل ماهیت بی ثبات بازار بیت کوین در دوران سوداگرانه باشد.

نکته حائز اهمیت می تواند جنبه «یادگیری سیستم» باشد؛ به این معنا که چگونه همه عناصر به هم پیوسته شبکه بلاکچین بیت کوین یعنی کاربران و استخراج کنندگان، چگونه ساختار مشوق ها و ظرفیت شبکه را از طریق تجربه به تدریج بهتر درک می کنند، در نتیجه می توانند تحت محدودیت فضای روی زنجیره، بهینه تر عمل کنند. این یادگیری جمعی باعث می شود که کارمزد ها حتی با تغییر دوره ای در سایر شرایط، به سمت تعادلی برای رفع نیازهای کاربران و تامین امنیت غیرمتمرکز، حرکت کنند. روند کارمزد تراکنش بیت کوین طی دوره های سوداگرانه و چالش مقیاس پذیری در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. کارمزد تراکنش بیت کوین در دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳

برآورد ضرایب بلندمدت

قبل از آنکه ضرایب بلندمدت مدل را با استفاده از روش خودرگرسیون با وقفه‌های توضیحی برآورد کنیم، لازم است آزمون هم‌جمعی انجام شود 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 نشان داد F محاسبه شده آزمون هم‌جمعی برای هر سه مدل، بزرگ‌تر از کمیت بحرانی است و در نتیجه، فرض صفر مبتنی بر نبود رابطه بلندمدت رد می‌شود؛ یعنی متغیرهای مدل‌های مذکور رابطه بلندمدت دارد که برآورد مدل‌ها در جدول ۵ ارائه می‌شود.

جدول ۵. نتایج آزمون برآورد رابطه بلندمدت برای دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴

متغیر	ضریب	انحراف معیار	آماره t	p-value
M	۰/۷۰۶۴۷۱	۰/۶۲۶۳۰۶	۱/۱۲۷۹۹۶	۰/۲۵۹۵
P	-۱۱/۴۶۶۲۶	۱/۲۶۰۳۹۲	-۹/۰۹۷۳۷۶	۰/۰۰۰۰
S	-۰/۵۳۹۹۶۰	۰/۵۶۲۹۶۷	-۰/۹۵۹۱۳۲	۰/۳۳۷۶
V	۰/۰۲۲۰۲۲	۰/۰۱۸۳۱۶	۱/۲۰۲۳۴۴	۰/۲۲۹۴
C	-۶/۲۵۷۴۳۹	۰/۵۵۲۴۹۰	-۱۱/۳۲۵۸۹	۰/۰۰۰۰

جدول ۶. نتایج آزمون برآورد رابطه بلندمدت برای دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸

متغیر	ضریب	انحراف معیار	آماره t	p-value
M	-۰/۰۰۳۴۲۱	۰/۰۲۳۵۶۳	-۰/۱۴۵۱۶۹	۰/۸۸۴۶
P	۰/۰۶۱۸۵۰	۰/۰۶۱۵۰۹	۱/۰۰۵۵۴۵	۰/۳۱۵۰
S	۰/۰۳۷۹۰۹	۰/۰۲۶۷۱۳	۱/۴۱۹۱۲۰	۰/۱۵۶۳
D	-۰/۱۹۱۳۹۳	۰/۰۸۹۹۸۹	-۲/۱۲۶۸۴۸	۰/۰۳۳۷
V	۰/۰۰۱۱۸۹	۰/۰۰۲۴۶۱	۰/۴۸۳۰۲۰	۰/۶۲۹۲
C	-۰/۲۶۵۰۸۸	۰۲۲۶۹۰	-۱۱/۶۸۳۲۷	۰/۰۰۰۰

جدول ۷. نتایج آزمون برآورد رابطه بلندمدت برای دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳

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

طبق جدول ۵ تجزیه و تحلیل ضرایب نشان می‌دهد که در طول دوره پذیرش اولیه (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴)، عوامل تعیین‌کننده بلندمدت کارمزد معاملات بسیار پیش‌بینی‌ناپذیر و متغیر بودند. در این دوره قیمت بیت‌کوین دارای ضریب منفی بزرگی است که نشان می‌دهد قیمت‌های بالاتر با کارمزد تراکنش‌های کمتر در این مرحله شکل‌گیری همراه است. این رابطه مخالف را می‌توان به ماهیت تجربی استفاده از بیت‌کوین در سال‌های اولیه نسبت داد، جایی که کارمزدها عمدتاً ناشی از سفته‌بازی یا پویایی بازار نبودند، بلکه به شکل تصادفی و بر اساس حدس و گمان تعیین می‌شدند. در نتیجه فقط فرضیه ۲-۲ پذیرفته می‌شود.

نتایج ارائه شده در جدول ۶ نشان می‌دهد که در دوره سوداگرانه (۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸) شاهد تغییر در پویایی بلندمدت عوامل مؤثر بر کارمزد معاملات بود. متغیر سختی شبکه ضریب منفی دارد؛ بدین معنا که افزایش رقابت ماینرها، حداقل کارمزدهای قابل قبول را کاهش داد. افزایش قدرت هش، قدرت چانه‌زنی ماینرها را کاهش داد که کدام تراکنش‌ها را با چه کارمزدی انتخاب کنند. در نتیجه فقط فرضیه ۲-۳ پذیرفته می‌شود.

طبق جدول ۷، تجزیه و تحلیل ضرایب نشان می‌دهد که در طول دوره چالش مقیاس‌پذیری (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳)، عوامل تعیین‌کننده بلندمدت کارمزد تراکنش‌ها دستخوش تغییرات بیشتری شدند. اندازه بلاک و سختی شبکه، به عنوان عوامل مهمی که در بلندمدت بر کارمزدها تأثیر می‌گذارند، ظاهر شدند. سختی شبکه تأثیر بلندمدت مثبتی بر کارمزدها داشت. سختی شبکه بیشتر به معنای مصرف انرژی بالاتر خواهد بود و در نتیجه استخراج‌کننده، انتظار بیشتری برای کسب درآمد به منظور جبران سرمایه‌گذاری خود دارد؛ اما از طرفی رفتار استخراج‌کنندگان نوعی رقابت را در میان استخراج‌کنندگان شکل می‌دهد که باعث می‌شود کارمزد تراکنش کاهش یابد. متغیر دیگر یعنی اندازه بلاک‌ها، طرف عرضه و توانایی شبکه را در پردازش تراکنش‌ها نشان می‌دهد. از آنجا که هرچه اندازه بلاک استخراجی بزرگ‌تر شود، احتمال کشف هم‌زمان بلاک و اتصال آن به زنجیره اصلی توسط استخراج‌کننده دیگر، افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، اندازه بلاک در شبکه بیت‌کوین، در زمانی که شبکه با افزایش بار شدیدی روبه‌رو شود، افزایش می‌یابد و از آنجا که در شبکه بیت‌کوین تعداد بلاک استخراجی در هر روز محدود است، در بلندمدت افزایش اندازه بلاک اثر معناداری بر کارمزد تراکنش دارد. در نتیجه فرضیه‌های ۲-۳ و ۲-۴ پذیرفته می‌شود.

عبارت تصحیح خطا (ECT_{t-1}) نشان‌دهنده سرعت بازگشت عدم تعادل یا انحراف از رابطه تعادل بلندمدت در دوره کوتاه‌مدت است. عدد آن اندازه و جهت این عدم تعادل را نشان می‌دهد. ضریب منفی و معنادار آماری در عبارت تصحیح خطا نشان می‌دهد که انحراف از تعادل بلندمدت، در طول زمان خود تصحیح می‌شوند و سیستم به حالت تعادل بازمی‌گردد (بانرجی و همکاران^۱، ۱۹۹۰؛ رینسل^۲، ۱۹۹۳).

در دوره سوداگرانه (۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸)، ضریب تصحیح خطا ECT معنادار و منفی با مقدار ۵۴ درصد بود. در طول دوره پذیرش زودهنگام (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴)، ضریب تصحیح خطا ECT معنادار و منفی با مقدار ۴۸/۶ درصد بود و در طول دوره چالش مقیاس‌پذیری (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳)، ضریب تصحیح خطا ECT از نظر آماری معنادار و منفی با مقدار ۵/۹

1. Banerjee et al.

2. Reinsel

درصد بود که نشان‌دهنده نرخ تعدیل بسیار سریع‌تر دو دوره ابتدایی در مقایسه با دوره چالش‌های مقیاس است. مقادیر ضریب تصحیح خطا ECT در سه دوره نشان می‌دهد که سرعت تعدیل به سمت تعادل بلندمدت در طول زمان تکامل یافته است. نرخ‌های تصحیح سریع‌تر مشاهده‌شده در دوره‌های پذیرش اولیه و دوره سوداگرانه را می‌توان به مقیاس نسبتاً کوچک‌تر فعالیت شبکه بیت‌کوین و نوسان‌های بیشتر شبکه بیت‌کوین در آن زمان‌ها نسبت داد. هرچه که شبکه بالغ شد و با چالش‌های مقیاس‌پذیری مواجه شد، فرایند تعدیل تدریجی‌تر شد.

جدول ۸. بخشی از رگرسیون عبارت تصحیح خطا برای سه دوره چرخه عمر

مقدار احتمال	ضریب	۲۰۰۹-۲۰۱۴
۰/۰۰۰۰	-۰/۴۸۶۴۶۱	CoinEq (۱-)
مقدار احتمال	ضریب	۲۰۱۴-۲۰۱۸
۰/۰۰۰۰	-۰/۵۴۵۶۰۳	CoinEq (۱-)
مقدار احتمال	ضریب	۲۰۱۸-۲۰۲۳
۰/۰۰۰۰	-۰/۰۵۹۸۹۵	CoinEq (۱-)

بحث و نتیجه‌گیری

امروزه بیت‌کوین بالاترین ارزش بازار را در میان ارزهای مجازی دارد و توجه سرمایه‌گذاران و استخراج‌کنندگان را به خود جلب کرده است. استفاده‌کنندگان شبکه و استخراج‌کنندگان بلاک‌ها، در مسئله کارمزد تراکنش‌ها تضاد منافع بالقوه‌ای دارند. 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 به‌منظور قرار دادن و پردازش تراکنش‌ها در بلاک اکتشافی آن‌ها، توسط کاربران پرداخت می‌شود. در نتیجه، در آینده نزدیک، کارمزد تراکنش تنها منبع درآمد استخراج‌کنندگان خواهد بود.

اساس ایجاد شبکه بلاکچین بیت‌کوین، ایجاد یک سیستم پرداخت غیرمتمرکز است. در نتیجه تمرکز اصلی آن باید بر رضایت استفاده‌کنندگان شبکه نسبت به رقبا متمرکز باشد. بنابراین باید بتواند تراکنش‌ها را با کارمزد منطقی و بدون نوسان‌های 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، در پایداری و عدم فروپاشی شبکه بیت‌کوین نقش اصلی دارد. بنابراین، 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 در سه دوره نشان می‌دهد.

سه دوره مورد بررسی، شامل دوره پذیرش اولیه از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴، دوره سوداگران از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ و دوره چالش مقیاس پذیری ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ است. در دوره پذیرش اولیه، کارمزدها نوسان‌های زیادی داشتند و به شدت تحت تأثیر قیمت بیت کوین قرار گرفتند که منعکس کننده ماهیت سفته‌بازی و نامطمئن استفاده در مرحله ابتدایی شکل‌گیری است. با این حال، همان طور که بیت کوین در طول دوره سوداگران محبوبیت پیدا کرد، با افزایش قیمت بیت کوین رفتار کارمزد پیچیده‌تر شد و به جز سختی شبکه، متغیرهای دیگر، اثری بر کارمزد تراکنش در بلندمدت نداشتند. همچنین در دوره سوداگران کارمزد روز قبل، حجم تراکنش‌های ارسالی و اندازه بلاک در کوتاه‌مدت به لحاظ آماری معنادار بودند.

با ورود به عصر چالش مقیاس‌پذیری، عوامل فنی شبکه، مانند اندازه بلاک و سختی به عنوان عوامل تعیین‌کننده کارمزد بلندمدت ظاهر شدند و محدودیت‌هایی را در ظرفیت نشان دادند. در کوتاه‌مدت، شایان توجه‌ترین عامل در تعدیل کارمزد تراکنش، کارمزد روز قبل بود و چسبندگی‌ای را ایجاد کرد که تا پایان دوره ادامه داشت. به صورت کلی، مدل‌های در حال تحول نشان می‌دهند که هزینه‌ها در دوره‌های متوالی، از طریق فرایند تطبیقی یادگیری شبکه به بلوغ رسیده‌اند؛ زیرا رفتار کاربران و استخراج‌کنندگان پیرامون محدودیت‌های بلاک و انگیزه‌های پاداش استخراج، بهینه شده‌اند. تجزیه و تحلیل ضرایب تصحیح خطا نشان داد که سرعت بازگشت به روابط تعادلی بلندمدت نیز در مراحل مختلف تغییر کرده است. نوسان‌های قبلی با سرعت بیشتری اصلاح می‌شد، در حالی که تعدیل‌های کندتر دوره اخیر، نشان‌دهنده بلوغ بیت کوین است.

استخراج‌کنندگان با در نظر داشتن پایداری کارمزد در کوتاه‌مدت، می‌توانند بر اساس قیمت انرژی و سایر هزینه‌ها، در خصوص استخراج در کوتاه‌مدت تصمیم‌گیری کنند. 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 بالای 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

- Banerjee, A., Galbraith, J. W. & Dolado, J. (1990). Dynamic Specification and Linear Transformations of the Autoregressive-Distributed Lag Model. *Oxford Bulletin of Economics & Statistics*, 52(1).
- Basu, S., Easley, D., O'Hara, M. & Siler, E. G. (2023). Stablefees: A predictable fee market for cryptocurrencies. *Management Science*, 69(11), 6508-6524.

- Bhaskar, N. D. & Chuen, D. L. K. (2015). Bitcoin mining technology. In *Handbook of digital currency* (pp. 45-65). Academic Press.
- Bouznit, M. & Pablo-Romero, M. D. P. (2016). CO2 emission and economic growth in Algeria. *Energy policy*, 96, 93-104.
- Bowden, R., Keeler, H. P., Krzesinski, A. E. & Taylor, P. G. (2018). Block arrivals in the bitcoin blockchain. *arXiv preprint arXiv:07447/1801*.
- Cusumano, M. A. (2014). The bitcoin ecosystem. *Communications of the ACM*, 57(10), 22-24.
- 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.
- Ebert, U. & Welsch, H. (2004). Meaningful environmental indices: a social choice approach. *Journal of Environmental Economics and Management*, 47(2), 270-283.
- Edgerton, D. & Shukur, G. (1999). Testing autocorrelation in a system perspective testing autocorrelation. *Econometric Reviews*, 18(4), 343-386.
- Engle, R. F. & Granger, C. W. (1987). Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, 251-276.
- Franco, P. (2014). *Understanding Bitcoin: Cryptography, engineering and economics*. John Wiley & Sons.
- Freudenberg, M. (2003). Composite indicators of country performance: a critical assessment.
- Gal, M. S. & Rubinfeld, D. L. (2019). Data standardization. *NYUL Rev.*, 94, 737.
- Gervais, A., Karame, G. O., Wüst, K., Glykantzis, V., Ritzdorf, H. & Capkun, S. (2016, October). On the security and performance of proof of work blockchains. In *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC conference on computer and communications security* (pp. 3-16).
- Ghimire, S. & Selvaraj, H. (2018, December). A survey on bitcoin cryptocurrency and its mining. In *2018 26th International Conference on Systems Engineering (ICSEng)* (pp. 1-6). IEEE.
- Göbel, J. & Krzesinski, A. E. (2017, November). Increased block size and Bitcoin blockchain dynamics. In *2017 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Grinberg, R. (2012). Bitcoin: An innovative alternative digital currency. *Hastings Sci. & Tech. LJ*, 4, 159.
- Gujarati, D. N. (2002). *Basic Econometrics*, (4th ed).
- 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.
- Houy, N. (2014). The economics of Bitcoin transaction fees. *GATE WP*, 1407.
- Jacobs, R., Smith, P. & Goddard, M. (2004). *Measuring performance: an examination of composite performance indicators*.

- Jiang, S. & Wu, J. (2019, July). Bitcoin mining with transaction fees: a game on the block size. In *2019 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain)* (pp. 107-115). IEEE.
- Joint Research Centre-European Commission. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. OECD publishing.
- Kasahara, S. & Kawahara, J. (2016). Effect of Bitcoin fee on transaction-confirmation process. *arXiv preprint arXiv:00103/1604*.
- Kaufman, R. L. (2013). *Heteroskedasticity in regression: Detection and correction*. Sage Publications.
- Kaushal, P. K., Bagga, A. & Sobti, R. (2017, July). Evolution of bitcoin and security risk in bitcoin wallets. In *2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix)* (pp. 172-177). IEEE.
- Kim, T. (2017). On the transaction cost of Bitcoin. *Finance Research Letters*, 23, 300-305.
- Kraft, D. (2016). Difficulty control for blockchain-based consensus systems. *Peer-to-peer Networking and Applications*, 9, 397-413.
- Kroll, J. A., Davey, I. C. & Felten, E. W. (2013, June). The economics of Bitcoin mining, or Bitcoin in the presence of adversaries. In *Proceedings of WEIS* (Vol. 2013, No. 11).
- 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*, Volume 1 (pp. 309-318). Springer Singapore.
- Lavi, R., Sattath, O. & Zohar, A. (2022). Redesigning Bitcoin's fee market. *ACM Transactions on Economics and Computation*, 10(1), 1-31.
- Li, J., Yuan, Y. & Wang, F. Y. (2022). Analyzing Bitcoin transaction fees using a queueing game model. *Electronic commerce research*, 1-21.
- Li, J., Yuan, Y., Wang, S. & Wang, F. Y. (2018, June). Transaction queueing game in bitcoin blockchain. In *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 114-119). IEEE.
- Mihăilescu, R. (2018). Blockchain Technologies: A new approach to old challenges. *Revista tinerilor economişti*, (31), 7-21.
- 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, January 30, 2015, Revised Selected Papers* (pp. 19-33). Springer Berlin Heidelberg.
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized business review*.
- 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.

- 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(2014), 257-269.
- Nguyen, G. T. & Kim, K. (2018). A survey about consensus algorithms used in blockchain. *Journal of Information processing systems*, 14(1).
- O'Dwyer, K. J. & Malone, D. (2014). *Bitcoin mining and its energy footprint*.
- Okupski, K. (2014). *Bitcoin developer reference*. Eindhoven, 3-4.
- Østbye, P. (2018). The Case for a 21 Million Bitcoin Conspiracy. *Available at SSRN* 3136044.
- Pesaran, M. H. & Shin, Y. (1995). *An autoregressive distributed lag modelling approach to cointegration analysis* (Vol. 9514). Cambridge, UK: Department of Applied Economics, University of Cambridge.
- 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.
- Reinsel, G. C. (1993). *Multivariate time series analysis*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Rizun, P. R. (2015). A transaction fee market exists without a block size limit. *Block Size Limit Debate Working Paper*, 2327-4697.
- Saad, M., Njilla, L., Kamhoua, C., Kim, J., Nyang, D. & Mohaisen, A. (2019, May). Mempool optimization for defending against DDoS attacks in PoW-based blockchain systems. In *2019 IEEE international conference on blockchain and cryptocurrency (ICBC)* (pp. 285-292). IEEE.
- Shanker, M., Hu, M. Y. & Hung, M. S. (1996). Effect of data standardization on neural network training. *Omega*, 24(4), 385-397.
- Tan, B. S. & Low, K. Y. (2017). Bitcoin—its economics for financial reporting. *Australian Accounting Review*, 27(2), 220-227.
- Tsang, K. P. & Yang, Z. (2021). The market for bitcoin transactions. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 71, 101282.
- Vallarano, N., Tessone, C. J. & Squartini, T. (2020). Bitcoin transaction networks: an overview of recent results. *Frontiers in Physics*, 8, 286.
- Van Alstyne, M. (2014). Why Bitcoin has value. *Communications of the ACM*, 57(5), 30-32.
- Velde, F. (2013). *Bitcoin: A primer*.
- White, H. (1980). A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, 817-838.