ACECR - Sharif University Branch
Quarterly Journal of
Industrial Technology Development

Providing a Framework for Evaluating and Selecting Decentralized and Private Blockchain-Based Platforms

■ **Fatemeh Askari**
Department of Management, Shiraz University
■ **Maryam Nekooeezade**[+*]
Assistant Professor, Department of Management, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Iran

Receive date: 12 June 2023, Revise date: 30 August 2023, & Accept date: 02 February 2025
10.22034/jtd.2026.1987364.1823

Abstract
The extent and importance of the digital economy in a world that increasingly welcomes the creation and application of emerging innovations is not hidden from anyone. Currently, the digital economy has changed the common forms of business actions and the ways of functioning and interacting with organizations, and its evolution cycle is still on its development path with the development of several transformative technologies such as blockchain. The new generation of blockchain with the potential to be used in commercial and public industries leads to the elimination of opaque, redundant, and often unprotected organizational structures. However, the implementation of private blockchain requires correct decisions of consortia and organizations in the selection of service providers. Hence, the present study aims to provide a decision-making process for the evaluation and selection of blockchain platforms in enterprise applications. To achieve the goal, a three-step process including extracting effective criteria for evaluating private blockchains, determining the importance and weight of the identified components, and Comparative analysis of organization options have been performed. The research findings show that 9 measures of security (with an importance coefficient of 0.16), fault tolerance (0.14), consensus algorithms (0.13), scalability (0.12), compatibility and interaction (0.11), cost factors (0.11), performance (0.10), ease of use (0.08), and popularity (0.03), are the most essential factors in evaluating private and permissioned blockchains. Also, the results of the comparison of private blockchain platforms show that Hyperledger Fabric is the most common platform used by organizations and is in a distinct position compared to competitors and other similar platforms.

Keywords:
Blockchain, Disruptive Innovation, Distributed Ledger, Peer-to-Peer network, Consensus Mechanism, Multi-Criteria Decision Making

* Corresponding Author
+ Email: mnekooee@shirazu.ac.ir

How to cite: Askari, F., Nekooeezade, M. (2026), Providing a Framework for Evaluating and Selecting Decentralized and Private Blockchain-Based Platforms, Quarterly journal of Industrial Technology Development, 24(63), 15-28.

فصلنامه علمی توسعه تکنولوژی صنعتی

توسعه چارچوب ارز یابی و گزینش پلتفرم‌های غیرمتمرکز و خصوصی مبتنی بر بلاکچین

■ فاطمه عسکری [۱]
دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مدیریت، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، ایران
■ مریم نکویی‌زاده *+
استادیار، گروه مدیریت، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۶/۸ و تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴
صفحات: ۲۸-۱۵
10.22034/jtd.2026.1987364.1823

چکیده

نسل جدید بلاکچین با پتانسیل به‌کارگیری در حوزه‌های تجاری و صنایع عمومی به زدودن ساختارهای سازمانی غیرشفاف، زائد و اغلب محافظت نشده می‌انجامد. با این حال، پیاده‌سازی بلاکچین خصوصی نیازمند تصمیم‌گیری درست کنسرسیوم‌ها و سازمان‌ها در انتخاب ارائه‌دهندگان سرویس است. از این رو، هدف مطالعه حاضر، ارائه یک فرایند تصمیم‌گیری برای ارزیابی و گزینش پلتفرم‌های بلاکچین در کاربردهای سازمانی است. برای دستیابی به هدف مطالعاتی مذکور، فرایندی سه مرحله‌ای شامل استخراج معیارهای تاثیرگذار بر ارزیابی بلاکچین‌های خصوصی، تعیین میزان اهمیت و وزن مولفه‌های شناسایی شده و تحلیل مقایسه‌ای گزینه‌های پیش‌روی سازمان در پیاده‌سازی بلاکچین مناسب کسب‌وکار انجام می‌گردد. یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که ۹ معیار امنیت (با ضریب اهمیت ۰/۱۶)، تحمل خطا (۰/۱۴)، مکانیزم اجماع (۰/۱۳)، مقیاس‌پذیری (۰/۱۲)، سازگاری و تعامل (۰/۱۱)، عوامل هزینه‌ای (۰/۱۱)، جنبه‌های عملکردی (۰/۱۰)، سهولت استفاده (۰/۰۸) و محبوبیت (۰/۰۳)، از ضروری‌ترین فاکتورها در ارزیابی بلاکچین‌های خصوصی و مجوزدار به‌شمار می‌روند. همچنین، نتایج حاصل از مقایسه پلتفرم‌های بلاکچین خصوصی نشان می‌دهند که هایپرلجر فابریک متداول‌ترین پلتفرمی است که توسط سازمان‌ها پذیرفته می‌شود و از نظر معیارهای مورد مطالعه، در جایگاه متمایزی نسبت به دیگر رقبای خود و سایر پلتفرم‌های مشابه قرار دارد.

واژگان کلیدی: بلاکچین، نوآوری‌های تحول آفرین، تمرکززدایی سازمانی، دفتر کل توزیع شده، شبکه همتا به همتا، مکانیزم اجماع، تصمیم‌گیری چندمعیاره.

۱ آدرس پست الکترونیکی: fatemeh.askari@hafez.shirazu.ac.ir
* عهده دار مکاتبات
+ آدرس پست الکترونیکی: mnekooee@shirazu.ac.ir

نحوه استناددهی به این مقاله: عسکری، فاطمه، نکویی‌زاده، مریم. (۱۴۰۵). توسعه چارچوب ارزیابی و گزینش پلتفرم‌های غیرمتمرکز و خصوصی مبتنی بر بلاکچین، فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی، ۲۴(۶۳)، ۲۸-۱۵.
ناشر: پژوهشکده توسعه تکنولوژی

۱- مقدمه

اقتصاد دیجیتال یک روش جدید سازماندهی سیستم‌های تجاری و اقتصادی است که در آن فناوری‌های دیجیتال به‌طور گسترده پیاده‌سازی و به‌طور فعال مورد استفاده قرار می‌گیرد (Chazhaeva et al., 2019). راه‌حل‌های ابری، هوش مصنوعی، بلاکچین، یادگیری ماشین و سایر فناوری‌های جدایی‌ناپذیر از یک اقتصاد دیجیتال، امکان نوسازی و پیکربندی مجدد ساختارهای سنتی و عملکردهای تجاری غالبا فرسوده و ناکارآمد را میسر می‌سازد (Popkova & Sergi, 2020). در میان نوآوری‌های مذکور، فناوری بلاکچین می‌تواند بخش قابل توجهی از پارامترهای سنتی اقتصاد کنونی مانند اعتماد، نهاد مرکزی ثالث، قرارداد و ارز را زیر سوال برد و به گونه‌ای جدید باز تعریف نماید (Swan, 2015).

بلاکچین یک دفتر کل قابل اعتماد و غیرمتمرکز است که تحت کنترل یک نهاد مرجع نیست. این شبکه توزیع شده به دلیل سختی تغییر در رکوردهای ثبت شده، تغییرناپذیر درنظرگرفته می‌شود و امنیت بلوک‌های آن توسط فناوری رمزنگاری تضمین می‌گردد (Yaga et al., 2019). یک بلاکچین بر روی شبکه‌های همتا به همتا کار می‌کند و به کاربران خود اجازه می‌دهد تا به اطلاعات و خروجی‌های یک سیستم اعتماد کنند، بدون اینکه لزوما نیاز به تایید نهاد مرکزی باشد (Bashir, 2017).

نخستین پیاده‌سازی عملی فناوری بلاکچین، در سال ۲۰۰۸ و در حوزه پرداخت‌های مالی میسر گردید. تا پیش از این پرداخت‌های الکترونیکی به‌طور کاملا انحصاری در تملک موسسات مالی قرار داشت. درحالی‌که شیوه‌های پرداخت متمرکز در اغلب تراکنش‌ها به اندازه کافی مطلوب عمل می‌کنند، اما همچنان ضعف‌های ذاتی مدل مبتنی بر اعتماد به شخص ثالث قابل اغماض نیست (Nakamoto, 2008). برای اولین بار چالش‌ها و نقاط ضعف سیستم‌های پرداختی متمرکز با معرفی ارز دیجیتال بیت کوین و ارائه یک شبکه بی‌نیاز از اعتماد به شخص ثالث پاسخ داده شد (Bashir, 2017).

با این حال، ارزهای رمزنگاری شده (نسل اول بلاکچین) تمام آن چیزی نیست که اکنون به‌عنوان فناوری بلاکچین شناخته می‌شود (Mainelli & Smith, 2015). دومین نسل از فناوری زنجیره بلوک با خلق اتریوم و ورود به حوزه خدمات و دارایی‌های مالی همراه بود (Xu et al., 2019). پس از آن، بلاکچین‌های نسل سوم زمینه را برای پیاده‌سازی برنامه‌های کاربردی در فراتر از صنعت خدمات مالی مهیا کردند و در بخش‌ها و صنایع عمومی‌تر اعم از دولت و حکمرانی، بهداشت، رسانه، تجارت و هنر راه یافتند (Burgess & Colangelo, 2015). قابلیت توسعه‌پذیری این فناوری سبب گردید تا در امور و عملکردهای سازمانی به‌کار برده شود و بسیاری از فرآیندهای سنتی کسب‌وکار را به دلیل ویژگی‌های برجسته آن مانند تمرکززدایی، شفافیت، تغییرناپذیری، قابلیت حسابرسی و امنیت دگرگون سازد (Viriyasitavat & Hoonsopon, 2019). رهگیری کالا در زنجیره تامین، حفظ هویت و سوابق دیجیتال، افزودن لایه امنیتی در شبکه اینترنت اشیا، تغییر در شیوه‌های پرداخت و تامین مالی، هوشمندسازی قراردادهای تجاری، تحول در سیستم‌های رای‌گیری شرکتی و در نهایت خلق سازمان‌های غیرمتمرکز خودگردان تنها بخشی از گستره کاربردی فناوری بلاکچین در صنعت و فرآیندهای تجاری را نشان می‌دهد (Morkunas et al., 2019).

بلاکچین‌های سازمانی که در زمره بلاکچین‌های خصوصی مجوزدار قرار می‌گیرند، امکان اشتراک‌گذاری داده‌ها را فقط بین موجودیت‌های مجاز در شبکه فراهم می‌کند. از این رو، بلاکچین‌های خصوصی به‌عنوان یک دفتر کل غیرمتمرکز با کنترل دسترسی تنظیم شده می‌تواند شفافیت و تغییرناپذیری، امنیت و تمرکززدایی را در یک شبکه سازمانی ایجاد نماید (Bashir, 2017). با این حال، پیاده‌سازی بلاکچین سازمانی مملو از نگرانی در مورد زیرساخت، الزامات دانشی، هزینه و سرعت راه‌اندازی است (Patsch, 2020). وجود این ضرورت‌ها، اهمیت به‌کارگیری پلتفرم‌های بلاکچینی کارآمد را دو چندان می‌سازد. یک پلتفرم بلاکچین را می‌توان به‌عنوان راه‌حل‌های نرم‌افزاری تعریف نمود که توسعه و استقرار برنامه‌های بلاکچین را با سفارشی‌سازی اندک ساده‌سازی می‌کند (Quasim et al., 2020). با این وجود همواره این سؤالات مطرح است که مناسب‌ترین پلتفرم یا چارچوب بلاکچین برای مدیریت دارایی‌ها و تراکنش‌های دیجیتال در سازمان کدام است؟ چه معیارهایی در ارزیابی و مقایسه پلتفرم‌های بلاکچین خصوصی، ضروری و متداول به‌شمار می‌رود؟ چگونه می‌توان ترجیحات و منافع ذی‌نفعان سازمانی را در اهمیت‌سنجی و گزینش بسترهای بلاکچینی ارتقا بخشید و حداکثرسازی نمود؟ اهمیت و ضرورت پاسخگویی به این دسته از سوالات و بسیاری از چالش‌های مشابه، در پذیرش جنبه‌های کاربردی بلاکچین سازمانی اجتناب‌ناپذیر است. با این حال مطالعات کمتری به شناسایی معیارهای فنی و غیرفنی موثر در استقرار و گزینش پلتفرم‌های بلاکچین پرداخته‌اند. با توجه این امر، پژوهش حاضر درصدد است که اهم معیارهای تاثیرگذار بر ارزیابی ذینفعان از بلاکچین‌های خصوصی را شناسایی کند و

سپس به تحلیل مقایسه‌ای گزینه‌های پیش‌روی سازمان برای پیاده‌سازی راه‌حل‌های بلاکچینی بپردازد.

۲- ادبیات نظری پژوهش

بلاکچین فناوری است که از اعتبارسنجی جامعه برای همگام نگه داشتن محتوای دفتر کل بین چندین کاربر استفاده می‌کند؛ به‌طوری که تحت عملکرد عادی شبکه، هیچ محتوایی پس از انتشار قابل تغییر نیست (Aste et al., 2017). این فناوری با توجه به سطح دسترسی اطلاعاتی، نقش هر گره و اجماع در شبکه، چهار نوع کلی بلاکچین‌های بدون مجوز عمومی، دارای مجوز عمومی، بدون مجوز خصوصی و دارای مجوز خصوصی را ارائه می‌دهد. طبقه‌بندی بین شبکه‌های عمومی و خصوصی، گروه گره‌هایی را تعریف می‌کند که می‌توانند به شبکه دسترسی داشته باشند. طبقه‌بندی بین شبکه‌های مجاز و بدون مجوز، نقش گره‌ها را در شبکه مشخص می‌کند (Oliveira et al., 2019). در یک شبکه عمومی، مکانیزم کنترل دسترسی وجود ندارد و گره‌ها می‌توانند بدون هیچ آسیبی به مکانیزم اجماع[2] و تولید بلوک‌های جدید به شبکه بپیوندند و از آن خارج شوند. در شبکه‌های خصوصی، مکانیزم کنترل دسترسی وجود دارد و امکان اشتراک‌گذاری داده‌ها فقط در بین گره‌ها یا موجودیت‌های مشخص در شبکه ممکن است (Bashir, 2017). در شبکه‌های بدون مجوز، همه گره‌ها نقش یکسانی را ایفا می‌کنند. آنها مسئول ایجاد تراکنش‌ها، بلوک‌های استخراج شده و مشارکت در اجماع هستند. از سوی دیگر، در شبکه‌های مجاز، گره‌ها نقش‌های متفاوتی را برعهده می‌گیرند (Oliveira et al., 2019).

این مفهوم برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ توسط شخصی با نام مستعار ساتوشی ناکاموتو ارائه شد و توضیح داد که چگونه رمزنگاری و دفتر کل توزیع شده می‌تواند در یک برنامه ارز دیجیتال ترکیب شوند (Nakamoto, 2008). با این حال، باید درنظرداشت که بلاکچین منشأ خود را از فناوری‌هایی می‌گیرد که چندین دهه پیش معرفی شده‌اند و درک بلاکچین بدون توجه به پیش‌سازه‌های آن (مانند هش‌کش، شبکه همتا به همتا و مکانیزم‌های اجماع) دشوار به نظر می‌رسد (Yaga et al., 2019; Bashir, 2017). با نگاهی به تمام فناوری‌های مذکور و تاریخچه آنها، به راحتی می‌توان دریافت که چگونه این ایده‌ها و مفاهیم برای اختراع بیت‌کوین و آنچه که امروزه به‌عنوان بلاکچین شناخته می‌شود، با هم ترکیب شده‌اند. از این رو، یک راه منطقی برای درک بلاکچین آشنایی با ریشه‌های این فناوری است.

توابع هش: هش کردن روشی برای اعمال یک تابع هش رمزنگاری بر روی داده است که خروجی منحصربه‌فردی را برای ورودی تقریبا هر اندازه (مانند یک فایل، متن یا تصویر) محاسبه می‌کند (Preneel, 1994). این کار به افراد اجازه می‌دهد تا به‌طور مستقل داده‌های ورودی را دریافت نمایند، با هش کردن مجدد داده‌ها همان نتیجه را بدست آورند و تایید کنند که هیچ تغییری در داده‌ها وجود نداشته است؛ چرا که حتی کوچک‌ترین تغییر در ورودی (به‌عنوان مثال، تغییر یک بیت) منجر به یک خروجی کاملا متفاوت می‌گردد (Damgard, 1989). توابع هش رمزنگاری دارای سه ویژگی امنیتی مهم هستند:

۱. محاسبه مقدار ورودی صحیح با توجه به مقدار خروجی از نظر محاسباتی غیرممکن است (یک طرفه هستند)؛

۲. نمی‌توان ورودی‌ای را پیدا کرد که به یک خروجی خاص هش کند. بدین معنا که توابع هش رمزنگاری به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با توجه به یک ورودی خاص، یافتن ورودی دومی که همان خروجی را تولید کند از نظر محاسباتی غیرممکن است؛

۳. توابع هش در برابر تصادم مقاوم هستند. بدین معنا که امکان یافتن هر دو ورودی که خروجی یکسانی را تولید کنند از نظر محاسباتی غیرممکن است (Chi & Zhu, 2017; Yaga et al., 2019).

این ایده اولین بار در سال ۱۹۹۷ توسط آدام بک[3] برای کنترل ایمیل‌های اسپم معرفی شد. بدین معنا که فرستنده هر بار که ایمیلی ارسال می‌کند، باید مدت زمان معقولی را صرف محاسبه هش کند. با این حال، صرف این مدت زمان برای یک کاربر معمولی، مانع از ارسال پیام نمی‌گردد؛ اما اگر فرستنده بخواهد یک ایمیل را به هزاران کاربر ارسال کند، به مقدار قابل توجهی از منابع محاسباتی نیازمند است (Narayanan & Clark, 2017). بیت کوین نیز اساساً از همان پازل محاسباتی هش همراه با برخی پیشرفت‌های جزئی استفاده می‌کند. بدین معنا که هش بلوک فعلی در هدر بلوک بعدی گنجانده می‌شود، از آنجایی که همه گره‌های شبکه آخرین هش را می‌دانند، می‌توانند تأیید کنند که داده‌های درون بلوک دستکاری نشده و تغییر نکرده‌اند (Narayanan et al., 2016).

شبکه همتا به همتا: سیستم‌های همتا به همتا، سیستم‌های توزیع‌شده‌ای هستند که در آن گره‌هایی با نقش‌ها و قابلیت‌های معمولا برابر، اطلاعات و خدمات را مستقیماً با یکدیگر مبادله

2 Consensus Mechanism

3 Adam Back

می‌کنند. در سال‌های اخیر، شبکه همتا به همتا به‌عنوان یک روش محبوب برای به اشتراک‌گذاری حجم عظیمی از داده‌ها درنظرگرفته شده است (Yang & Garcia-Molina, 2002). متمایزترین تفاوت بین شبکه‌های کلاینت- سرور و شبکه همتا به همتا این است که در شبکه کلاینت- سرور، یک سیستم با عملکرد بالاتر تنها ارائه‌دهنده محتوا و خدمات است و کلاینت‌ها فقط محتوا را درخواست می‌کنند، بدون اینکه هیچ یک از منابع خود را به اشتراک بگذارند (Berson, 1996). در این شبکه، گره‌های شرکت‌کننده می‌توانند به‌عنوان یک سرور یا یک کلاینت عمل کنند، اما نمی‌توانند هر دو قابلیت را دربرگیرند. در مقابل، در شبکه‌های همتا به همتا گره‌ها قادرند تا همزمان به‌عنوان سرور و کلاینت شناخته شوند (Schollmeier, 2001).

شبکه مبتنی بر سرور دارای محدودیت‌هایی است که مرزهایی را برای این سیستم ترسیم می‌کند و عبور از این مرزها، مشکلات شبکه را در پی دارد. محدودیت پهنای باند رایج‌ترین مسئله در سیستم‌های مبتنی بر سرور است؛ زیرا حداکثر استفاده از سرور به حداکثر توان آن بستگی دارد. از این رو، نقاط تراکم در سیستم (گلوگاه‌ها) می‌توانند کل عملیات شبکه را کند کنند. تاخیر ناشی از خرابی سرور و عوامل هزینه‌ای از دیگر محدودیت‌های یک شبکه کلاینت- سرور است (Wang et al., 2005; Beygelzimer et al., 2007). در مقابل، در یک معماری همتا به همتا نقطه شکست واحدی وجود ندارد. به این معنا که در صورتی خرابی یکی از نودها، همچنان امکان برقراری ارتباط در سایر گره‌ها وجود دارد. به‌کارگیری منابع استفاده نشده (مانند قدرت پردازش و ظرفیت ذخیره‌سازی سایر گره‌ها)، توزیع هزینه و مقیاس‌پذیری بهتر، از دیگر مزایای معماری همتا به همتا به‌شمار می‌رود (Maly et al., 2003).

مکانیزم‌های اجماع: در سپتامبر ۱۹۶۴، پل باران[4] ایده شبکه‌های ارتباطی توزیع شده که در آن هر گره در وضعیت برابر با سایر گره‌ها قرار دارند را مطرح نمود. سپس در سال ۱۹۸۲ یک آزمایش فکری توسط لامپورت و همکاران ارائه شد. به موجب آن گروهی از ژنرال‌های بیزانس که بخش‌های مختلفی از ارتش را رهبری می‌کنند، قصد حمله یا عقب‌نشینی از یک شهر را دارند. تنها راه ارتباطی بین آن‌ها یک پیام‌رسان است و آن‌ها برای برنده شدن باید با حمله همزمان موافقت کنند. مسئله این است که یک یا چند ژنرال می‌توانند خائن باشند و پیام گمراه کننده‌ای را منتقل کنند. بنابراین نیاز به یافتن مکانیزمی است که امکان توافق بین ژنرال‌ها را حتی در حضور ژنرال‌های خیانتکار فراهم کند و حمله به‌صورت همزمان انجام شود. به‌عنوان قیاس با سیستم‌های توزیع شده، ژنرال‌ها را می‌توان به‌عنوان گره‌ها، خائنان را به‌عنوان گره‌های بیزانسی و پیام‌رسان را کانال ارتباطی بین ژنرال‌ها درنظرگرفت (Bashir, 2017). بلاکچین نیز یک پایگاه داده توزیع شده است که فهرستی از رکوردها را در خود نگه می‌دارد اما ممکن است که گره‌ها به یکدیگر اعتماد نداشته باشند. گره‌ها ممکن است از کار بیفتند، رفتار مخربی داشته باشند، برخلاف هدف مشترک عمل کنند و یا ارتباط شبکه قطع شود. بنابراین، برای ارائه یک سرویس مستمر، گره‌ها یک پروتکل اجماع را اجرا می‌کنند تا اطمینان حاصل نمایند که همه آنها در مورد الحاق ورودی‌ها به بلاکچین توافق دارند (Mingxiao et al., 2017; Cachin & Vukolić, 2017).

شبکه‌های توزیع شده به دلیل ماهیت خود به درجه‌ای از تحمل خطا نیاز دارند که مکانیزم‌های اجماع باید به آن دست یابند. تحمل خطا مستلزم آن است که شبکه توزیع شده حتی در صورت خرابی برخی از قطعات کار کند. طبقه‌بندی‌های شکست متعددی وجود دارد که مهم‌ترین آنها برای شبکه‌های بلاکچین عبارتند از: تحمل خطا شکست[5] (CFT) و تحمل خطا بیزانس[6] (BFT). تحمل خطا به این نیاز می‌پردازد که سیستم حتی در صورت توقف و یا خرابی برخی از گره‌ها، همچنان کار کند؛ درحالی‌که تحمل خطا بیزانس به عملکرد عادی سیستم حتی در صورت وجود برخی گره‌های مخرب اشاره دارد (Podgorelec et al., 2019; Chaudhry & Yousaf, 2018). به‌طور کلی، دو دسته اصلی از اجماع توزیع شده در شبکه‌های بلاکچین وجود دارد. در نوع اول الگوریتم‌های اجماع مبتنی بر رای‌گیری، اگر یک گره بخواهد یک بلوک را به زنجیره خود اضافه کند، باید حداقل تعداد مشخصی از نودهای شبکه در مورد آن توافق کنند. الگوریتم‌های اجماع مبتنی بر رای که عموما در بلاکچین‌های خصوصی ترجیح داده می‌شوند، به‌طور گسترده با ویژگی CFT مطابقت دارند (Pahlajani et al., 2019). در نوع دوم الگوریتم‌های اجماع مبتنی بر اثبات، گره‌هایی که به شبکه می‌پیوندند باید ثابت کنند که در بدست آوردن حق الحاق بلوک بیشتر از سایر گره‌ها واجد شرایط هستند (Nguyen & Kim, 2018). مناسب‌ترین نوع اجماع توزیع شده در شبکه بلاکچین عمومی، مبتنی بر اثبات است که به‌طور

4 Paul Baran

5 Crash Fault Tolerance

6 Byzantine Fault Tolerance

عمده با ویژگی BFT سازگار است (Podgorelec et al., 2019). هر دو دسته کلی فوق‌الذکر، از الگوریتم‌های اجماع متعددی تشکیل شده‌اند. تعیین این امر که کدام یک از مکانیزم‌های اجماع موثرتر عمل می‌کنند به پارامترهای متعددی مانند نوع بلاکچین، مقیاس‌پذیری، توان عملیاتی و مصرف انرژی متکی است (Chaudhry & Yousaf, 2018).

۳- پیشینه تجربی پژوهش

با توجه به نفوذ و توسعه‌پذیری فناوری بلاکچین، مطالعات آکادمیک انجام گرفته در این حوزه از تنوع موضوعی بسیاری برخوردارند (Almeshal & Alhogail, 2021). با این وجود، رویکردهای مطالعاتی اصلی که به جنبه‌های کاربردی بلاکچین سازمانی و ابتکارات این فناوری معطوف هستند، عمدتا در سه حوزه زیر قابل تشریحند:

۱. ارزیابی فناوری بلاکچین و تناسب آن با موارد تجاری که در آن محققان قابلیت‌ها و ویژگی‌های بلاکچین را بررسی می‌کنند و آنها را با نیازهای تجاری مطابقت می‌دهند. پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه استفاده از بلاکچین برای افزایش انعطاف‌پذیری در زنجیره تامین صنعتی، به‌کارگیری قراردادهای هوشمند برای فعال کردن مبادلات تجاری امن‌تر و کم‌هزینه‌تر، حفظ حقوق مالکیت دارایی‌ها، تامین مالی سازمانی، هدف‌گیری دقیق‌تر مشتریان برای ارائه فعالیت‌های ترفیعی و تبلیغاتی، تسهیل و تسریع رویه‌های کمرگی در تجارت بین‌المللی و ... در این دسته از مطالعات قرار دارند (Min, 2019; Udokwu et al., 2018; Raman & Raj, 2021; Ante et al., 2018; Ullah et al., 2020; McDaniel & Norberg, 2019).

۲. ارزیابی سطح آمادگی استفاده از بلاکچین در زمینه‌های خاص که در آن محققان نظریه‌های موجود در مورد پذیرش فناوری را اعمال می‌کنند. مطالعه تسهیل پذیرش بلاکچین در زنجیره‌های تامین با تکیه بر تئوری UTAUT، چارچوب پذیرش بلاکچین در سازمان‌های حمل و نقل با تاکید بر نظریه TAM، تحلیل پذیرش فناوری بلاکچین در میان مدیران سازمانی براساس مدل‌های IDT و TAM در این دسته از مطالعات قرار می‌گیرند (Alazab et al., 2021; Tan & Sundarakani, 2020; Lou & Li, 2017).

۳. تعیین پارامترهای سنجش عملکرد سیستم‌های بلاکچین و ارزیابی پلتفرم‌ها براساس معیارها و جزئیات فنی انجام می‌گردد. مطالعه حاضر از منظر هدف و فرایند اجرایی پژوهش، در این دسته از مطالعات قرار دارد. پیاده‌سازی و استقرار پلتفرم‌های بلاکچین با چالش‌های متعددی در زمینه عملکرد، مقیاس‌پذیری و ادغام با سایر سیستم‌های سازمانی رو به روست. با این حال مطالعات کمتری به ارزیابی سیستم‌های سازمانی مبتنی بر بلاکچین پرداخته‌اند. در ادامه، پژوهش‌های محدودی که با محوریت ارزیابی و رتبه‌بندی پلتفرم‌های بلاکچین انجام شده‌اند، شرح داده شده است. آنچه سبب تمایز مطالعه حاضر از سایر پژوهش‌های انجام گرفته در این حوزه می‌شود، از دو منظر قابل تبیین است. نخست آنکه، مطالعه حاضر با نگاهی جامع‌تر به تعیین معیارهای فنی، اقدام به رتبه‌بندی پلتفرم‌ها از دید متخصصان داخلی می‌کند. پارامترهای مورد استفاده در این ارزیابی به نحوی تعیین شده‌اند که در صنایع مختلف قابل تعمیم باشند. همچنین، در این پژوهش روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره متفاوتی مبنای ارزیابی معیارها و پلتفرم‌ها قرار گرفته‌اند.

Thanh (2022) در مطالعه خود با تاکید بر تحلیل سلسله مراتبی فازی و ارزیابی مجموع مقادیر وزنی، به تعیین میزان اهمیت معیارهای موثر در ارزیابی ارائه‌دهندگان خدمات توسعه بلاکچین برای سازمان‌های لجستیک (مانند سرمایه‌گذاری، پشتیبانی، امنیت و حریم خصوصی) پرداخته است. Ilieva & Yankova (2021) با تمرکز بر روش سنجش گزینه‌ها براساس راه‌حل سازشی، یک سیستم مبتنی بر بلاکچین را برای نظارت بر تراکنش‌ها و بهبود کنترل‌های کیفی در زنجیره تامین مواد غذایی پیشنهاد کرده‌اند. برای دستیابی به این مقصود، پنج معیار عملکرد، استقرار، پشتیبانی، آموزش و رتبه‌بندی مشتریان مبنای ارزیابی راه‌حل‌های نرم‌افزاری پیش‌روی سازمان قرار گرفته است.

Yang (2021) با بهره‌گیری از تحلیل سلسله مراتبی فازی به ارائه یک مدل تصمیم برای شناسایی بهترین پلتفرم بلاکچین مناسب برای سیستم مکالمه مبتنی بر دانش پرداخته است. Büyüközkan & Tüfekçi (2021) با تمرکز بر روش ویکور به بررسی برخی از جنبه‌های فنی و غیرفنی موثر در سیستم‌های مبتنی بر بلاکچین و رتبه‌بندی گزینه‌های سازمانی اقدام نموده‌اند. Nanayakkara et al. (2021) در مطالعه خود با تاکید بر رویکرد رتبه‌بندی چند شاخصه ساده به ارزیابی پلتفرم‌های بلاکچینی موجود براساس معیارهای شناسایی شده (مانند یادگیری، رابط کاربری گرافیکی و به‌روزرسانی‌ها) پرداخته‌اند و متعاقباً، سیستم انتخابی با درنظرگرفتن معماری شبکه، کتابخانه‌ها، برنامه‌های کاربردی و تحلیل قابلیت‌ها ارزیابی شده است.

Karayazi & Bereketli (2020) با انجام یک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی نشان داده‌اند که هزینه نرم‌افزار، سرعت و نگرانی‌های مرتبط با حریم خصوصی، از مهم‌ترین عوامل در

ارزیابی نرم‌افزارهای بلاکچین مناسب برای سازمان‌های فعال در حوزه لجستیک درنظرگرفته می‌شوند. در نهایت، Kuo et al. (2019) از طریق یک مرور سیستماتیک به مقایسه قابلیت پلتفرم‌های بلاکچین محبوب در حوزه مراقبت‌های بهداشتی یا زیست‌پزشکی اقدام نموده‌اند. برای دستیابی به این مقصود، ویژگی‌های فنی (از جمله سرعت عملیات، حریم خصوصی و پشتیبانی از شبکه) در سیستم‌های بلاکچین مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۴- روش‌شناسی پژوهش

این مطالعه با هدف ارائه یک فرایند تصمیم‌گیری برای ارزیابی و گزینش پلتفرم‌های بلاکچین خصوصی صورت می‌پذیرد. با توجه به این امر که یافته‌های مطالعه ناظر به حل مساله‌ای خاص در سطوح سازمانی است، پژوهش از نوع کاربردی تلقی می‌شود. همچنین، مطالعه حاضر از جهت عملیاتی، به‌صورت آمیخته و در سه فاز «شناسایی و استخراج پارامترهای موثر در ارزیابی بلاکچین‌های خصوصی و مجوزدار»، «تحلیل کمی و اهمیت‌سنجی مولفه‌های استخراج شده» و «تحلیل عملکرد پلتفرم‌های سازمانی مبتنی بر بلاکچین» انجام می‌گردد.

فاز نخست پژوهش شامل بررسی و استخراج پارامترهای پژوهش از ادبیات نظری، تعیین پنل خبرگان و به‌کارگیری روش دلفی فازی تک مرحله‌ای برای نهایی کردن معیارهای مورد مطالعه است. در فاز دوم پژوهش، میزان اهمیت و وزن معیارهای مورد مطالعه با استفاده از روش بهترین بدترین (BWM) برآورد می‌گردد. این روش که توسط رضایی (۲۰۱۵) ارائه شده است، به محاسبه اوزان معیارها براساس مقایسات زوجی اما به روشی متفاوت با دیگر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌پردازد. بدین معنا که اهمیت نسبی معیارهای موردمطالعه یک‌بار نسبت به مهم‌ترین و ارجح‌ترین شاخص و بار دیگر نسبت به کم اهمیت‌ترین شاخص تعیین می‌گردد. در این حالت، خبرگان با تعداد مقایسات کمتری مواجه هستند که این امر به کاهش میزان تناقضات در مقایسات صورت گرفته، سازگاری بالاتر و ارائه نتایج قابل اعتمادتر می‌انجامد.

فاز سوم مطالعه با ارزیابی گزینه‌های پیش‌روی سازمان در پیاده‌سازی بلاکچین مناسب کسب‌وکار و از طریق روش تاپسیس فازی صورت می‌پذیرد. روش تاپسیس یک تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره شناخته شده است که برای اولین بار توسط Hwang & Yoon (1981) ارائه گردید. تکنیک تاپسیس بر این اصل کار می‌کند که گزینه منتخب دارای حداقل فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و حداکثر فاصله از راه‌حل ایده‌آل منفی است. روش تاپسیس مستلزم رتبه‌بندی ترجیحی گزینه‌های جایگزین از طریق خبرگان است؛ اما اغلب برای خبرگان دشوار است که رتبه‌بندی دقیقی را برای گزینه‌های جایگزین ارائه دهند. برای غلبه بر این محدودیت، از اعداد فازی مثلثی برای رتبه‌بندی اولویت‌های خبرگان استفاده شده است.

۵- یافته‌های پژوهش

فاز نخست پژوهش شامل بررسی و استخراج پارامترهای پژوهش از ادبیات نظری، تعیین پنل خبرگان و به‌کارگیری روش دلفی فازی تک مرحله‌ای برای نهایی کردن معیارهای مورد مطالعه است. نتایج حاصل از مرور ادبیات نظری، ۹ معیار فنی و غیرفنی موثر در استقرار پلتفرم‌های بلاکچین (شامل امنیت، توان عملیاتی و تاخیر[7]، مقیاس‌پذیری، مکانیزم اجماع، تحمل خطا، سازگاری، سهولت استفاده، محبوبیت برند و هزینه) را در اختیار پژوهشگران قرار داده است. در ادامه، پارامترهای استخراج شده، شرح و منابع مطالعاتی هر یک از آنها بیان شده است.

امنیت و حریم خصوصی: به معنای شناسایی آسیب‌پذیری‌ها و کاهش خطرات در سطح خرد و در سطح سیستم است. به گونه‌ای که محرمانه بودن، یکپارچگی، عدم انکار و صحت داده‌ها در بلاکچین تضمین شود (Hamida et al., 2017; Soni & Bhushan, 2019). فناوری بلاکچین یک دفتر کل از محتوای تغییرناپذیر و ضد دستکاری ایجاد می‌کند که به نوعی کیفیت و امنیت ذاتی داده‌های موجود در زنجیره را نشان می‌دهد. با این حال، پلتفرم‌های بلاکچین با توجه به مکانیسم اجماع اتخاذی، مجوزهای دسترسی، پارتیشن‌بندی و رمزگذاری داده‌ها، از نظر سطوح امنیت متفاوت هستند (Zhang et al., 2019).

توان عملیاتی و تاخیر (جنبه های عملکردی): عملکرد یک پلتفرم بلاکچین معین را می‌توان از نظر توان عملیاتی و تاخیر اندازه‌گیری نمود. حداکثر نرخی که بلاکچین می‌تواند تراکنش‌ها را با آن انجام دهد، به‌عنوان حداکثر توان عملیاتی سیستم شناخته می‌شود که با اندازه بلوک و بازه زمانی هر بلوک مرتبط است. این نشان‌دهنده ظرفیت پلتفرم برای رسیدگی به حجم قابل توجهی از تراکنش‌ها به‌طور همزمان است. به تعبیری دیگر، ارزیابی توان عملیاتی شامل تعیین کمیت تراکنش‌هایی

7 Throughput & Latency

اســـت که می‌توان در یک واحد زمان پردازش و به زنجیره بلوک اضـــافـه کرد و بینش‌هایی را درباره مقیاس‌پذیری و پاســـخ‌دهی سیستم ارائه می‌دهد (Croman et al., 2016). تأخیر مدت زمانی اسـت که یک پلتفرم بلاکچین برای پاسـخ به یک تراکنش صرف می‌کند (Monrat et al., 2020). تأخیر در برنامه‌هایی که دارای تراکنش‌های حسـاس به زمان هسـتند، از اهمیت بالایی برخوردار اســـت. به‌عنوان مثال، تراکنش‌های مالی و مدیریت زنجیره تامین به اعتبارسـنجی سـریع برای حفظ تداوم عملیاتی متکی هستند. تـأخیر کمتر تضـــمین می‌کنـد که تراکنش‌ها به ســـرعت تأیید می‌شـــوند، اعتماد را تقویت می‌کند و تصـــمیم‌گیری ســـریع را امکان‌پذیر می‌سازد. توان عملیاتی و تأخیر دو جنبه به‌هم پیوسته هســـتند. افزایش توان عملیاتی با اجازه دادن به اندازه بلوک‌های بزرگتر ممکن اســـت منجر به افزایش تاخیر شـــود؛ زیرا داده‌های بیشـتری باید اعتبارسـنجی شـوند. ایجاد تعادل مناسب بین توان عملیاتی بالا و تاخیر کم برای دستیابی به عملکرد بهینه بلاکچین بسیار مهم است (Croman et al., 2016).

مقیاس‌پذیری: مقیاس‌پذیری شبکه‌های بلاکچین توانایی آن پلتفرم برای پشـــتیبـانی از افزایش بـار و همچنین افزایش تعداد گره‌ها در شـبکه را نشان می‌دهد (Li et al., 2017; Zhou et al., 2020). بـه تعبیری دیگر، مقیـاس‌پـذیری یک پلتفرم بلاکچین، صـــلاحیت آن در مدیریت حجم افزایش‌یافته تراکنش‌ها بدون به خطر انـداختن ســـرعت، امنیت یا کارایی عملیاتی را مشـــخص می‌کند (Dabbagh et al., 2021). پلتفرمی که بتواند پاسـخگویی و توان عملیـاتی خود را بـا افزایش حجم تراکنش حفظ کنـد، نشـان‌دهنده مقیاس‌پذیری بالای آن اسـت که به‌عنوان یک عامل حیـاتی برای دوام آن در برنـامـه‌های کاربردی دنیای واقعی عمل می‌کند (مقیاس‌پذیری عمودی). از ســـوی دیگر، قابلیت پلتفرم برای ادغام یکپارچه گره‌های اضافی در شبکه به همان اندازه قابل توجـه اســـت. بـا افزایش تعداد شـــرکت‌کنندگان، بلاکچین باید مکانیسـم‌های اجماع و پردازش تراکنش‌ها را به‌طور موثر تسـهیل کنـد (Li et al., 2017). در این حالت، مقیاس‌پذیری تضـــمین می‌کنـد که عملکرد پلتفرم بدون درنظرگرفتن صـــدها یا هزاران گره در شـــبکـه ثـابـت می‌مـانـد (مقیـاس‌پـذیری افقی). معیـار مقیاس‌پذیری عمیقاً با قابلیت اســـتفاده از پلتفرم بلاکچین در هم تنیده شـده اسـت. شـبکه‌هایی که خدمات مالی، مدیریت زنجیره تـامین و برنـامـه‌های غیرمتمرکز را تامین می‌کنند باید خود را با رشد سریع تراکنش‌ها تطبیق دهند. در مقابل، در کنسرسیوم‌های خصـوصـی ممکن اسـت برای حفظ تعادل بین مقیاس‌پذیری و ثبات عملیاتی، رشـد کنترل‌شـده در اولویت قرار گیرد. از این رو، هنگـام ارزیابی مقیاس‌پذیری یک پلتفرم بلاکچین، ملاحظات باید توانـایی آن پلتفرم در حفظ توان عملیـاتی، بـه حداقل رســـاندن تـأخیر و حفظ مکـانیســـم‌هـای اجمـاع را حتی بـا تکـامـل درخواست‌های شبکه دربرگیرد.

مکانیزم اجماع: لایه اجماع، لایه اصـلی در معماری بلاکچین اسـت که در آن پروتکل اجماع برای تصـمیم‌گیری در مورد نحوه اضـــافه شـــدن بلوک جدید در زنجیره پیکربندی شـــده اســـت. الگوریتم اجماع مشـــکل اعتماد را در شـــبکه‌ای حل می‌کند که ممکن اســـت گره‌های مخرب و معیوب وجود داشـــته باشـــند (Hamida et al., 2017; Pahlajani et al., 2019). پـروتـکـل هماهنگ شـده در لایه اجماع به این سوال اساسی پاسخ می‌دهد: بلوک‌هـای جـدیـد چگونـه در زنجیره بلوک ادغـام می‌شـــونـد؟ مکـانیزم‌هـای اجمـاع مختلف (از الگوریتم‌های مبتنی بر اثبات تا الگوریتم‌های مبتنی بر رای) رویکردهای مجزایی را برای رسـیدن بـه این توافق ارائه می‌دهند (Podgorelec et al., 2019). با این وجود، این مکانیزم‌ها در روابط متقابلی با سـایر معیارهای امنیت، مقیاس‌پذیری، مصـرف انرژی و تمرکززدایی قرار دارند که باید در چارچوب اهداف پلتفرم سـنجیده شـود (Chaudhry & Yousaf, 2018).

تحمـــل خطا: تحمـل خطا تعیین می‌کند که بلاکچین تا چه اندازه در برابر خطا و شـکسـت مقاوم اسـت و شکست گره تا چه میزان می‌توانـد بر معیارهای عملکرد تاثیر بگذارد (Podgorelec et al., 2019; Stifter et al., 2019). تحمل خطا یک جنبه حیاتی سـیسـتم‌های توزیع شـده اسـت که توانایی آن‌ها را برای ادامه عملکرد حتی در حضـــور خرابی گره یـا رفتـار مخرب تضـــمین می‌کند. در حوزه مکانیسـم‌های اجماع، دو رویکرد اسـاسی تحمل خطا شـکسـت (CFT) و تحمل خطا بیزانس (BFT) مطرح است. CFT بر حفظ عملکرد ســـیســـتم حتی زمانی که گره‌ها به دلیل اشکالات فنی، خرابی‌های سخت‌افزاری یا مشکلات ارتباطی خراب می‌شـوند یا پاسـخگو نیسـتند، تمرکز دارد. مکانیسـم‌های CFT تضـــمین می‌کنند که ســـیســـتم می‌تواند تا زمانی که آســـتانه مشخصی از گره‌ها فعال باشد $(N/2)+1)$، به کار خود ادامه دهد. در مقابل، BFT بر روی دسـتیابی به اجماع حتی زمانی که برخی از گره‌هـا بـه طور مخرب یـا غیرقـابـل پیش‌بینی رفتار می‌کنند، تاکید دارد. مکانیســـم‌های BFT به گونه‌ای طراحی شـــده‌اند که تعـداد معینی از گره‌های بیزانســـی (f) را تحمل کنند و در عین حال توافق بین دیگر گره‌های صـادق حفظ شود. در این حالت به N گره $(3f+1)$ برای تضـمین اجماع نیاز اسـت (Zhao, 2021). انتخاب بهترین الگوریتم تحمل خطا بسـتگی به مورد اسـتفاده

خاص و نیازهای شبکه دارد. مکانیسم‌های CFT مانند آنهایی که توسط Hyperledger Fabric پیاده‌سازی شده‌اند برای محیط‌های کنترل‌شده که احتمال گره‌های مخرب در آن کمتر است، مناسب هستند. این در حالی است که مکانیسم‌های BFT، مانند Quorum، برای شبکه‌های باز که در آن نودهای مخرب نگران‌کننده هستند، ایده‌آل هستند. در نتیجه، انتخاب بین CFT و BFT به عواملی مانند ماهیت شبکه، سطح رفتار خصمانه بالقوه و تعادل مطلوب بین سادگی و امنیت بستگی دارد (Podgorelec et al., 2019).

سازگاری: این جنبه پیچیده به امکان‌سنجی عملی اتخاذ یک راه‌حل بلاکچین خاص در چارچوب یک اکوسیستم فناورانه تثبیت‌شده می‌پردازد و شامل تعامل و سازگاری با فرآیندها و سیستم‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری موجود سازمانی و همچنین با سایر بسترهای بلاکچینی است (Lai & Liao, 2021; Belchior et al., 2021).

قابلیت همکاری با سیستم‌های موجود: توانایی یک پلتفرم بلاکچین برای ارتباط با برنامه‌های کاربردی نرم‌افزاری و زیرساخت‌های سخت‌افزاری از قبل موجود را دربرمی‌گیرد. یک ملاحظه اساسی این است که آیا بلاکچین می‌تواند به‌طور یکپارچه داده‌ها را مبادله کند و از همسویی آن با سیستم‌های قدیمی سازمان اطمینان حاصل شود؟

ادغام با دیگر بلاکچین‌ها: علاوه بر این، سازگاری فراتر از سیستم‌های منفرد سازمانی است و به هماهنگی با شبکه‌های بلاکچین متنوع می‌پردازد. در عصری که کنسرسیوم‌ها و شبکه‌ها رواج دارند، توانایی پلتفرم بلاکچین برای تعامل با دیگر نمونه‌های بلاکچین، به‌عنوان یک مزیت راهبردی ظاهر می‌شود. این سازگاری بین پلتفرمی، ایجاد اکوسیستم‌های پیچیده و بهم پیوسته را امکان‌پذیر می‌سازد که در آن زنجیره‌های مختلف به‌طور متقابل با یکدیگر در تعامل هستند.

انطباق با فرآیندهای موجود: یک عامل اساسی میزانی است که یک پلتفرم بلاکچین می‌تواند برای همسویی با فرآیندهای تجاری تثبیت شده تنظیم شود. معیار سازگاری شامل هماهنگی پلتفرم برای انطباق با گردش‌های کاری موجود، کاهش نیاز به تغییرات اساسی فرآیند و ایجاد یک انتقال روان‌تر به بسترهای بلاکچینی است (Belchior et al., 2021).

سهولت استفاده: شامل زیرساخت ساده و سهولت اجرا است که منجر به به ارتقا سطح تطبیق و حمایت جامعه کاربران سازمانی از پلتفرم بلاکچین می گردد (Nanayakkara et al., 2021). این معیار چند بعدی نه تنها پیچیدگی‌های فنی پیاده‌سازی، بلکه تجربه کلی کاربر را نیز دربرمی‌گیرد و پذیرش و پشتیبانی جامعه کاربران (اعم از ذینفعان داخلی و مشارکت‌کنندگان خارجی) را تقویت می‌کند.

ساده‌سازی زیرساخت‌ها: سنگ بنای سهولت استفاده در سادگی معماری پلتفرم نهفته است. زیرساخت کارآمد به کاهش پیچیدگی در راه‌اندازی و مدیریت شبکه بلاکچین منجر می‌شود.

ایجاد تعادل بین سادگی و عملکرد: ایجاد تعادل مناسب بین سهولت استفاده و عملکرد ضروری است. پلتفرم‌ها باید ویژگی‌های جامع و قابلیت‌های پیشرفته خود را در حالی که پیچیدگی سیستم انتزاع می‌شود، حفظ کنند.

یکپارچه‌سازی سازمانی: کسب‌وکارها به دنبال ادغام بلاکچین به‌طور یکپارچه در پشته فناوری موجود خود هستند. پلتفرمی که با فرآیندهای تثبیت شده موجود همسو می‌شود و در عین حال یکپارچه‌سازی ساده را ارائه می‌دهد، راه را برای پذیرش این فناوری هموار می‌کند.

محبوبیت: شامل درک مشتریان و چگونگی شناخته شدن این پلتفرم در بازار از نظر شهرت و تصویر برند است (Nanayakkara et al, 2021; Büyüközkan & Tüfekçi, 2021). تصویر برند معتبر، آگاهی گسترده از بازار و مشارکت فعال ذینفعان به جذابیت و پذیرش پلتفرم کمک می‌کند.

عوامل هزینه‌ای: هزینه‌های استفاده از بلاکچین را می‌توان به ساخت پلتفرم اولیه، هزینه‌های نصب یا استقرار، ذخیره‌سازی، نگهداری مداوم و نظارت طبقه‌بندی نمود (Büyüközkan & Tüfekçi, 2021; Yang et al., 2020).

ساخت اولیه پلتفرم: هزینه ساخت یک پلتفرم بلاکچین شامل توسعه معماری زیربنایی، قراردادهای هوشمند، مکانیسم‌های اجماع و هرگونه سفارشی‌سازی موردنیاز برای همسویی با موارد استفاده خاص است.

هزینه‌های نصب و راه‌اندازی: فرآیند استقرار یک پلتفرم بلاکچین شامل پیکربندی و راه‌اندازی زیرساخت شبکه، از جمله گره‌ها، مراکز داده و نحوه ارتباط است.

هزینه‌های استقرار: شامل تهیه سخت‌افزار، نصب نرم‌افزار، پیکربندی شبکه و زمان صرف شده برای اطمینان از آماده بودن پلتفرم برای عملیات است.

هزینه‌های ذخیره‌سازی: ماهیت تغییرناپذیر بلاکچین نیازمند راه‌حل‌های ذخیره‌سازی کارآمد و ایمن برای مدیریت رشد داده‌ها در طول زمان است.

نگهداری: شامل به‌روزرسانی‌ها، رفع اشکالات و موارد امنیتی و افزایش مستمر قابلیت‌های پلتفرم است.

نظارت و بهینه‌سازی عملکرد: پلتفرم باید با شناسایی فعالانه گلوگاه‌های عملکرد و آسیب‌پذیری‌های امنیتی بالقوه، نظارت زمان خرابی را به حداقل رساند و کارایی عملیاتی را حفظ کند.

پس از شناسایی و استخراج فاکتورهای موثر از مطالعات و ادبیات نظری، معیارهای مذکور برای اجماع و توافق نهایی در اختیار اعضای پنل قرار گرفته است. غربال‌گری و نهایی کردن معیارهای استخراج شده از طریق اجرای دلفی فازی تک مرحله‌ای انجام می‌شود. میانگین فازی و برون‌داد فازی‌زدایی شده مربوط به معیارهای مورد مطالعه در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. پذیرش و رد معیارها منوط به مقدار آستانه‌ای است که در پژوهش لحاظ شده است. با توجه به این امر که مقدار فازی‌زدایی نظرات کارشناسان برای تمامی پارامترها از حد آستانه (مقدار ۰/۷) بیشتر است، تمامی معیارها پذیرفته می‌شوند.

جدول ۱: تحلیل فازی پارامترهای موثر در ارزیابی پلتفرم‌ها

معیارها	میانگین فازی نظرات خبرگان	مقدار قطعی	نتایج
امنیت و حریم خصوصی	(۱ ، ۰/۹۶ ، ۰/۷۱)	۰/۹۱	پذیرش
جنبه های عملکردی	(۱ ، ۰/۹۳ ، ۰/۶۸)	۰/۸۸	پذیرش
مقیاس پذیری	(۱ ، ۰/۸۴ ، ۰/۵۸)	۰/۸۱	پذیرش
مکانیزم اجماع	(۱ ، ۰/۸۱ ، ۰/۵۵)	۰/۷۹	پذیرش
تحمل خطا	(۱ ، ۰/۸۷ ، ۰/۶۱)	۰/۸۴	پذیرش
سازگاری و تعامل	(۱ ، ۰/۸۴ ، ۰/۵۸)	۰/۸۱	پذیرش
سهولت استفاده	(۰/۹۶ ، ۰/۷۴ ، ۰/۴۸)	۰/۷۳	پذیرش
محبوبیت برند	(۰/۸۴ ، ۰/۷۳ ، ۰/۵۵)	۰/۷۱	پذیرش
هزینه	(۰/۹۶ ، ۰/۷۹ ، ۰/۵۳)	۰/۷۷	پذیرش

پس از اجماع و توافق نهایی در مورد معیارهای مورد مطالعه، میزان اهمیت معیارهای شناسایی شده از طریق روش بهترین بدترین برآورد می‌گردد. این روش به محاسبه اوزان معیارها براساس مقایسات زوجی انجام شده توسط پنل خبرگان می‌پردازد. بدین معنا که اهمیت نسبی معیارهای مورد مطالعه یک‌بار نسبت به مهم‌ترین و ارجح‌ترین شاخص و بار دیگر نسبت به کم اهمیت‌ترین شاخص تعیین می‌گردد. میانگین نظرات خبرگان در تعیین اهمیت نسبی مهم‌ترین معیار نسبت به دیگر معیارهای مورد مطالعه و رتبه بندی ترجیحی همه معیارها نسبت به کم اهمیت‌ترین معیار، در جدول شماره ۲ نشان داده است.

جدول ۲: رتبه بندی ترجیحی معیارها نسبت به یکدیگر

مهم ترین عامل (امنیت)		کم اهمیت‌ترین عامل (برند)	
جنبه عملکردی	۲/۲۵	امنیت	۶/۷۵
مقیاس پذیری	۱/۸۷۵	جنبه عملکردی	۴/۸۷۵
مکانیزم اجماع	۱/۷۵	مقیاس پذیری	۵/۱۲۵
تحمل خطا	۱/۶۲۵	مکانیزم اجماع	۵/۳۷۵
سازگاری	۲/۱۲۵	تحمل خطا	۵/۳۷۵
سهولت استفاده	۲/۶۲۵	سازگاری	۵/۱۲۵
محبوبیت برند	۳/۰۰	سهولت استفاده	۴/۷۵
هزینه	۲/۱۲۵	هزینه	۴/۸۷۵

پس از رتبه‌بندی ترجیحی همه معیارها، وزن بهینه شاخص‌ها و مقدار بهینه ξ^L محاسبه می‌گردد. مقدار بهینه ξ^L (۰/۰۶۷) سازگاری مقایسات زوجی را نشان می‌دهد. هرچقدر که این مقدار به صفر نزدیک باشد، سازگاری نظرات و مقایسات زوجی صورت گرفته توسط خبرگان بیشتر است. میزان اهمیت و وزن بهینه معیارها در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: وزن بهینه پارامترهای مورد مطالعه

معیارها	وزن معیارها	ξ^L
امنیت و حریم خصوصی	۰/۱۶۴	۰/۰۶۷
جنبه های عملکردی	۰/۱۰۲	
مقیاس پذیری	۰/۱۲۳	
مکانیزم اجماع	۰/۱۳۲	
تحمل خطا	۰/۱۴۲	
سازگاری و تعامل	۰/۱۰۸	
سهولت استفاده	۰/۰۸۸	
محبوبیت برند	۰/۰۳۲	
هزینه	۰/۱۰۸	

کسب‌وکارها و موسسات می‌توانند از میان طیف وسیعی از پلتفرم‌های بلاکچین، اقدام به انتخاب نمایند. با این حال، داده‌ها نشان می‌دهند که تنها چهار چارچوب و پلتفرم اصلی بر بازار تسلط دارند. مجموعه هایپرلجر (با پرچم‌داری و پیشتازی هایپرلجر فابریک[8]) متداول‌ترین پلتفرمی است که توسط سازمان‌ها پذیرفته می‌شود (سهم بازار ۴۸٪)، و پس از آن کوردا[9]

8 Hyperledger Fabric
9 Corda

(۱۵٪)، مولتی‌چین[10] (۱۰٪) و کورم[11] (۶٪) از دیگر رهبران در فضای بلاکچین سازمانی به‌شمار می‌روند و از نظر شاخص‌های توسعه و فعالیت نیز متمایز عمل می‌کنند [۶۵]. از این رو، در مطالعه حاضر چهار چارچوب و پلتفرم اصلی مذکور به‌عنوان راه‌حل‌های پیش روی سازمان‌ها درنظرگرفته می‌شوند. همچنین از نظر نه معیار شناسایی شده (شامل امنیت، توان عملیاتی و تاخیر، مقیاس‌پذیری، مکانیزم اجماع، تحمل خطا، سازگاری، سهولت استفاده، محبوبیت برند و هزینه) و با استفاده از روش تاپسیس فازی مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرند.

روش تاپسیس مستلزم رتبه‌بندی ترجیحی گزینه‌های جایگزین از طریق خبرگان است. اما اغلب برای خبرگان دشوار است که رتبه‌بندی دقیقی را برای گزینه‌های جایگزین ارائه دهند. بر این اساس، در مطالعه حاضر از اعداد فازی مثلثی برای تبدیل قیود زبانی بهره گرفته شده است. با توجه به این نکته که اعداد فازی در محدوده [۰،۱] قرار دارند، نیاز به نرمال‌سازی ماتریس تصمیم وجود ندارد. با ضرب ماتریس تجمیع شده از امتیازات فازی در وزن معیارها، ماتریس تصمیم فازی نرمال وزنی حاصل می‌گردد که در جدول شماره ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴: ماتریس تصمیم فازی نرمال وزنی

معیار / پلتفرم	امنیت و حریم خصوصی			جنبه‌های عملکردی		
	u_i	m_i	l_i	u_i	m_i	l_i
H. Fabric	۰/۱۶۴	۰/۱۱۹	۰/۰۶۶	۰/۱۰۲	۰/۰۹۷	۰/۰۶۱
Quorum	۰/۱۶۴	۰/۱۱۱	۰/۰۶۶	۰/۰۸۲	۰/۰۴۹	۰/۰۲
Corda	۰/۱۶۴	۰/۱۱۹	۰/۰۶۶	۰/۱۰۲	۰/۰۵۶	۰/۰۲
Multichain	۰/۱۳۱	۰/۰۷۴	۰/۰۳۳	۰/۰۶۱	۰/۰۴۱	۰/۰۲

معیار / پلتفرم	مقیاس پذیری			مکانیزم اجماع		
	u_i	m_i	l_i	u_i	m_i	l_i
H. Fabric	۰/۱۲۳	۰/۱۰۴	۰/۰۴۹	۰/۱۳۲	۰/۰۹۹	۰/۰۵۳
Quorum	۰/۱۲۳	۰/۰۷۷	۰/۰۲۵	۰/۱۳۲	۰/۰۸۹	۰/۰۵۳
Corda	۰/۱۲۳	۰/۰۸	۰/۰۲۵	۰/۱۳۲	۰/۰۸۲	۰/۰۵۳
Multichain	۰/۰۹۸	۰/۰۶۵	۰/۰۲۵	۰/۱۰۵	۰/۰۵۹	۰/۰۲۶

معیار / پلتفرم	تحمل خطا			سازگاری و تعامل		
	u_i	m_i	l_i	u_i	m_i	l_i
H. Fabric	۰/۱۴۲	۰/۱۱۳	۰/۰۵۷	۰/۱۰۸	۰/۰۷۳	۰/۰۴۳
Quorum	۰/۱۱۳	۰/۰۷۴	۰/۰۲۸	۰/۱۰۸	۰/۰۷	۰/۰۴۳
Corda	۰/۱۴۲	۰/۰۷۴	۰/۰۲۸	۰/۱۰۸	۰/۰۶۸	۰/۰۴۳
Multichain	۰/۱۱۳	۰/۰۶	۰/۰۲۸	۰/۰۸۷	۰/۰۴۹	۰/۰۲۲

معیار / پلتفرم	سهولت استفاده			محبوبیت برند		
	u_i	m_i	l_i	u_i	m_i	l_i
H. Fabric	۰/۰۸۸	۰/۰۵۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲	۰/۰۲۶
Quorum	۰/۰۷	۰/۰۴۶	۰/۰۱۸	۰/۰۲۶	۰/۰۱۹	۰/۰۱۳
Corda	۰/۰۷	۰/۰۵۳	۰/۰۳۵	۰/۰۳۲	۰/۰۲۷	۰/۰۱۹
Multichain	۰/۰۷	۰/۰۳۷	۰/۰۱۸	۰/۰۳۲	۰/۰۱۶	۰/۰۰۶

معیار / پلتفرم	عوامل هزینه ای			ضریب و فاصله از ایده آل		
	u_i	m_i	l_i	*FPIS*	*FNIS*	*FPIS*
H. Fabric	۰/۰۸۷	۰/۰۴۹	۰/۰۲۲	۷/۴۰	۱/۶۴	۷/۴۰
Quorum	۰/۰۶۵	۰/۰۴۳	۰/۰۲۲	۷/۵۱	۱/۵۴	۷/۵۱
Corda	۰/۰۸۷	۰/۰۴۶	۰/۰۲۲	۷/۴۸	۱/۵۷	۷/۴۸
Multichain	۰/۰۸۷	۰/۰۵۷	۰/۰۲۲	۷/۶۳	۱/۴۲	۷/۶۳

روش تاپسیس به‌عنوان یک تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره بر این اصل کار می‌کند که گزینه منتخب دارای حداقل فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و حداکثر فاصله از راه‌حل ایده‌آل منفی است. جدول شماره ۵ فواصل ایده‌آل و ضریب نزدیکی چهار پلتفرم مورد مقایسه را نشان می‌دهد. ضریب‌های نزدیکی به دست آمده در فاصله ۰ و ۱ قرار دارند. هرچقدر که ضریب نزدیکی گزینه به ۱ نزدیک‌تر باشد، گزینه مورد نظر دارای اولویت بالاتر است. بر این اساس، هایپرلجر فابریک با بیشترین ضریب نزدیکی به عنوان ارجح‌ترین گزینه و مولتی‌چین با کمترین ضریب نزدیکی به عنوان آخرین اولویت در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۵. فواصل ایده‌آل و ضریب نزدیکی پلتفرم ها

ضریب / پلتفرم	فاصله از ایده آل مثبت	فاصله از ایده آل منفی	ضریب نزدیکی	اولویت
H. Fabric	۷/۴۰	۱/۶۴	۰/۱۸۱	۱
Quorum	۷/۵۱	۱/۵۴	۰/۱۷۰	۳
Corda	۷/۴۸	۱/۵۷	۰/۱۷۳	۲
Multichain	۷/۶۳	۱/۴۲	۰/۱۵۷	۴

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بلاکچین فناوری است که از اعتبار سنجی جامعه برای همگام نگه داشتن محتوای دفتر کل بین چندین کاربر استفاده می‌کند و به آن‌ها اجازه می‌دهد تا به اطلاعات و خروجی‌های تقریبا تغییرناپذیر یک سیستم، بدون اینکه لزوما نیاز به تایید نهاد مرکزی باشد، اعتماد کنند. این فناوری اخیراً با کاربردهایی در صنایع کلیدی مانند امور مالی، بیمه، لجستیک، انرژی و حکمرانی همراه بوده است و با زدودن ساختارهای سنتی و عملکردهای تجاری غالبا فرسوده و ناکارآمد، تحولات چشم‌گیر فنی، اقتصادی و قانونی را به دنبال داشته است. در صنایع متعدد، بلاکچین‌های سازمانی به عنوان راه‌حلی برای ایجاد استانداردهای داده مشترک در بین

10 MultiChain

11 Quorum

سازمان‌ها، حذف نهادهای واسط، تسهیل تطبیق سوابق برای کمک به بهبود کارایی و ایجاد خدمات جدید تلقی می‌شوند. با این وجود، پذیرش و پیاده‌سازی بلاکچین یک فرآیند کند و چالش‌برانگیز است که به هماهنگی عمیق بین سازمانی، انتخاب‌های دقیق قانونی و پیکربندی مجدد نیازمند است.

انتخاب یک فریم‌ورک بلاکچین کارآمد می‌تواند توسعه و استقرار برنامه‌های بلاکچین را ساده‌سازی کند (Quasim et al., 2020). نتایج حاصل از مرور مطالعات و ادبیات نظری نشان می‌دهد که نه معیار فنی و غیرفنی (شامل امنیت، توان عملیاتی و تاخیر، مقیاس‌پذیری، مکانیزم اجماع، تحمل خطا، سازگاری، سهولت استفاده، محبوبیت برند و هزینه)، در انتخاب و ارزیابی پلتفرم‌های بلاکچین از اهمیت شایان توجهی برخوردارند. در میان معیارهای مذکور، امنیت و حریم خصوصی (با میزان اهمیت ۰/۱۶)، تحمل خطا (با میزان اهمیت ۰/۱۴) و مکانیزم اجماع (با میزان اهمیت ۰/۱۳) از ارجح‌ترین معیار ارزیابی به‌شمار می‌روند. سایر پارامترهای مورد مطالعه شامل مقیاس پذیری (۰/۱۲)، سازگاری و تعامل (۰/۱۱)، عوامل هزینه‌ای (۰/۱۱)، جنبه‌های عملکردی (۰/۱۰)، سهولت استفاده (۰/۰۸) و محبوبیت برند (۰/۰۳)، به ترتیب در اولویت‌های بعدی معیارهای موثر در ارزیابی پلتفرم‌های بلاکچین خصوصی قرار می‌گیرند. همچنین، نتایج حاصل از مقایسه چهار پلتفرم مسلط در بازار (هایپرلجر فابریک، کوردا، مولتی‌چین و کروم) حاکی از آن است که هایپرلجر فابریک متداول‌ترین پلتفرمی است که توسط سازمان‌ها پذیرفته می‌شود و از نظر معیارهای مورد مطالعه (به ویژه معیارهای عملکردی، مقیاس‌پذیری و محبوبیت برند) در جایگاه متمایزی نسبت به دیگر رقبای خود و پلتفرم‌های مشابه قرار دارد.

پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه به نحوی تعیین شده‌اند که در صنایع مختلف قابل تعمیم باشند. با این وجود، در نظر داشتن ملاحظات زیر ضروری است:

۱. تضمین امنیت به معنای شناسایی آسیب‌پذیری‌ها و کاهش خطرات در سطح جزء و در سطح سیستم است. فناوری بلاکچین یک دفتر کل از محتوای تغییرناپذیر و ضد دستکاری ایجاد می‌کند که به نوعی کیفیت و امنیت ذاتی داده‌های موجود در زنجیره را نشان می‌دهد. با این حال، شبکه‌های بلاکچین از حملاتی مانند فیشینگ و سیبل مصون نیستند و به کنترل‌های امنیتی در حوزه‌هایی همچون مدیریت هویت و دسترسی، امنیت قرارداد هوشمند و ارتباط امن نیازمندند. از این رو، هر سازمان براساس میزان حساسیت صنعت باید به تعیین سطح مطلوب امنیت و ارزیابی نوع تکنیک‌های حریم خصوصی در پلتفرم‌های مبتنی بر بلاکچین اقدام نماید.

۲. الگوریتم اجماع نشان‌دهنده یک فرآیند خاص است که یک پلتفرم بلاکچین به‌منظور دستیابی به توافق بین همتایان در مورد الحاق هر بلوک به شبکه بلاکچین، اجرا می‌کند. در حال حاضر انواع مختلفی از الگوریتم‌های اجماع مطرح می‌شوند که هر کدام سطوح کارایی عملکرد، امنیت و قابلیت اطمینان متفاوتی را ارائه می‌دهند. تعیین این امر که کدام یک از مکانیزم‌های اجماع در سازمان موثرتر عمل می‌کند به پارامترهای متعددی مانند نوع بلاکچین، مقیاس‌پذیری، توان عملیاتی و مصرف انرژی متکی است.

۳. یک بلاکچین عمومی می‌تواند شکست هر گره معین یا گروهی از گره‌ها را به دلیل اصول تحمل خطای بیزانسی یک شبکه بسیار بزرگ و اجماع ایجاد شده توسط گره‌های باقی مانده تحمل کند. با این حال، با توجه به ماهیت ادغام‌شده‌تر بلاکچین‌های سازمانی در تعداد نسبتاً کمی از گره‌ها، شکست نودها می‌تواند زنجیره بلوکی را به خطر بیندازد؛ زیرا یک همبستگی قوی بین تعداد گره‌های درگیر در اجماع و سطح تحمل خطای مورد نیاز برای هر گره در یک بلاکچین خصوصی و سازمانی وجود دارد (Clifford & Logan, 2018). به‌منظور اطمینان از در دسترس بودن مستمر و انعطاف‌پذیری کسب‌وکار، بلاکچین‌های سازمانی معمولاً نیاز بیشتری به تحمل خطا بر اساس هر گره نشان می‌دهند. با این وجود، ارزیابی صحیح از معیار تحمل خطا در هر پلتفرم در تعامل با سایر پارامترهای عملکردی، اجماع، هزینه و... صورت می‌پذیرد.

فهرست منابع

Alazab, M., Alhyari, S., Awajan, A., & Abdallah, A. B. (2021). Blockchain technology in supply chain management: An empirical study of the factors affecting user adoption/acceptance. *Cluster Computing, 24*(1), 83-101. https://doi.org/10.1007/s10586-020-03200-4

Almeshal, T. A., & Alhogail, A. A. (2021). Blockchain for businesses: A scoping review of suitability evaluations frameworks. *IEEE Access, 9*, 137452-137464. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3128608

Ante, L., Sandner, P., & Fiedler, I. (2018). Blockchain-based ICOs: Pure hype or the dawn of a new era of startup financing? *Journal of Risk and Financial Management, 11*(4), 80. https://www.mdpi.com/1911-8074/11/4/80

Aste, T., Tasca, P., & Di Matteo, T. (2017). Blockchain technologies: The foreseeable impact on society and industry. *Computer, 50*(9), 18-28.

Bashir, I. (2017). *Mastering blockchain*. Packt Publishing Ltd.

Belchior, R., Vasconcelos, A., Guerreiro, S., & Correia, M. (2021). A survey on blockchain interoperability: Past, present, and future trends. *ACM Computing Surveys (CSUR), 54*(8), 1-41. https://doi.org/10.1145/3471140

Berson, A. (1996). *Client/server architecture*. McGraw-Hill, Inc.

Beygelzimer, A., Kephart, J., & Rish, I. (2007). Evaluation of optimization methods for network bottleneck diagnosis. In *Fourth International Conference on Autonomic Computing (ICAC'07)* (pp. 20-20). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICAC.2007.15

Burgess, K., & Colangelo, J. (2015). The promise of bitcoin and the blockchain. *Consumers' Research*.

Büyüközkan, G., & Tüfekçi, G. (2021). A decision-making framework for evaluating appropriate business blockchain platforms using multiple preference formats and VIKOR. *Information Sciences, 571*, 337-357. https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.04.044

Cachin, C., & Vukolić, M. (2017). *Blockchain consensus protocols in the wild* (arXiv preprint arXiv:1707.01873). https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.01873

Chaudhry, N., & Yousaf, M. M. (2018). Consensus algorithms in blockchain: Comparative analysis, challenges and opportunities. In *2018 12th International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST)* (pp. 54-63). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICOSST.2018.8632190

Chazhaeva, M. M., Serebryakova, A. A., Tashkulova, G. K., & Atabekova, N. K. (2019). Sustainable development of the digital economy on the basis of managing social and technological threats. In *Institute of Scientific Communications Conference* (pp. 49-56). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29586-8_6

Chi, L., & Zhu, X. (2017). Hashing techniques: A survey and taxonomy. *ACM Computing Surveys (CSUR), 50*(1), 1-36. https://doi.org/10.1145/3047307

Clifford, F., & Logan, P. (2018). *The role of fault tolerance for blockchain*.

Croman, K., et al. (2016). On scaling decentralized blockchains. In *International Conference on Financial Cryptography and Data Security* (pp. 106-125). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53357-4_8

Dabbagh, M., Choo, K.-K. R., Beheshti, A., Tahir, M., & Safa, N. S. (2021). A survey of empirical performance evaluation of permissioned blockchain platforms: Challenges and opportunities. *Computers & Security, 100*, 102078. https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.102078

Damgard, I. B. (1989). A design principle for hash functions. In *Conference on the Theory and Application of Cryptology*. Springer. https://doi.org/10.1007/0-387-34805-0_39

Hamida, E. B., Brousmiche, K. L., Levard, H., & Thea, E. (2017). Blockchain for enterprise: Overview, opportunities and challenges. In *The Thirteenth International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC 2017)*.

Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making*. Springer.

Ilieva, G., Yankova, T., Radeva, I., & Popchev, I. (2021). Blockchain software selection as a fuzzy multi-criteria problem. *Computers, 10*(10), 120. https://www.mdpi.com/2073-431X/10/10/120#

Karayazi, F., & Bereketli, I. (2020). Criteria weighting for blockchain software selection using fuzzy AHP. In *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems* (pp. 608-615). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51156-2_70

Kuo, T.-T., Zavaleta Rojas, H., & Ohno-Machado, L. (2019). Comparison of blockchain platforms: A systematic review and healthcare examples. *Journal of the American Medical Informatics Association, 26*(5), 462-478. https://doi.org/10.1093/jamia/ocy185

Lai, H., & Liao, H. (2021). A multi-criteria decision making method based on DNMA and CRITIC with linguistic D numbers for blockchain platform evaluation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 101*, 104200. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104200

Li, W., Sforzin, A., Fedorov, S., & Karame, G. O. (2017). Towards scalable and private industrial blockchains. In *Proceedings of the ACM Workshop on Blockchain, Cryptocurrencies and Contracts* (pp. 9-14). https://doi.org/10.1145/3055518.3055531

Lou, A. T., & Li, E. Y. (2017). *Integrating innovation diffusion theory and the technology acceptance model: The adoption of blockchain technology from business managers' perspective*.

Mainelli, M., & Smith, M. (2015). Sharing ledgers for sharing economies: An exploration of mutual distributed ledgers (aka blockchain technology). *Journal of Financial Perspectives, 3*(3).

Maly, R. J., Mischke, J., Kurtansky, P., & Stiller, B. (2003). *Comparison of centralized (client-server) and decentralized (peer-to-peer) networking* [Semester thesis, ETH Zurich].

McDaniel, C. A., & Norberg, H. C. (2019). *Can blockchain technology facilitate international trade?* Mercatus Research Paper.

Min, H. (2019). Blockchain technology for enhancing supply chain resilience. *Business Horizons, 62*(1), 35-45. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.08.012

Mingxiao, D., Xiaofeng, M., Zhe, Z., Xiangwei, W., & Qijun, C. (2017). A review on consensus algorithm of blockchain. In *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (pp. 2567-2572). IEEE. https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8123011

Monrat, A. A., Schelén, O., & Andersson, K. (2020). Performance evaluation of permissioned blockchain platforms. In *2020 IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE)* (pp. 1-8). IEEE.

Morkunas, V. J., Paschen, J., & Boon, E. (2019). How blockchain technologies impact your business model. *Business Horizons, 62*(3), 295-306.

Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized Business Review*, 21260.

Nanayakkara, S., Rodrigo, M., Perera, S., Weerasuriya, G. T., & Hijazi, A. A. (2021). A methodology for selection of a blockchain platform to develop an enterprise system. *Journal of Industrial Information Integration, 23*, 100215. https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100215

Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., & Goldfeder, S. (2016). *Bitcoin and cryptocurrency technologies: A comprehensive introduction*. Princeton University Press.

Narayanan, A., & Clark, J. (2017). Bitcoin's academic pedigree. *Communications of the ACM, 60*(12), 36-45. https://doi.org/10.1145/3132259

Nguyen, G.-T., & Kim, K. (2018). A survey about consensus algorithms used in blockchain. *Journal of Information Processing Systems, 14*(1), 101-128. https://doi.org/10.3745/JIPS.01.0024

Oliveira, M. T., et al. (2019). Towards a performance evaluation of private blockchain frameworks using a realistic workload. In *2019 22nd Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops (ICIN)* (pp. 180-187). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICIN.2019.8685888

Pahlajani, S., Kshirsagar, A., & Pachghare, V. (2019). Survey on private blockchain consensus algorithms. In *2019 1st International Conference on Innovations in Information and Communication Technology (ICIICT)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICIICT1.2019.8741353

Patsch, R. (2020). *Survey on Hyperledger Fabric and comparison of Blockchain as a Service Providers* [PhD thesis, University of Applied Sciences].

Podgorelec, B., Keršič, V., & Turkanović, M. (2019). Analysis of fault tolerance in permissioned blockchain networks. In *2019 XXVII International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICAT47117.2019.8938836

Popkova, E. G., & Sergi, B. S. (2020). *Digital economy: Complexity and variety vs. rationality*.

Preneel, B. (1994). Cryptographic hash functions. *European Transactions on Telecommunications, 5*(4), 431-448. https://doi.org/10.1002/ett.4460050406

Quasim, M. T., Khan, M. A., Algarni, F., Alharthy, A., & Alshmrani, G. M. M. (2020). Blockchain frameworks. In *Decentralised internet of things* (pp. 75-89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38677-1_4

Raman, R., & Raj, B. E. (2021). The world of NFTs (non-fungible tokens): The future of blockchain and asset ownership. In *Enabling blockchain technology for secure networking and communications* (pp. 89-108). IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5839-3.ch005

Rauchs, M., Blandin, A., Bear, K., & McKeon, S. B. (2019). *2nd global enterprise blockchain benchmarking study*. SSRN. https://doi.org/10.2139/ssrn.3461765

Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega, 53*, 49-57.

Schollmeier, R. (2001). A definition of peer-to-peer networking for the classification of peer-to-peer architectures and applications. In *Proceedings First International Conference on Peer-to-Peer Computing* (pp. 101-102). IEEE. https://doi.org/10.1109/P2P.2001.990434

Soni, S., & Bhushan, B. (2019). A comprehensive survey on blockchain: Working, security analysis, privacy threats and potential applications. In *2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)* (Vol. 1, pp. 922-926). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICICICT46008.2019.8993210

Stifter, N., Judmayer, A., & Weippl, E. (2019). Revisiting practical byzantine fault tolerance through blockchain technologies. In *Security and Quality in Cyber-Physical Systems Engineering* (pp. 471-495). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25312-7_17

Swan, M. (2015). *Blockchain: Blueprint for a new economy*. O'Reilly Media, Inc.

Tan, W. K. A., & Sundarakani, B. (2020). Assessing blockchain technology application for freight booking business: A case study from Technology Acceptance Model perspective. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing, 13*(3), 263-286. https://doi.org/10.1108/JGOSS-04-2020-0018

Thanh, N. V. (2022). Blockchain development services provider assessment model for a logistics organizations. *Processes, 10*(6), 1209.

Udokwu, C., Kormiltsyn, A., Thangalimodzi, K., & Norta, A. (2018). The state of the art for blockchain-enabled smart-contract applications in the organization. In *2018 Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS)* (pp. 137-144). IEEE. https://doi.org/10.1109/ISPRAS.2018.00029

Ullah, I., Kanhere, S. S., & Boreli, R. (2020). *Privacy-preserving targeted mobile advertising: A blockchain-based framework for mobile ads* (arXiv preprint arXiv:2008.10479). https://doi.org/10.36227/techrxiv.12845717.v1

Viriyasitavat, W., & Hoonsopon, D. (2019). Blockchain characteristics and consensus in modern business processes. *Journal of Industrial Information Integration, 13*, 32-39. https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.07.004

Wang, Y., Zhao, Q., & Zheng, D. (2005). Bottlenecks in production networks: An overview. *Journal of Systems Science and Systems Engineering, 14*(3), 347-363. https://doi.org/10.1007/s11518-006-0198-3

Xu, M., Chen, X., & Kou, G. (2019). A systematic review of blockchain. *Financial Innovation, 5*(1), 1-14. https://doi.org/10.1186/s40854-019-0147-z

Yaga, D., Mell, P., Roby, N., & Scarfone, K. (2019). *Blockchain technology overview* (arXiv preprint arXiv:1906.11078). https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.11078

Yang, B., & Garcia-Molina, H. (2002). Improving search in peer-to-peer networks. In *Proceedings 22nd International Conference on Distributed Computing Systems* (pp. 5-14). IEEE.

Yang, R., et al. (2020). Public and private blockchain in construction business process and information integration. *Automation in Construction, 118*, 103276. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103276

Yang, W., Garg, S., Huang, Z., & Kang, B. (2021). A decision model for blockchain applicability into knowledge-based conversation system. *Knowledge-Based Systems, 220*, 106791.

Zhang, R., Xue, R., & Liu, L. (2019). Security and privacy on blockchain. *ACM Computing Surveys (CSUR), 52*(3), 1-34. https://doi.org/10.1145/3316481

Zhao, W. (2021). *From traditional fault tolerance to blockchain*. John Wiley & Sons.

Zhou, Q., Huang, H., Zheng, Z., & Bian, J. (2020). Solutions to scalability of blockchain: A survey. *IEEE Access, 8*, 16440-16455. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2967218