

REVIEW PAPER

Application of Blockchain Technology in Construction Site Safety Management: A Systematic Review of Solutions, Challenges, and Future Directions

Sediqueh Jafarimanesh¹, Ali Kamali Ardakani^{2*}

¹Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran.

²Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Received: 2025/06/04

Accepted: 2026/06/07

ABSTRACT

Introduction: The construction industry is among the most hazardous economic sectors, demanding innovative approaches to strengthen safety management. Due to its transparency, immutability, and automated smart contracts, blockchain technology has emerged as a powerful enabler of safer construction sites. This systematic review is among the first comprehensive efforts to evaluate the applications of blockchain in construction safety management.

Material and Methods: Guided by PRISMA, comprehensive searches of Web of Science, Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, and Google Scholar identified studies published between 2015 and 2025. Eighteen articles met the inclusion criteria and were synthesized through narrative review and thematic analysis.

Results: Blockchain applications have clustered into four domains: safety monitoring and inspection, safety reporting and information management, worker-centered safety solutions, and specialized construction safety applications. Reported benefits have included heightened data integrity and security, enhanced transparency and accountability, operational efficiencies, and reinforcement of a proactive safety culture. Nevertheless, significant challenges have persisted, notably technical complexity, integration and adoption barriers, implementation costs, and governance and regulatory constraints. Future research should prioritize the convergence of blockchain with the Internet of Things (IoT) and artificial intelligence (AI), as well as large-scale implementation and validation studies, advanced security frameworks, and enhanced user experience.

Conclusion: Evidence indicates that blockchain can substantially improve safety performance on construction sites. However, scaling from proof-of-concept to industry-wide deployment requires overcoming considerable technical, organizational, and legal hurdles. Close collaboration among researchers, and industry practitioners, is essential to unlock the full potential of blockchain and translate it into tangible safety outcomes.

Keywords: Blockchain, Safety management, Construction, Systematic review.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Jafarimanesh S., Kamali Ardakani A. Application of Blockchain Technology in Construction Site Safety Management: A Systematic Review of Solutions, Challenges, and Future Directions. *J Health Saf Work*. 2026; 16(2): 486-508.

* Corresponding Author Email: aliardakani78@gmail.com

Copyright © 2026 The Authors.

Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

Construction is consistently among the most hazardous industries, and reducing preventable harm remains a priority for employers, regulators, and workers. Despite improvements in standards and training, several structural gaps continue to undermine safety performance: safety information is dispersed across incompatible systems, reporting of incidents and near-misses is often delayed or incomplete, tracking worker credentials and permits is difficult across multi-tier subcontracting, and accountability can be diluted when many stakeholders share responsibilities. Blockchain technology—distributed ledgers with tamper-evident records and programmable smart contracts—has been proposed as a trust layer to counter these gaps. This study systematically synthesizes how blockchain has been used in construction-site safety management, what benefits and limitations have been observed, and which research and implementation directions appear most promising.

2. MATERIAL AND METHODS

This systematic review followed PRISMA 2020 guidance. Primary searches targeted Web of Science and Scopus because they index peer-reviewed, citation-tracked literature across engineering and occupational safety. To improve coverage and capture emerging prototypes, supplementary searches were performed on ScienceDirect, IEEE Xplore, and Google Scholar. The strategy combined the terms “blockchain” OR “distributed ledger” with “construction site” OR “jobsite” OR “construction”, and with “safety”, “accident”, or “occupational safety and health/OSH”. Queries were mapped to each database’s syntax (e.g., TITLE-ABS-KEY in Scopus; TS= in Web of Science; Title/Abstract/Keywords in ScienceDirect; All Metadata with field limits in IEEE Xplore). The time window spanned January 2015 to August 2025 because meaningful applications of blockchain to construction and safety began to appear after 2015. Searches were first run on 5 January 2025, updated on 13 April 2025, and finalized on 15 August 2025. Inclusion criteria were peer-reviewed studies directly addressing blockchain applications in construction safety, available in full text and in English. Exclusions were non-peer-reviewed materials and studies focused solely on BIM or logistics without a safety component. Two reviewers independently screened titles/abstracts and then full texts; disagreements

were resolved by consensus. Of 352 initial records, 94 duplicates were removed; 68 full-text articles were assessed; 18 studies met the inclusion criteria. Data were extracted into standardized forms and analyzed via narrative synthesis and thematic analysis. Coding and memoing were performed in MAXQDA 2020 using a hybrid codebook: deductive parent codes aligned with the study objectives (applications, benefits, challenges, future directions) and inductive child codes refined through iterative reading. Code System and Code Matrix Browser views supported pattern review and cross-study comparisons. Themes were defined and named following Braun and Clarke’s six-phase approach to thematic analysis.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Four application domains emerged:

- **Safety monitoring and inspection:** Prototypes and frameworks anchored inspection records and sensor outputs (e.g., computer vision, RFID, and other IoT streams) onto a ledger to secure integrity and enable auditable traceability. Smart contracts encoded acceptance criteria and triggered alerts or holds when rule violations were detected. Hybrid on/off-chain designs were common: heavy video or image data were retained off-chain (e.g., in content-addressable storage) while cryptographic hashes and metadata were stored on-chain for provenance. These solutions were most impactful in time-critical, high-risk operations such as scaffolding work, lifting, and confined-space entry, where latency and trust in evidence are paramount.
- **Safety reporting and information management:** Several studies proposed incident and near-miss registries with immutable, time-stamped entries and role-based access. Permissioned consortium blockchains (e.g., Hyperledger Fabric) supported low-latency collaboration among contractors, clients, and regulators, while public or semi-public chains (e.g., Ethereum) were used alongside off-chain storage to improve transparency. Privacy-preserving designs included anonymous or pseudonymous reporting, selective disclosure using cryptographic proofs, and reputation-based access to limit unnecessary exposure of personal data. Token-mediated incentives were explored to counter chronic underreporting of near-misses by rewarding timely, high-quality submissions without compromising privacy.
- **Worker-centered safety:** Ledger-backed credentials and training records reduced

ambiguity around authorizations and expiry dates. Integration with mobile apps and smart wearables enabled personalized risk notifications and proof-of-attendance for toolbox talks and safety inductions. Some systems combined tokenized incentives with immersive training (e.g., virtual reality) to increase engagement and retention, translating into higher adherence to PPE and procedures. These approaches are particularly relevant for dynamic worksites with frequent workforce turnover and layered subcontracting.

- **Specialized safety applications:** Beyond generic processes, blockchain supported domain-specific needs such as scaffolding lifecycle control (erection, inspection, handover), high-risk-task permitting, and collaborative governance frameworks based on federated learning. By coordinating model updates while keeping raw data local, federated designs aimed to balance analytics utility with privacy and data-sovereignty requirements.

Benefits clustered around four consistent outcomes. First, data integrity and security improved through tamper-evident records and verifiable provenance. Second, transparency and accountability increased by establishing a shared source of truth across stakeholders, which helped to shorten the time-to-closure of corrective actions and reduce rework associated with disputed records. Third, operational efficiency improved via automation of checks and notifications through smart contracts. Fourth, several studies reported cultural gains, with incentives and auditable feedback channels encouraging proactive behaviors and more complete reporting.

Barriers were also recurrent. Scalability and storage constraints were prominent where rich media are involved; practical designs therefore favored off-chain storage and on-chain anchoring. Oracle trust and integration with external systems remained a risk, requiring signed sensors, multi-source validation, and robust exception handling. Organizational adoption hurdles included change management, skill gaps, and uncertainty about costs and benefits; these were mitigated by staged, low-risk pilots (e.g., near-miss reporting or inspection logs) accompanied by before/after metrics. Privacy and regulatory concerns called for privacy-by-design patterns—permissioned networks, minimal on-chain personal data, and cryptographic proofs—to comply with data-protection obligations while retaining auditability.

Context of effectiveness: Evidence suggests stronger benefits in multi-party, high-risk projects—such as large commercial or infrastructure works—where coordination costs and accountability demands are high. Conversely, in small projects with low digital maturity and limited stakeholder diversity, benefits were modest relative to setup and maintenance costs. Therefore, organizations should prioritize use cases with clear pain points (e.g., fragmented inspection evidence, chronic underreporting, or slow closure of non-conformities) and measurable outcomes.

Illustrative cases: (a) A consortium-chain inspection log automatically triggered holds when mandatory checks were missed, with supervisors receiving ledger-verified alerts; (b) an incident registry on a public chain used off-chain storage and cryptographic anchors to ensure integrity while enabling selective disclosure; (c) a privacy-preserving near-miss channel combined anonymous submissions with token-based recognition and zero-knowledge proofs of eligibility; and (d) a federated-learning governance framework coordinated safety analytics across contractors without centralizing raw worker data. Across these cases, success factors included clear governance, minimal viable contracts, simple user interfaces for field conditions, and integration with existing workflows and BIM/CM tools.

Practical guidance: For early pilots, three entry points are recommended: credential and training records; non-conformance/corrective-action logs; and privacy-aware near-miss reporting. Architectures should be hybrid (hashes and metadata on-chain; content off-chain), permissioned when latency and cost matter, and instrumented with metrics such as time-to-closure of corrective actions, near-miss reports per 100 worker-months, and completeness/accuracy of logs. Security should incorporate formal review of smart contracts, least-privilege access, and emergency-stop mechanisms. Finally, a staged roadmap—from prototype to controlled pilot to multi-project deployment—supports learning and risk control while building stakeholder trust.

4. CONCLUSIONS

Blockchain can materially improve how construction-site safety information is captured, verified, and acted upon. Its strongest value lies in establishing a trustworthy, auditable backbone that aligns people, processes, and technology. To

progress from promise to practice, implementations should focus on hybrid architectures, privacy by design, dependable oracles, and phased deployment with clear governance and success

metrics. Collaboration among researchers, industry practitioners, and regulators is essential to convert these capabilities into sustained reductions in harm.

کاربرد فناوری بلاکچین در مدیریت ایمنی کارگاه‌های ساختمانی: مرور نظام‌مند راهکارها، چالش‌ها و مسیرهای آینده

صدیقه جعفری منش^۱، علی کمالی اردکانی^{۲*}

^۱گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران.
^۲گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۱۷

== چکیده

مقدمه: صنعت ساخت‌وساز یکی از پرخطرترین بخش‌های اقتصادی است که نیازمند روش‌های نوآورانه برای بهبود مدیریت ایمنی است. فناوری بلاکچین به دلیل ویژگی‌هایی مانند شفافیت، تغییرناپذیری داده‌ها و استفاده از قراردادهای هوشمند، ابزاری مؤثر برای ارتقای ایمنی کارگاه‌های ساختمانی شناخته می‌شود. این مرور نظام‌مند از نخستین تلاش‌های جامع برای ارزیابی کاربردهای بلاکچین در مدیریت ایمنی ساخت‌وساز است.

روش کار: پژوهش حاضر بر اساس دستورالعمل PRISMA انجام شد. جست‌وجو در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر شامل Web of Science و Scopus و به صورت تکمیلی در IEEE Xplore، ScienceDirect و Google Scholar در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ انجام گرفت. در نهایت، ۱۸ مقاله واجد شرایط شناسایی و با استفاده از روش‌های سنتز روایتی و تحلیل تماتیک مورد تحلیل قرار گرفتند.

یافته‌ها: کاربردهای بلاکچین در چهار حوزه اصلی شامل سیستم‌های نظارت و بازرسی ایمنی، گزارش‌دهی ایمنی و مدیریت اطلاعات، راهکارهای ایمنی متمرکز بر کارگر و کاربردهای تخصصی ایمنی در ساخت‌وساز متمرکز بوده‌اند. مزایای اصلی شامل یکپارچگی و امنیت داده‌ها، شفافیت و پاسخ‌گویی، بهبودهای عملیاتی و ارتقای فرهنگ ایمنی گزارش شده‌اند. با این حال، چالش‌هایی نظیر پیچیدگی‌های فنی، موانع ادغام و پذیرش، هزینه‌های اجرایی و مسائل مربوط به راهبری و مقررات نیز شناسایی شده‌اند. مسیرهای آینده تحقیق شامل ادغام فناوری بلاکچین با فناوری‌هایی همچون اینترنت اشیا و هوش مصنوعی، پیاده‌سازی و اعتبارسنجی عملی، توسعه راهکارهای امنیتی پیشرفته‌تر و بهبود تجربه کاربری است.

نتیجه‌گیری: شواهد حاکی از آن است که فناوری بلاکچین می‌تواند به طور معناداری ایمنی کارگاه‌های ساختمانی را بهبود بخشد؛ اما برای گذر از نمونه‌های مفهومی به پیاده‌سازی در مقیاس وسیع، ضروری است موانع فنی، سازمانی و حقوقی به‌طور جدی برطرف شوند. از این رو، همکاری نزدیک بین پژوهشگران، فعالان صنعت برای تحقق این ظرفیت بالقوه و دستیابی به نتایج عملی امری حیاتی است.

== **کلمات کلیدی:** بلاکچین، مدیریت ایمنی، ساخت‌وساز، مرور نظام‌مند

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: aliardakani78@gmail.com

مقدمه

ساخت‌وساز به‌سبب ماهیت پروژه‌ای، تنوع ذینفعان و انجام فعالیت‌های ذاتاً پرخطر، در ادبیات ایمنی شغلی یکی از پرریسک‌ترین بخش‌های اقتصاد شناخته می‌شود. برآوردهای سازمان بین‌المللی کار^۱ (ILO) نشان می‌دهد که سالانه دست‌کم ۶۰ هزار حادثه مرگبار در کارگاه‌های ساختمانی رخ می‌دهد که تقریباً یک‌ششم تمامی مرگ‌های ناشی از حوادث شغلی دنیا را تشکیل می‌دهد (۱). در مقیاس ملی، داده‌های سرشماری مرگ‌های ناشی از حادثه شغلی اداره آمار کار ایالات متحده نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۳، بخش ساخت‌وساز با ۱۰۷۵ فوتی و نرخ ۹/۶ مرگ به‌ازای هر ۱۰۰ هزار شاغل تمام‌وقت، بیشترین تعداد تلفات را در میان تمامی صنایع خصوصی این کشور ثبت کرده است (۲).

در ایران نیز ابعاد مسئله چشم‌گیر است. بر اساس داده‌های رسمی سازمان پزشکی قانونی، در سال ۱۴۰۲ تعداد ۲۱۱۵ نفر در محیط‌های کاری جان باخته‌اند و «سقوط از بلندی» مهم‌ترین علت بوده است؛ روندی که در سال ۱۴۰۳ نیز با ثبت حدود ۱۰۹۸۶ فوتی و سهم ۴۲ درصدی سقوط استمرار یافته است (۳-۵). گزارش‌های وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی و رسانه‌های سراسری همچنین نشان می‌دهد سهم ساخت‌وساز از حوادث ناشی از کار بسیار بالاست (حدود ۳۷ درصد در پنج‌سال گذشته) و بیشترین آسیب‌ها نیز به کارگران مرد در این بخش وارد می‌شود (۵-۷). این الگو با شواهد مطالعات اپیدمیولوژیک داخلی هم‌خوان است که ساخت‌وساز را از نظر فراوانی و شدت حوادث در صدر قرار می‌دهند (۸).

افزون بر این، مجموعه‌ای از عوامل انسانی (خستگی، رفتارهای ناایمن)، سازمانی (فرهنگ ایمنی، رهبری)، مدیریتی (برنامه‌ریزی، کنترل عملیات)، فناوریانه (کیفیت تجهیز و نگهداری) و محیطی (شرایط کارگاه و اقلیم) زمینه‌ی وقوع حادثه و دشواری پاسخ‌گویی را تشدید می‌کند (۹-۱۴). از طرفی، با وجود پیشرفت در استانداردها و آموزش‌های ایمنی، کاستی‌هایی مانند

1. International Labour Organization

پراکندگی داده‌ها، گزارش‌دهی دیر هنگام یا ناقص حوادث و شبه‌حوادث، دشواری ردیابی صلاحیت‌ها و مجوزها در زنجیره‌ی پیمانکاری، و چالش پاسخ‌گویی ذینفعان، کارایی نظام‌های ایمنی را محدود می‌کند. این وضعیت نیازمند راهکارهای دیجیتال نوآورانه‌ای است که «قابلیت اعتماد فناوریانه» ایجاد کنند و جریان اطلاعات ایمن، شفاف و زمان‌مند را تضمین نمایند (۱۵-۱۸).

فناوری بلاک‌چین^۲ (دفترکل توزیع‌شده^۳ با ویژگی‌های تغییرناپذیری، شفافیت و اجماع توزیع‌شده^۴) از گزینه‌های امیدبخش برای رفع این شکاف‌هاست. در بلاک‌چین، تراکنش‌ها به‌صورت زمان‌مهر^۵ و زنجیروار ثبت می‌شوند و پس از ثبت، تغییر آنها بدون اجماع شبکه ممکن نیست؛ قراردادهای هوشمند^۶ نیز این امکان را می‌دهند که قواعد از پیش تعریف‌شده به‌صورت خوداجرا اعمال شوند. همین خصیصه‌ها بلاک‌چین را به ابزاری مناسب برای یکپارچه‌سازی و «قابل حسابرسی» کردن فرآیندهای ایمنی بدل می‌کند. (۱۷، ۱۹، ۲۰)

به‌اختصار، فناوری بلاک‌چین با فراهم کردن ثبت تغییرناپذیر و قابل حسابرسی آموزش‌ها، گواهی‌ها و مجوزهای ایمنی، امکان احراز هویت و اعتبارسنجی دیجیتال صلاحیت‌ها و نیز کنترل دسترسی خودکار به نواحی پرخطر را مهیا می‌کند؛ فرآیندهای نظارت و بازرسی (از جمله چک‌لیست‌ها، صورت‌جلسات و مجوزهای کار) را دیجیتالی و قابل ردیابی می‌سازد؛ گزارش‌دهی برخط حوادث و شبه‌حوادث را با تضمین تمامیت داده‌ها و اتصال نظام‌مند به اقدامات اصلاحی تسهیل می‌کند؛ چرخه‌ی عمر تجهیزات ایمنی و ماشین‌آلات را در پیوند با سامانه‌های حسگری و مدیریت نگهداشت، شفاف و قابل پیگیری می‌سازد؛ و با شفاف‌تر کردن تعاملات و تعهدات ایمنی در زنجیره‌ی پیمانکاری، زمینه‌ی ارتقای فرهنگ

2. Blockchain

3. Distributed Ledger (پایگاه داده‌ای که بین گره‌ها هم‌رسان می‌شود و یک نسخه‌ی معتبر دارد)

4. Distributed Consensus (مجموعه‌ای از قواعد که تضمین می‌کند همه‌ی گره‌های صادق، با وجود خرابی‌ها و تاخیرها، به یک روایت مشترک برسند)

5. Timestamping (ثبت زمان قابل‌اتکا برای رخداد/سند روی زنجیره)

6. Smart Contract (کدی خوداجرا روی بلاک‌چین که قواعد از پیش تعریف‌شده (را) اعمال می‌کند)

ایمنی و پاسخ‌گویی را فراهم می‌آورد. (۲۱-۲۴) با این حال، گسترش کاربرد بلاک‌چین با موانعی مانند پیچیدگی فنی و ادغام با سامانه‌های موجود، مقیاس‌پذیری و تعامل‌پذیری، هزینه‌های پیاده‌سازی، و ملاحظات حقوقی/راهبری روبه‌رو است؛ ادبیات فنی ساخت‌وساز نیز بر همین چالش‌ها اشاره دارد (۲۵، ۲۶).

مرورهای پیشین عمدتاً به کاربردهای کلی بلاک‌چین در ساخت‌وساز (از جمله زنجیره‌ی تأمین، مدیریت قراردادهای و پرداخت‌ها) پرداخته‌اند و ایمنی را به صورت گذرا یا به عنوان یکی از زیرحوزه‌ها بررسی کرده‌اند (۲۰، ۲۶). مرور اختصاصی بر ایمنی ساخت‌وساز و بلاک‌چین بسیار اندک است؛ به تازگی مروری جامع این حوزه را هدف قرار داده است (۱۷). بر این مبنا و تا زمان جست‌وجوی نهایی (۱۵ اوت ۲۰۲۵)، مطالعه‌ی حاضر (با تمرکز صریح بر مدیریت ایمنی کارگاه‌های ساختمانی و با روش‌شناسی نظام‌مند) علاوه بر سنتز شواهد، با ارائه یک طبقه‌بندی عملیاتی جزئی‌تر و راهنمای پیاده‌سازی، در کنار مرور بسیار جدید یادشده، از نخستین تلاش‌ها برای ترسیم منظری جامع از راهکارها، چالش‌ها و مسیرهای آینده در این موضوع محسوب می‌شود و می‌تواند خلأ زبان فارسی و ادبیات منطقه‌ای را نیز پوشش دهد.

مسئله‌ی محوری این مرور آن است که مشخص کند فناوری بلاک‌چین در مدیریت ایمنی کارگاه‌های ساختمانی چگونه به کار گرفته شده است و این به‌کارگیری با چه مزایا و چالش‌هایی همراه است. هدف مطالعه‌ی شناسایی، دسته‌بندی و سنتز نظام‌مند کاربردهای گزارش‌شده و تبیین مزایا، محدودیت‌ها و مسیرهای آینده در ساخت‌وساز است. این مرور تصویری یکپارچه از وضعیت موجود ارائه می‌کند و اولویت‌های پژوهشی و اجرایی لازم برای گذار از نمونه‌های مفهومی به پیاده‌سازی در مقیاس واقعی را پیشنهاد می‌دهد.

روش کار

این پژوهش یک مرور نظام‌مند است که مطابق رهنمودهای PRISMA 2020 انجام شد (۲۷). پرسش

اصلی این پژوهش چنین تعریف شد: «فناوری بلاک‌چین تاکنون چگونه برای بهبود ایمنی کارگاه‌های ساختمانی به کار رفته است و مهم‌ترین راهکارها، چالش‌ها و مسیرهای آینده تحقیق چیست؟»

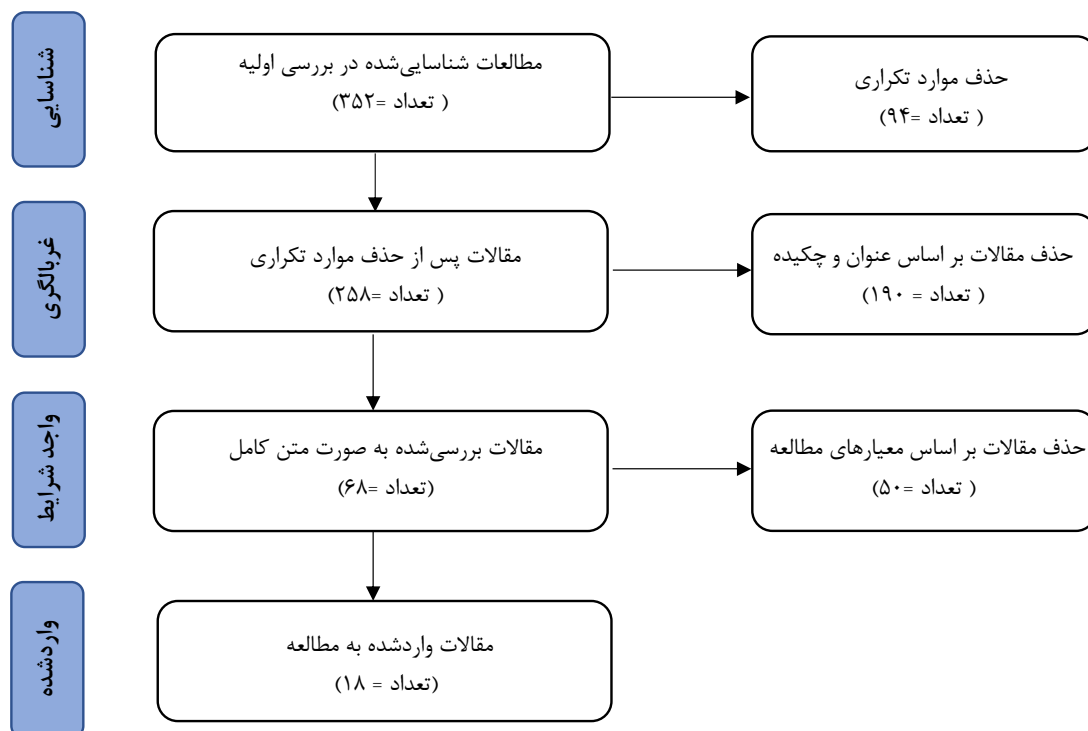
پایگاه‌های اطلاعاتی و راهبرد جستجو

برای شناسایی مطالعات مرتبط، جستجوی نظام‌مند در دو پایگاه استنادی اصلی، یعنی Web of Science و Scopus انجام شد. به منظور افزایش جامعیت، جستجوهای تکمیلی نیز در پلتفرم‌های ناشران (ScienceDirect و IEEE Xplore) و در موتور جستجوی Google Scholar صورت گرفت. راهبرد جستجو مبتنی بر عملگرهای بولی (AND/OR) و در فیلدهای عنوان، چکیده و کلیدواژه‌ها در هر پایگاه اجرا شد. عبارات جستجو به صورت زیر تعریف گردید و بر حسب نحو هر پایگاه تطبیق داده شد:

(“blockchain” OR “distributed ledger”) AND (“construction site” OR “jobsite” OR “construction”)

AND (“safety” OR “accident” OR “occupational safety and health” OR “OSH”)

نمونه‌ی تطبیق نحوی: در Scopus از الگوی TITLE-ABS-KEY (...) و در Web of Science از TS (...) استفاده شد؛ در ScienceDirect از Title/Abstract/Keywords و در IEEE Xplore از جست‌وجو All Metadata با محدودسازی به Document Title/Abstract/Author Keywords استفاده شد. در Google Scholar به صورت تکمیلی از همان عبارت با عملگرهای بولی بهره گرفته شد و نتایج بر اساس ارتباط غربال شد. بازه‌ی زمانی ژانویه ۲۰۱۵ تا اوت ۲۰۲۵ انتخاب شد؛ زیرا ادبیات کاربرد بلاک‌چین در ساخت‌وساز و مباحث ایمنی از حدود سال ۲۰۱۵ به صورت معنادار ظاهر شده است. جستجوی اولیه در ۵ ژانویه ۲۰۲۵ انجام شد؛ به روزرسانی نخست در ۱۳ آوریل ۲۰۲۵ (یک مقاله جدید افزوده شد) و به روزرسانی نهایی در ۱۵ اوت ۲۰۲۵ تکرار شد (رکورد واجد شرایط



شکل ۱: نمودار PRISMA

اطلاعات ساختمان^۱ فاقد مؤلفه ایمنی و مقالات غیر انگلیسی بوده است.

فرآیند گزینش مقالات

تمام نتایج به نرم افزار EndNote 20 منتقل و موارد تکراری حذف شدند. سپس، دو پژوهشگر مستقل (نویسنده اول و دوم) ابتدا عناوین و چکیده ها و سپس متن کامل را ارزیابی کردند. اختلاف نظرها از طریق بحث و گفتگو حل شد. نمودار جریان PRISMA 2020 (شکل ۱) تعداد رکوردها را در هر مرحله نشان می دهد.

استخراج و ثبت داده ها

برای هر مقاله، اطلاعات مورد نیاز استخراج و در یک دیتابیس Excel ثبت شد. این اطلاعات عبارت بودند از: سال انتشار و نام نویسنده اول، نوع مطالعه و روش

جدیدی شناسایی نشد). (در بررسی تکمیلی همان راهبرد جست و جو یک بار نیز بدون محدودیت زمانی اجرا شد؛ این بررسی نشان داد که پیش از ۲۰۱۵ مطالعه ی واجد شرایطی شناسایی نشد (موارد اندک موجود یا خارج از حوزه ی ساخت وساز/ایمنی کارگاه بودند یا معیارها را احراز نمی کردند)).

معیارهای ورود و خروج

معیارهای ورود شامل مقالات داوری شده ژورنالی یا کنفرانسی، تمرکز مستقیم بر کاربرد بلاکچین در ایمنی کارگاههای ساختمانی، در دسترس بودن متن کامل و ارائه داده های تجربی، چارچوب مفهومی یا تحلیل نظری مرتبط بوده و معیارهای خروج شامل مقالات مروری، گزارش فنی بدون داوری، پایان نامه ها و کتاب های درسی، مطالعات بلاکچین در حوزه هایی مانند لجستیک یا مدل سازی

1. Building information modeling

== یافته ها

از مجموع ۳۵۲ رکورد اولیه، ۶۸ مقاله برای بررسی متن کامل انتخاب شدند که در نهایت ۱۸ مقاله نهایی براساس معیارهای ورود وارد آنالیز شدند (نمودار جریان PRISMA در شکل ۱). در ادامه، خروجی تحلیل تماتیک در MAXQDA 2020 چهار تم فراگیر شامل (۱) حوزه های کاربرد بلاکچین در ایمنی ساخت و ساز، (۲) مزایا و فواید، (۳) چالش ها و محدودیت ها، و (۴) مسیرهای تحقیقاتی آینده را آشکار کرد. برای هر تم، زیرتم های حاصل از کدگذاری قیاسی-استقرایی گزارش شد و برای هر زیرتم، نمونه های شواهد کلیدی با ارجاع به مقالات نماینده آورده شد (شکل ۲). در ادامه، برای شفافیت بیشتر جدول ۲ در خصوص فاکتورهای مؤثر بر ایمنی ساخت و ساز با تمرکز بر بلاکچین و جدول ۳ تحت عنوان کاربردهای ویژه ایمنی مبتنی بر بلاکچین آورده شده است.

۱) حوزه های کاربرد بلاکچین در ایمنی ساخت و ساز

- سیستم های نظارت و بازرسی ایمنی

چندین مطالعه بر سیستم های مبتنی بر بلاکچین برای نظارت و بازرسی ایمنی متمرکز شده اند. کیم و همکاران (۲۰۲۴) و پان و همکاران (۲۰۲۴) چارچوب هایی را پیشنهاد کردند که بلاکچین را با بینایی کامپیوتری برای بازرسی های ایمنی از راه دور در سایت های ساختمانی ادغام می کنند. این سیستم ها شناسایی خودکار خطرات را در عین اطمینان از ثبت قابل اعتماد داده ها از طریق دفتر کل تغییرناپذیر بلاکچین امکان پذیر می سازند (۳۷).

۳۸. وو و همکاران (۲۰۲۱) راهکاری را به طور خاص برای بازرسی کیفیت ساخت و ساز در محل با استفاده از هایپرلجر فابریک ارائه کردند که امکان ثبت تغییرناپذیر داده ها و بررسی انطباق مبتنی بر قراردادهای هوشمند را فراهم می کند (۳۱). لی و همکاران (۲۰۲۳) یک سیستم نظارت بر حوادث نزدیک به وقوع و هشدار زود هنگام را توسعه دادند که بلاکچین را با فناوری های مختلفی مانند شناسایی با امواج رادیویی، تشخیص چهره و پردازش

پژوهش، مزایای کلیدی، چالش ها و مسیرهای آینده. جدول ۱ مشخصات کلیدی ۱۸ مطالعه منتخب را نشان می دهد^۱.

روش های ترکیب و تحلیل

در این مطالعه، با توجه به ناهمگونی موضوعی و طراحی های متفاوت مطالعات، انجام متاآنالیز عددی ممکن نبود؛ بنابراین، تحلیل نتایج از طریق ترکیب روایتی^۲ همراه با تحلیل تماتیک صورت پذیرفت. بدین منظور، متن بخش های «یافته ها» و «بحث» مقالات استخراج و به صورت اسناد متنی در MAXQDA 2020 وارد شد. مراحل کار به صورت زیر انجام گرفت:

- آماده سازی و سازمان دهی داده ها: اسناد در Document System وارد و برحسب نوع مطالعه/سال در Document Groups سامان دهی شد.
- کدبک و کدگذاری: کدبک به صورت ترکیبی تدوین شد—کدهای والد قیاسی بر مبنای اهداف مطالعه (راهکارها، چالش ها، مسیرهای آینده) و کدهای فرزند استقرایی که در جریان خوانش داده ها شکل گرفتند. برای هر کد، تعریف عملیاتی و نمونه های متنی مرتبط نگه داری شد.
- کدگذاری مستقل و اجماع: دو پژوهشگر به طور مستقل کدگذاری را انجام دادند؛ سپس خروجی ها مقایسه و اختلاف ها از طریق اجماع رفع و نسخه نهایی کدبک تثبیت شد.
- بازبینی الگوها: برای مشاهده پراکنش کدها میان اسناد و شناسایی هموقوعی ها از Code System و Code Matrix Browser استفاده شد و قطعات کدگذاری شده بازخوانی گردید تا خوشه های مفهومی پایدار استخراج شوند.
- استخراج تم ها و گزارش: بازبینی و نام گذاری تم ها بر مبنای رویکرد شش مرحله ای براون و کلارک (۲۰۰۶) (۴۳) انجام شد و یافته ها در قالب سنتز روایی گزارش گردید.

1. به دلیل محدودیت حجم مقاله، ستون های «مزایا»، «چالش ها» و «مسیرهای آینده» از جدول اصلی حذف شده اند؛ جزئیات آن ها در بخش «یافته ها» و نیز در بخش «بحث» ارائه شده است. جدول کامل به صورت فایل تکمیلی در دسترس است.
2. Narrative synthesis

جدول ۱: خلاصه اطلاعات مطالعات بررسی شده

نویسندگان و سال انتشار	نوع مطالعه و روش پژوهش	هدف پژوهش
وو (۲۰۲۰) (۲۸)	مطالعه توسعه نمونه اولیه، مرور متون، رویکرد تفکر طراحی	توسعه یک نمونه اولیه مبتنی بر بلاکچین کنسرسیومی برای مدیریت اطلاعات بازرسی ساختوساز و بررسی مزایای بالقوه و چالش‌های پیاده‌سازی آن
وی (۲۰۲۰) (۲۹)	توسعه مدل مفهومی	شناسایی مسائل و چالش‌های کلیدی در مدیریت شبه‌حادثه و پیشنهاد یک چارچوب مفهومی مبتنی بر بلاکچین
مرتضی (۲۰۲۱) (۳۰)	طراحی چارچوب مفهومی، دفترکل توزیع‌شده، فناوری بلاکچین، هایپرلجر فابریک ^۱	توسعه یک چارچوب مدیریت اطلاعات برای فرآیندهای ایمنی ساختوساز با استفاده از بلاکچین به منظور فراهم کردن دسترسی پذیری، شفافیت، قابلیت اطمینان، سازگاری و قابلیت ردیابی
وو (۲۰۲۱) (۳۱)	توسعه چارچوب مفهومی + توسعه سیستم نمونه اولیه، رویکرد تفکر طراحی	بهبود بازرسی کیفیت ساختوساز در محل با استفاده از فناوری بلاکچین برای ثبت تغییرناپذیر داده‌ها و بررسی انطباق مبتنی بر قراردادهای هوشمند
یانگ (۲۰۲۲) (۳۲)	اعتبارسنجی مطالعه موردی، طراحی سیستم (مدل ترکیبی درون/ برون زنجیره‌ای)	توسعه یک سیستم مبتنی بر بلاکچین برای مدیریت مطمئن و کارآمد اطلاعات مربوط به کار داربست
لی (۲۰۲۲) (۳۳)	مطالعه موردی مصنوعی، پیاده‌سازی نمونه اولیه، توسعه چارچوب برنامه‌ی غیرمتمرکز ^۲ فول استک	ایجاد یک سیستم مبتنی بر بلاکچین برای بهبود مدیریت ایمنی و قابلیت ردیابی در سایت‌های ساختوساز
شو (۲۰۲۲) (۳۳)	پژوهش طراحی دانش، مرور ادبیات پژوهش، تعامل با صنعت، بارش فکری، یادگیری میان‌بخشی، مطالعه موردی، نمونه‌سازی و آزمایش	توسعه یک چارچوب مبتنی بر بلاکچین برای ایجاد تعادل بین حفاظت از حریم خصوصی و مدیریت ایمنی و بهداشت شغلی در صنعت ساختوساز
نادری (۲۰۲۳) (۳۴)	مطالعه موردی مصنوعی، پیاده‌سازی نمونه اولیه، توسعه چارچوب برنامه‌ی غیرمتمرکز فول استک	توسعه و آزمایش یک سازوکار تشویقی با استفاده از بلاکچین و بینایی کامپیوتر ^۳ برای پاداش‌دهی خودکار به رفتارهای ایمنی در ساختوساز
ژانگ (۲۰۲۳) (۱۸)	طراحی چارچوب مفهومی، توسعه سیستم مبتنی بر ماژول	شناسایی مسائل و چالش‌های کلیدی در مدیریت شبه‌حادثه و پیشنهاد یک چارچوب مفهومی مبتنی بر بلاکچین
ساح (۲۰۲۳) (۳۵)	طراحی و اجرای تجربی با استفاده از بلاکچین مجوزدار هایپرلجر فابریک بر بستر رایانش ابری	توسعه و اعتبارسنجی یک مدل مبتنی بر بلاکچین برای ارتقای امنیت داده و حریم خصوصی اطلاعات بیوگرافی و ایمنی کارگران ساختمانی
لی (۲۰۲۳) (۳۶)	پژوهش طراحی دانش، ساخت پایگاه دانش، توسعه سیستم، و اعتبارسنجی موردی	نظارت خودکار و ارائه هشدار زودهنگام رویدادهای شبه‌حادثه در سایت‌های ساختمانی با استفاده از فناوری بلاکچین
احمدی شیخ سرمست (۲۰۲۳) (۳۱)	پژوهش طراحی دانش، شبیه‌سازی سیستم با داده‌های حوادث واقعی	طراحی و توسعه یک سیستم غیرمتمرکز مبتنی بر بلاکچین برای مدیریت امن و شفاف اطلاعات حوادث در پروژه‌های ساختمانی
کیم (۲۰۲۴) (۳۷)	پژوهش طراحی دانش، پیشنهاد چارچوب و نمایش مطالعه موردی؛ پیاده‌سازی نمونه اولیه	بهبود قابلیت اطمینان بازرسی ایمنی از راه دور و تصمیم‌گیری از طریق یکپارچه‌سازی بینایی کامپیوتر و بلاکچین
پان (۲۰۲۴) (۳۸)	پیاده‌سازی نمونه اولیه، شبیه‌سازی و آزمایش‌های ارزیابی، طراحی مدل DRKE ^۴ ، چارچوب نوآورانه یادگیری عمیق مبتنی بر بلاکچین	توسعه یک چارچوب بلاکچین-یادگیری عمیق و یک مدل DRKE نوآورانه برای ذخیره‌سازی امن و کارآمد داده‌های ویدیویی ساختوساز

^۱ (چارچوب منبع‌باز برای بلاکچین‌های مجوزدار سازمانی) Hyperledger Fabric

^۲ (نرم‌افزاری که منطق کلیدی‌اش بر قراردادهای هوشمند تکیه می‌کند) DApp

^۳ (تحلیل خودکار تصویر/ویدئو برای شناسایی خطرات و رویدادها) Computer Vision

^۴ موتور/مدل دانش ریسک

ادامه جدول ۱: خلاصه اطلاعات مطالعات بررسی شده

نویسندگان و سال انتشار	نوع مطالعه و روش پژوهش	هدف پژوهش
نیاتو (۲۰۲۴) (۳۹)	طراحی چارچوب مفهومی، توسعه سیستم مبتنی بر مازول	پیشنهاد یک چارچوب مبتنی بر بلاک چین و دارای انگیزه توکنی ^۵ برای بهبود گزارش‌دهی شبه‌حادثه در مدیریت ایمنی ساخت‌وساز
نیاتو (۲۰۲۴) (۴۰)	پیاپی‌سازی اثبات مفهوم مطالعه موردی فرضی با ارزیابی هزینه و حریم خصوصی، پژوهش طراحی دانش	توسعه و اعتبارسنجی یک سیستم یکپارچه با اثبات دانش صفر ^۶ و بلاک چین لایه دوم ^۷ برای گزارش‌دهی شبه‌حادثه با حفظ حریم خصوصی و مقرون به صرفه در مدیریت ایمنی ساخت‌وساز
بانو (۲۰۲۴) (۴۱)	اعتبارسنجی تجربی با آزمایش‌های سیستمی، پژوهش طراحی دانش، توسعه نمونه اولیه	پیشنهاد یک چارچوب مبتنی بر بلاک چین با انگیزه توکنی برای آموزش ایمنی مبتنی بر واقعیت مجازی به منظور ایجاد انگیزه برای مشارکت و بهبود آگاهی ایمنی
پان (۲۰۲۵) (۴۲)	ارزیابی از طریق تست قراردادهای هوشمند و آزمایش‌های یادگیری فدرال ^۸ ، توسعه چارچوب	توسعه یک چارچوب یادگیری فدرال مبتنی بر بلاک چین برای راهبری مشارکتی امن و حفظ حریم خصوصی در خدمات ایمنی ساخت‌وساز

^۵ Token (واحد دیجیتال برای مشوق)

^۶ Zero-Knowledge Proof (شیوه‌ای رمزنگارانه برای اثبات درستی ادعا بدون افشای داده‌ی خام)

^۷ Layer-2 (فناوری‌های مقیاس‌پذیری بالای زنجیره اصلی با لنگر سازی امنیتی)

^۸ Federated Learning (آموزش مدل بین چند نهاد بدون تبادل داده خام؛ حریم‌محور)

(۳۹، ۴۰). ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) مسائل کلیدی در مدیریت حوادث نزدیک به وقوع را شناسایی کرده و یک چارچوب مفهومی مبتنی بر بلاک چین برای پرداختن به آنها پیشنهاد دادند (۱۸). احمدی شیخ سرمست و همکاران (۲۰۲۳) یک سیستم غیرمتمرکز مبتنی بر بلاک چین را به طور خاص برای مدیریت اطلاعات حوادث در پروژه‌های ساختمانی طراحی کردند و از فناوری‌های اتریوم^۲ و IPFS برای نگهداری سوابق امن و شفاف بهره بردند (۲۱). استفاده از بلاک چین در گزارش‌دهی حوادث نزدیک به وقوع و مدیریت اطلاعات ایمنی، مزایایی نظیر افزایش شفافیت، قابلیت ردیابی و امنیت داده‌ها را به همراه دارد. رویکردهای مبتنی بر توکن و اثبات دانش صفر نیز نشان‌دهنده تلاش برای ایجاد انگیزه و حفظ حریم خصوصی در این فرآیندها هستند (۱۸، ۳۰، ۳۹، ۴۰).

• راهکارهای ایمنی متمرکز بر کارگر
چندین مطالعه بر کاربردهای بلاک چین متمرکز بر کارگر برای ایمنی تمرکز داشتند. ساه و همکاران (۲۰۲۳) یک مدل مبتنی بر بلاک چین را برای ارتقای امنیت داده و حریم خصوصی اطلاعات بیوگرافی و ایمنی

(سکوی قراردادهای هوشمند عمومی با اکوسیستم گسترده ابزار و استاندارد) Ethereum 2.

تصویر مبتنی بر هوش مصنوعی^۱ ادغام می‌کند تا به طور خودکار موقعیت‌های بالقوه خطرناک را شناسایی کرده و هشدارهای زودهنگام ارائه دهد (۳۶). این یافته‌ها نشان می‌دهند که بلاک چین به عنوان بستری امن و مقاوم در برابر تغییر، امکان ثبت دقیق و قابل اعتماد داده‌های بازرسی ایمنی را فراهم می‌کند و با ادغام با فناوری‌های بینایی کامپیوتری و هاپرلجر فابریک، کارایی و دقت بازرسی‌ها را به طور بالقوه افزایش می‌دهد (۳۱، ۳۶-۳۸).

• گزارش‌دهی ایمنی و مدیریت اطلاعات
تعدادی از مقالات به کاربردهای بلاک چین برای گزارش‌دهی ایمنی و مدیریت اطلاعات پرداخته‌اند. مرتضی و همکاران (۲۰۲۱) یک چارچوب مدیریت اطلاعات برای فرآیندهای ایمنی ساخت‌وساز با استفاده از هاپرلجر فابریک توسعه دادند تا دسترسی‌پذیری، شفافیت، قابلیت اطمینان و ردیابی را فراهم کنند (۳۰). چندین محقق سیستم‌های گزارش‌دهی حوادث نزدیک به وقوع را بررسی کردند، به طوری که نیاتو و همکاران (۲۰۲۴) هم یک رویکرد انگیزشی مبتنی بر توکن و هم یک سیستم اثبات دانش صفر برای حفظ حریم خصوصی در گزارش‌دهی حوادث نزدیک به وقوع پیشنهاد کردند

1. Artificial intelligence



شکل ۲: چارچوب تماتیک بلاک‌چین در ایمنی ساخت‌وساز: حوزه‌های کاربرد، مزایا، چالش‌ها و مسیرهای پژوهشی آتی

سیستم مبتنی بر بلاک‌چین را برای مدیریت قابل اعتماد و کارآمد اطلاعات مربوط به داربست‌بندی توسعه دادند و بر این فعالیت ساختمانی پرخطر تمرکز کردند (۳۲). پان و همکاران (۲۰۲۵) یک چارچوب یادگیری فدرال مبتنی بر بلاک‌چین را برای راهبری مشارکتی امن و حفظ حریم خصوصی در خدمات ایمنی ساخت‌وساز ایجاد کردند (۴۲). شو و همکاران (۲۰۲۲) یک چارچوب را به طور خاص برای پرداختن به تعادل بین حفاظت از حریم خصوصی و مدیریت ایمنی و بهداشت شغلی در ساخت‌وساز توسعه دادند (۲۳). وی و کوی (۲۰۲۰) یک مدل مدیریت اطلاعات ایمنی برای کارگران ساختمانی مبتنی بر فناوری بلاک‌چین و داده‌های بزرگ پیشنهاد کردند تا اشتراک‌گذاری و بهره‌برداری از داده‌ها را بهبود بخشند (۲۹). یافته‌ها حاکی از آن است که بلاک‌چین می‌تواند در مدیریت ایمنی جنبه‌های خاصی از ساخت‌وساز مانند داربست‌بندی و همچنین در ایجاد چارچوب‌های راهبری امن و حفظ حریم خصوصی برای خدمات ایمنی کاربرد داشته باشد (۲۳، ۲۹، ۳۲، ۴۲).

کارگران ساختمانی با استفاده از هاپرلجر فابریک توسعه دادند (۳۵). نادری و همکاران (۲۰۲۳) یک مکانیزم انگیزشی خودکار ایمنی ساخت‌وساز را با استفاده از توکن‌های مبتنی بر بلاک‌چین و تکنیک‌های مبتنی بر بینایی برای پاداش دادن به رفتارهای ایمن ایجاد کردند (۳۴). بائو و همکاران (۲۰۲۴) یک چارچوب انگیزشی مبتنی بر توکن را برای آموزش ایمنی ساخت‌وساز مبتنی بر واقعیت مجازی به منظور ایجاد انگیزه در مشارکت و بهبود آگاهی ایمنی با استفاده از فناوری بلاک‌چین و آوالانچ پیشنهاد کردند (۴۱). این راهکارهای کارگرمحور، با تأکید بر امنیت داده‌ها، ایجاد انگیزه از طریق توکن‌ها و آموزش‌های مبتنی بر واقعیت مجازی، بهبود فرهنگ ایمنی و محافظت از اطلاعات کارگران را هدف قرار داده و بیانگر توجه به عامل انسانی در ایمنی ساخت‌وساز هستند (۳۴، ۳۵، ۴۱).

• کاربردهای تخصصی ایمنی در ساخت‌وساز
چندین مقاله به جنبه‌های تخصصی ایمنی در ساخت‌وساز پرداخته‌اند. یانگ و همکاران (۲۰۲۲) یک

جدول ۲: فاکتورهای مؤثر بر ایمنی ساخت‌وساز با تمرکز بر بلاک‌چین

دسته/فاکتور ایمنی	سازوکار/ویژگی بلاک‌چین متناظر	فناوری‌های مکمل ذکر شده در مطالعات	نمونه مطالعات	پیامد/شاخص ایمنی مورد انتظار
یکپارچگی و ضد دستکاری داده	دفترکل تغییرناپذیر، ثبت قابل اعتماد	ویدئو/بینایی ماشین، IPFS ^۹	(۲۱، ۳۱، ۳۷، ۳۸، ۴۰)	سوابق مطمئن، پیشگیری از جعل، اتکاپذیری ممیزی
شفافیت و پاسخگویی ذینفعان	دفترکل توزیع شده و ردیابی تراکنش‌ها	اشتراک‌گذاری بین ذینفعان، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان/دانش‌بورد	(۱۸، ۲۸، ۳۰، ۳۳)	ردیابی انطباق، افزایش پاسخگویی و اعتماد
پایش لحظه‌ای و هشدار زود هنگام	قراردادهای هوشمند (قواعد/تریگرها)، ثبت رویداد	بینایی مبتنی بر هوش مصنوعی، شناسایی با امواج رادیویی، تشخیص چهره	(۳۱، ۳۶-۳۸)	کاهش نزدیک‌حادثه/حادثه، کاهش زمان واکنش
مدیریت کیفیت و کاهش بازکاری	قراردادهای هوشمند برای کنترل کیفیت/تأیید	هایپرلجر فابریک	(۳۱، ۳۲، ۳۶)	اتوماسیون کنترل کیفیت، کاهش دوباره‌کاری/خطا
حریم خصوصی و اشتراک‌گذاری امن	اثبات دانش صفر، چارچوب‌های حفظ حریم	یادگیری فدرال، راهکارهای برون‌زنجیره	(۲۳، ۳۸، ۴۰، ۴۲)	گزارش‌دهی بی‌واهمه، حداقل‌سازی افشای داده
حفاظت از داده‌ها و سوابق کارگران	کنترل دسترسی در شبکه‌های مجوزدار	هایپرلجر فابریک	(۲۹، ۳۵)	صیانت از داده کارگر، اشتراک امن سوابق ایمنی
انگیزش رفتار ایمن و مشارکت	توکن‌سازی پاداش/جریمه، سازوکارهای انگیزشی	واقعیت مجازی و متاورس ^{۱۰} (آموزش)، آوالانچ	(۳۴، ۴۱)	استفاده از وسایل حفاظت فردی و رعایت پروتکل‌ها، مشارکت بالاتر در آموزش
ادغام و مدیریت اطلاعات پروژه	معماری‌های مجوزدار و چارچوب‌های مدیریت اطلاعات	اینترنت اشیا/مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، داده‌های بزرگ	(۲۹-۳۱)	جریان پایدار داده، همکاری بهتر ذی‌نفعان
مقیاس‌پذیری/کارایی و ذخیره‌سازی	ذخیره‌سازی خارج‌زنجیره، بهینه‌سازی پردازش	Cloud-Edge-IPFS ^{۱۱} End	(۲۱، ۳۵، ۳۸، ۴۲)	تأخیر/هزینه کمتر، تحمل بار عملیاتی
هزینه و منابع	انتخاب بستر کم‌هزینه، مدیریت کارمزد/زیرساخت	—	(۳۱، ۳۴، ۳۷، ۴۱)	امکان‌پذیری اقتصادی، استقرار عملی
راهبری، مقررات و انطباق	سیاست‌های دسترسی و راهبری داده	—	(۲۳، ۳۰، ۳۱، ۴۰، ۴۲)	انطباق مقرراتی، کاهش ریسک گزارش‌های نادرست

(سامانه توزیع‌شده نگهداشت فایل؛ ارجاع بر پایه هش محتوا) InterPlanetary File System^۹

(محیط‌های تعاملی برای آموزش/تمرین ایمنی و سناریوهای خطر) VR/Metaverse^{۱۰}

چارچوب سه‌لایه برای توزیع جمع‌آوری/پردازش ذخیره‌سازی داده بین پایانه، لبه و ابر^{۱۱}

۲) مزایا و فواید بلاک‌چین در ایمنی ساخت‌وساز

• یکپارچگی و امنیت داده‌ها

یکی از مزایای اصلی که در چندین مطالعه شناسایی شد، افزایش یکپارچگی و امنیت داده‌ها بود. ماهیت تغییرناپذیر و ضد دستکاری سوابق بلاک‌چین توسط کیم و همکاران (۲۰۲۴)، وو و همکاران (۲۰۲۱) و احمدی شیخ سرمست و همکاران (۲۰۲۳) مورد تأکید قرار گرفت (۲۱، ۳۱، ۳۷). پان و همکاران (۲۰۲۴) بر توانایی بلاک‌چین در ارائه داده‌های ویدیویی امن از طریق یک چارچوب یادگیری عمیق نوآورانه تأکید کردند (۳۸). نیاتو

و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که چگونه بلاک‌چین با استفاده از اثبات‌های دانش صفر، ناشناس بودن سرتاسری را ضمن حفظ تغییرناپذیری و قابلیت ردیابی تضمین می‌کند (۴۰). مقالات بررسی‌شده، ظرفیت بلاک‌چین در ارائه داده‌های ایمنی قابل اعتماد، سازگار، امن و ضد دستکاری را تأیید کرده‌اند. در نتیجه، تضمین یکپارچگی و امنیت داده‌ها، به واسطه ماهیت تغییرناپذیر این فناوری که اعتماد را افزایش داده و از جعل جلوگیری می‌کند، یکی از مهم‌ترین مزایای آن به‌شمار می‌رود (۲۱، ۳۱، ۳۷، ۳۸، ۴۰).

جدول ۳: کاربردهای ویژه ایمنی مبتنی بر بلاکچین

سایت ایمنی بازرسی و نظارت	هوشمند و قراردادهای تغییرناپذیر ثبت	(۳۸-۳۶، ۳۱)	زود هنگام، هشدار خودکار، بازرسی بالاتر دقت/کارایی
حادثه «نزدیک و حوادث دهی گزارش	برای اثبات دانش صفر انگیزشی، توکن محرمانگی	(۳۹، ۳۰، ۲۱، ۱۸، ۴۰)	شفافیت، و ردیابی گزارش، نرخ افزایش حریم حفظ
انطباق و ساخت کیفیت مدیریت	انطباق/تأیید هوشمند قراردادهای	(۳۱)	تغییر کنترل کیفیت، غیرقابل ثبت بازکاری کاهش
(داده/حریم/سوابق) کارگر ایمنی	زنجیره در داده امنیت و دسترسی کنترل مجوزدار	(۳۵)	امن اشتراک کارگر، های داده از حفاظت ایمنی سوابق
آموزش و ایمن رفتار انگیزش	انگیزشی سازوکارهای و سازی توکن	(۴۱، ۳۴)	مشارکت و هادستورالعمل رعایت بهبود آموزشی
پرخطرهای فعالیت ایمنی مدیریت بندی(داربست)	هاها/بازرسی تأییدیه عمر چرخه ردیابی	(۳۲)	داربست ریسک کاهش تر، سریع تأیید
شده توزیع تحلیل و مشارکتی راهبری	چین بلاک بر مبتنی فدرال یادگیری	(۴۲)	سازی تصمیم گیری، حفظ با داده راهبری جمعی
پروژه مقیاس در ایمنی اطلاعات مدیریت	بر مبتنی اطلاعات مدیریت های مدل چین بلاک	(۳۰، ۲۹)	بین همکاری پروژه، داده یکپارچگی نفعان ذی
حفظ با ایمنی/بهداشت های چارچوب حریم	در ایمنی و بهداشت حریم حفظ سازوکارهای شغلی	(۲۳)	مدیریت و خصوصی حریم توازن ایمنی/بهداشت

• شفافیت و پاسخ‌گویی

افزایش شفافیت و پاسخ‌گویی به عنوان مزایای قابل توجهی مطرح شدند. مرتضی و همکاران (۲۰۲۱) و وو و همکاران (۲۰۲۰) بر توانایی بلاکچین در فراهم کردن کنترل غیرمتمرکز و داده‌های ایمنی مشترک و شفاف بین ذینفعان تاکید کردند (۲۸، ۳۰). ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) قابلیت ردیابی و شفافیت را به عنوان مزایای کلیدی برای مدیریت حوادث نزدیک به وقوع برجسته کردند (۱۸). لی و همکاران (۲۰۲۲) بهبود شفافیت و قابلیت ردیابی داده‌ها را به عنوان مزایای اصلی سیستم مدیریت کیفیت و ایمنی خود ذکر کردند. ماهیت شفاف تراکنش‌های بلاکچین بارها به عنوان مکانیزمی برای افزایش پاسخ‌گویی ذینفعان و ایجاد اعتماد در فرآیندهای ایمنی شناسایی شد (۳۳). استفاده از بلاکچین می‌تواند شفافیت در فرآیندهای ایمنی را افزایش داده و امکان ردیابی اقدامات و مسئولیت‌پذیری ذینفعان مختلف را

فراهم کند. این امر به ایجاد اعتماد و بهبود همکاری کمک می‌کند (۱۸، ۲۸، ۳۰، ۳۳).

• بهبودهای عملیاتی

مطالعات، چندین بهبود عملیاتی ناشی از پیاده‌سازی بلاکچین را شناسایی کردند. کیم و همکاران (۲۰۲۴) بهبود تصمیم‌گیری و کاهش حوادث را به عنوان مزایای کلیدی برجسته کردند (۳۷). وو و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که بهره‌گیری از بلاکچین فرایند پایش کیفیت را خودکار کرده و دفعات بازکاری را کاهش می‌دهد (۳۱). یانگ و همکاران (۲۰۲۲) فرآیندهای تأیید کارآمدتر و ارتقای کاهش خطر ایمنی در کار داربست‌بندی را خاطرنشان کردند (۳۲). لی و همکاران (۲۰۲۳) بهبود کارایی مدیریت ایمنی را از طریق سیستم‌های نظارت و هشدار خودکار در زمان واقعی گزارش کردند (۳۶). پیاده‌سازی بلاکچین در مدیریت ایمنی می‌تواند منجر

به بهبودهای عملیاتی قابل توجهی مانند خودکارسازی بازرسی‌ها، کاهش نیاز به بازرگاری، بهبود تصمیم‌گیری و افزایش کارایی مدیریت ایمنی شود (۳۱، ۳۲، ۳۶، ۳۷).

• ارتقای فرهنگ ایمنی

چندین مقاله در مورد پتانسیل بلاک‌چین برای ارتقای فرهنگ ایمنی بحث کردند. نادری و همکاران (۲۰۲۳) بر توانایی بلاک‌چین در تشویق فرهنگ ایمنی از طریق سیستم‌های انگیزشی خودکار مبتنی بر توکن تمرکز کردند (۳۴). بائو و همکاران (۲۰۲۴) افزایش انگیزه مشارکت و ارتقای آگاهی ایمنی را از طریق مشوق‌های توکنی برای آموزش ایمنی مبتنی بر واقعیت مجازی برجسته کردند (۴۱). نیاتو و همکاران (۲۰۲۴) اشاره کردند که حفظ ناشناس‌بودن کاربر، انگیزه ارسال گزارش خطرهای نزدیک را تقویت می‌کند (۴۰). این مطالعات نشان می‌دهند مکانیزم‌های انگیزشی مبتنی بر بلاک‌چین، با تأثیر مثبت بر رفتارها و شیوه‌های گزارش‌دهی و همچنین ایجاد محیط‌های گزارش‌دهی امن با استفاده از توکن، پتانسیل ارتقای فرهنگ ایمنی و تشویق رفتارهای ایمن در کارگران را دارد (۳۴، ۴۰، ۴۱).

۳) چالش‌ها و محدودیت‌ها

• چالش‌های فنی

چالش‌های فنی به طور گسترده در سراسر مطالعات مورد اذعان قرار گرفتند. پیچیدگی پیاده‌سازی توسط کیم و همکاران (۲۰۲۴)، مرتضی و همکاران (۲۰۲۱) و چندین نفر دیگر ذکر شد (۳۰، ۳۷). ساه و همکاران (۲۰۲۳) و پان و همکاران (۲۰۲۵) هشدار داده‌اند که بار پردازشی اضافی و محدودیت مقیاس‌پذیری می‌تواند کارایی سامانه را کاهش دهد (۳۵، ۴۲). کیم و همکاران (۲۰۲۴) اطمینان از صحت داده‌های برون‌زنجیره‌ای (چالش اوراکل^۱) را مانعی کلیدی برشمرده‌اند (۳۷). مسائل امنیتی قراردادهای هوشمند توسط لی و همکاران (۲۰۲۳) و چندین نویسنده دیگر شناسایی شد (۳۶).

۱. پل دریافت/تأیید داده‌های دنیای واقعی برای قراردادهای هوشمند

پان و همکاران (۲۰۲۴) یادآور شده‌اند که بلاک‌چین برای نگهداری حجم بالای ویدئوهای ایمنی مناسب نیست و به راهکارهای برون‌زنجیره‌ای نیاز دارد (۳۸). پیچیدگی پیاده‌سازی، نگرانی‌های مربوط به عملکرد و مقیاس‌پذیری، مشکل اتصال بلاک‌چین به داده‌های دنیای واقعی (اوراکل)، مسائل امنیتی قراردادهای هوشمند و محدودیت‌های ذخیره‌سازی داده‌های حجیم از جمله چالش‌های فنی مهم در استفاده از بلاک‌چین در ایمنی ساخت‌وساز هستند (۳۰، ۳۵-۳۸، ۴۲).

• موانع ادغام و پذیرش

ادغام با سیستم‌های موجود به عنوان یک چالش رایج ذکر شد. وو و همکاران (۲۰۲۱) خاطرنشان کردند که همسوسازی بلاک‌چین با رویه‌های متداول پروژه‌های ساختمانی ساده نیست (۳۱). پذیرش و مشارکت کاربران از جمله نگرانی‌های مطرح شده توسط کیم و همکاران (۲۰۲۴) و نیاتو و همکاران (۲۰۲۴) بود (۳۷، ۴۰). نیاز به تخصص فنی توسط نادری و همکاران (۲۰۲۳) و دیگران به عنوان موانع بالقوه برای پیاده‌سازی برجسته شد (۳۴). مقاومت در برابر تغییر به طور خاص توسط وو و همکاران (۲۰۲۱) ذکر شد (۳۱). پذیرش وسیع این فناوری با چالش‌هایی مانند هماهنگ‌سازی با سامانه‌های موجود، کمبود مهارت تخصصی، نبود شواهد میدانی و مقاومت برخی ذینفعان روبه‌رو است (۳۱، ۳۴، ۳۷، ۴۰).

• نگرانی‌های مربوط به هزینه و منابع

چندین مقاله به نگرانی‌های مربوط به هزینه و منابع پرداختند. هزینه‌های تراکنش در بلاک‌چین‌های عمومی توسط نادری و همکاران (۲۰۲۳) به عنوان چالش‌هایی شناسایی شدند (۳۴). الزامات زیرساختی برای نگهداری شبکه‌های بلاک‌چین توسط بائو و همکاران (۲۰۲۴) ذکر شد (۴۱). وو و همکاران (۲۰۲۱) به طور صریح هزینه مالی را به عنوان یک محدودیت برای پذیرش بلاک‌چین در ایمنی ساخت‌وساز ذکر کردند (۳۱). الزامات منابع محاسباتی، به ویژه برای راهکارهایی که بینایی

و اینترنت اشیا را پیشنهاد دادند (۳۲). کیم و همکاران (۲۰۲۴) ادغام با وسایل نقلیه بدون سرنشین را برای جمع‌آوری داده‌های پیشرفته‌تر پیشنهاد کردند (۳۷). پان و همکاران (۲۰۲۴) بررسی ادغام cloud-edge-end را برای چارچوب یادگیری عمیق خود توصیه کردند (۳۸). هدف از این ادغام‌ها، که تحقیقات آتی باید بر آن تمرکز کنند، ایجاد سیستم‌های مدیریت ایمنی جامع‌تر و خودکارتر با ترکیب امنیت بلاکچین و قابلیت‌های پیشرفته جمع‌آوری و تحلیل داده‌های اینترنت اشیا هوش مصنوعی و دوقلوهای دیجیتال است (۳۲، ۳۷، ۳۸).

• پیاده‌سازی و اعتبارسنجی عملی

نیاز به پیاده‌سازی و اعتبارسنجی عملی به طور مداوم مورد تأکید قرار گرفت. پیاده‌سازی میدانی در پروژه‌های ساختمانی واقعی توسط مرتضی و همکاران (۲۰۲۱)، وو و همکاران (۲۰۲۱) و بسیاری دیگر پیشنهاد شد (۳۰، ۳۱). پان و همکاران (۲۰۲۴) بهینه‌سازی سیستم و تست استرس را برای اطمینان از عملکرد در شرایط واقعی توصیه کردند (۳۸). مرتضی و همکاران (۲۰۲۱) پیشنهاد توسعه پایگاه‌های داده جامع ساخت‌وساز مبتنی بر بلاکچین را دادند که جنبه‌های مختلف پروژه فراتر از ایمنی را پوشش دهد (۳۰). این توصیه‌ها بر مراحل ابتدایی توسعه کاربردهای ایمنی مبتنی بر بلاکچین و ضرورت آزمون آن‌ها در دنیای واقعی تأکید دارند؛ از این رو، تحقیقات آتی باید بر پیاده‌سازی میدانی در پروژه‌های واقعی و اعتبارسنجی عملکرد بلاکچین در شرایط عملیاتی متمرکز شوند (۳۰، ۳۱، ۳۸).

• راهکارهای پیشرفته امنیت و حریم خصوصی

چندین مطالعه، بهبودهایی در زمینه امنیت و حریم خصوصی پیشنهاد کردند. کیم و همکاران (۲۰۲۴) ادغام اثبات‌های دانش صفر را برای حفظ حریم خصوصی و امنیت پیشنهاد کردند، توصیه‌ای که توسط چندین محقق دیگر نیز تکرار شد (۳۷). توسعه

کامپیوتری را ادغام می‌کنند، توسط کیم و همکاران (۲۰۲۴) و دیگران به عنوان چالش‌های مهم برجسته شدند (۳۷). هزینه‌های تراکنش، الزامات زیرساختی برای نگهداری شبکه‌ها و هزینه‌های مالی و محاسباتی مرتبط با پیاده‌سازی بلاکچین، از جمله نگرانی‌های مهم در زمینه منابع و هزینه‌ها هستند (۳۱، ۳۴، ۳۷، ۴۱).

• مسائل مربوط به راهبری و مقررات

چالش‌های مربوط به راهبری و مقررات در چندین مطالعه مورد توجه قرار گرفت. نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی توسط پان و همکاران (۲۰۲۵) و شو و همکاران (۲۰۲۲) برجسته شد (۲۳، ۴۲). شکاف‌های قانونی توسط وو و همکاران (۲۰۲۱) به عنوان موانع بالقوه برای پیاده‌سازی ذکر شد (۳۱). نگرانی‌های مربوط به امنیت و راهبری در مورد مدیریت دسترسی به اطلاعات توسط مرتضی و همکاران (۲۰۲۱) شناسایی شد (۳۰). نیاتو و همکاران (۲۰۲۴) خطر گزارش‌های نادرست به دلیل محافظت قوی از ناشناس بودن را به عنوان یک چالش راهبری در سیستم گزارش‌دهی حوادث نزدیک به وقوع با حفظ حریم خصوصی خود ذکر کردند (۴۰). چالش‌های مربوط به حریم خصوصی داده‌ها، شکاف‌های قانونی، نگرانی‌های امنیتی در مورد دسترسی به اطلاعات و خطر گزارش‌های نادرست در سیستم‌های ناشناس، مسائل مهم در زمینه راهبری و مقررات استفاده از بلاکچین در ایمنی ساخت‌وساز را تشکیل می‌دهند (۲۳، ۳۰، ۳۱، ۴۰، ۴۲).

۴) مسیرهای تحقیقاتی آتی

• ادغام فناوری

ادغام با سایر فناوری‌ها به عنوان یک مسیر تحقیقاتی برجسته ظهور کرد. چندین مطالعه ادغام با اینترنت اشیا^۱، هوش مصنوعی و دوقلوهای دیجیتال^۲ را پیشنهاد کردند، به طوری که یانگ و همکاران (۲۰۲۲) به طور خاص ادغام با فناوری‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان

1. شبکه حسگرها/تجهیزات متصل برای گردآوری داده محیط کارگاه (IoT)
2. همزاد دیجیتال دارایی/فرآیند برای رصد و تصمیم‌گیری آنی (Digital Twins)

مکانیزم‌های اعتبار توسط کیم و همکاران (۲۰۲۴) و نیاتو و همکاران (۲۰۲۴) برای کاهش مشکل اوراکل و حملات خارجی پیشنهاد شد (۳۷، ۴۰). پان و همکاران (۲۰۲۴) بهبودهای رمزنگاری را برای امنیت داده‌های خارج از زنجیره^۱ پیشنهاد کردند (۳۸). تحقیقات آتی در این حوزه، با هدف رفع محدودیت‌های فعلی ضمن حفظ مزایای بلاک‌چین، باید بر توسعه راهکارهای پیشرفته‌تر برای حفظ حریم خصوصی (مانند اثبات دانش صفر) و بهبود امنیت داده‌ها و قراردادهای هوشمند متمرکز شوند (۳۷، ۳۸، ۴۰).

• تجربه کاربری و تعامل

بهبود تجربه کاربری و تعامل توسط چندین مطالعه مورد تاکید قرار گرفت. توسعه مکانیزم‌های انگیزشی توسط کیم و همکاران (۲۰۲۴) و دیگران برای تشویق مشارکت کارگران پیشنهاد شد (۳۷). نادری و همکاران (۲۰۲۳) و بائو و همکاران (۲۰۲۴) بررسی اقتصاد توکنی^۲ را برای ایجاد انگیزه در رفتارهای ایمن پیشنهاد کردند (۳۴، ۴۱). بائو و همکاران (۲۰۲۴) به طور خاص ادغام با ویژگی‌های متاورس^۳ را برای ارتقای آموزش ایمنی مبتنی بر واقعیت مجازی توصیه کردند (۴۱). نیاتو و همکاران (۲۰۲۴) بر نیاز به بهبود قابلیت استفاده برای غلبه بر پیچیدگی بالای فناوری سیستم گزارش‌دهی با حفظ حریم خصوصی خود تاکید کردند (۴۰). تحقیقات آتی می‌توانند بر بهبود تجربه کاربری سیستم‌های مبتنی بر بلاک‌چین، توسعه مکانیزم‌های انگیزشی موثر و ادغام با فناوری‌های نوین مانند متاورس برای ارتقای مشارکت و آگاهی ایمنی تمرکز کنند (۳۴، ۳۷، ۴۰، ۴۱).

بحث

این مرور نشان می‌دهد بلاک‌چین زمانی در ایمنی کارگاه‌های ساختمانی بیشترین ارزش را ایجاد می‌کند که به‌عنوان زیرساخت اعتماد داده‌ای و در کنار فناوری‌های

مکمل (بینایی‌ماشینی، شناسایی با امواج رادیویی/ تشخیص چهره، اینترنت اشیا، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و دوقلوهای دیجیتال) به‌کار رود. سازوکارهای اثر آن عبارت‌اند از: الف) ثبت تغییرناپذیر با مهر زمانی بی‌طرف برای لاگ‌های ایمنی و عدم انطباق که امکان دستکاری یا انکار سوابق را می‌کاهد (۲۱، ۳۱، ۳۷). ب) قراردادهای هوشمند برای اجرای قواعد انطباق و تکمیل اقدامات اصلاحی (۳۱، ۳۶). ج) کانال‌های گزارش‌دهی با حفظ حریم خصوصی همراه با مشوق‌های توکنی که مشارکت و گزارش‌های نزدیک‌به‌وقوع را افزایش می‌دهد (۳۴، ۳۹-۴۱). و د) معماری داده‌ی ترکیبی (ثبت هش^۴ / متاداده روی زنجیره و نگهداری امن محتوای حجیم در خارج از زنجیره/IPFS) که ممیزی‌پذیری را بدون فشار کارایی بر زنجیره حفظ می‌کند (۲۱، ۳۸). بدین ترتیب، بحث حاضر از تکرار صرف یافته‌ها فراتر می‌رود و نشان می‌دهد «چگونه» بلاک‌چین می‌تواند به ارتقای ایمنی بینجامد.

• زمینه‌های کاربرد مؤثر/کمتر مؤثر

بلاک‌چین در پروژه‌های چندسازمانی/چندپیمانکار با تعارض منافع (مانند مشارکت عمومی-خصوصی، مهندسی، تدارکات و ساخت، زیرساخت‌های بزرگ و سازه‌های بلندمرتبه/صنعتی) بیشترین کارآمدی را دارد؛ زیرا نیاز به مهر زمانی بی‌طرف، ردیابی تغییرات و پاسخ‌گویی در این پروژه‌ها بالاست (۱۸، ۳۰، ۳۱، ۳۳). در فعالیت‌های پرخطر و پرتکرار (داربست‌بندی، کار در ارتفاع، حفاری) نیز نظارت بلادرنگ همراه با ثبت قابل‌ممیزی ضروری است (۳۲، ۳۶). علاوه بر این، در زنجیره‌های تأمین گسترده که کنترل صلاحیت و گواهی‌های آموزشی نیروی کار اهمیت دارد، اعتبارسنجی گواهی‌ها و سوابق ایمنی بر بستر بلاک‌چین مزیت‌آفرین است (۲۱، ۳۰، ۳۵). در مقابل، در پروژه‌های کوچک و تک‌دی‌نفع با جریان داده‌ی ساده و ریسک پایین، سامانه‌های متمرکز خوش‌طراحی معمولاً کفایت می‌کنند (انراگشت یکتا از داده برای یکپارچگی/ردیابی) Hash 4.

1. ثبت مستقیم روی بلاک‌چین در برابر نگهداشت بیرون از زنجیره (Off-chain)
2. Token Economy (جریمه و ردیابی مشارکت یا انطباق)
3. Metaverse (محیط‌های مجازی تعاملی برای آموزش/تمرین سناریوهای ایمنی)
4. Hash (انراگشت یکتا از داده برای یکپارچگی/ردیابی)

و سر بار پیاده‌سازی بلاک‌چین توجیه اقتصادی ندارد. همچنین در محیط‌های با بلوغ دیجیتال پایین (نبود استاندارد داده یا اتصال پایدار)، ابتدا باید زیرساخت و راهبری داده تقویت شود. در سناریوهای متکی به ویدئوی حجیم نیز راهبرد برون‌زنجیره‌ای الزام‌آور است (۳۸).

• نمونه‌های نماینده و درس‌آموخته‌های اجرایی
نمونه‌های گزارش‌شده در بدنه‌ی شواهد، هرچند غالباً در سطح پایلوت/نمونه‌ساخت‌اند، مسیرهای عملی را روشن می‌کنند: پیاده‌سازی هایپرلجر فابریک برای بازرسی کیفیت/ایمنی با قراردادهای هوشمند و ثبت غیرقابل‌دستکاری رخدادها (۳۱)، سامانه‌ی هشدار زودهنگام نزدیک‌به‌وقوع با ادغام شناسایی با امواج رادیویی/تشخیص چهره/هوش مصنوعی و ثبت رخدادها روی زنجیره (۳۶)، چارچوب مدیریت اطلاعات ایمنی مبتنی بر فابریک برای شفافیت و ردیابی میان ذینفعان (۳۰)، سامانه‌ی غیرمتمرکز مدیریت اطلاعات حوادث با اتریوم (۲۱) + IPFS، مدیریت قابل‌انکای اطلاعات داربست‌بندی به‌عنوان فعالیتی پرخطر (۳۲) و چارچوب‌های یادگیری عمیق/فدرالی با لنگر بلاک‌چین برای راهبری مشارکتی امن (۳۸، ۴۲). جمع‌بندی عملی این است: از شبکه‌ی اجازه‌محور کنسرسیومی با قراردادهای ساده و ممیزی‌پذیر آغاز شود؛ پردازش‌های سنگین هوش مصنوعی در cloud-edge-end انجام گیرد و فقط هش/متاداده به زنجیره منتقل شود؛ طرحواره‌ی متاداده و نقش/سطوح دسترسی از ابتدا استاندارد شود؛ داده‌ی حجیم برون‌زنجیره بماند و برای اثبات وجود از لنگر زمان‌بندی عمومی استفاده شود (۳۷، ۲۸).

• چالش‌ها و راهکارهای گذر

۱) فنی- ذخیره‌سازی/کارایی: نگهداری مستقیم ویدئو/تصویر روی زنجیره مناسب نیست و بار محاسباتی/تراکنش را افزایش می‌دهد؛ راهکار، معماری ترکیبی (هش روی زنجیره، محتوا در مخزن رمزگذاری‌شده یا IPFS)، جمع‌بندی تراکنش‌ها و استفاده از کانال‌های خصوصی در

شبکه‌های اجازه‌محور است (۲۱، ۳۸). مسئله‌ی اوراکل (صحت داده‌ی برون‌زنجیره) با حسگرهای امضادار و کالیبره، ثبت زنجیره‌ای تاریخچه‌ی کالیبراسیون، اعتبارسنجی چندمنبعی و به‌کارگیری مکانیزم‌های اعتبار برای منابع داده کاهش می‌یابد (۳۷، ۴۰). در امنیت قراردادهای هوشمند، طراحی حداقلی/ماژولار، ممیزی رسمی و تحلیل ایستا، همراه با مکانیزم توقف اضطراری و مسیر مداخله‌ی انسانی ضروری است (۳۶).

۲) سازمانی- ادغام و پذیرفتاری: همسوسازی با رویه‌های موجود دشوار و نیازمند مهارت است؛ راهکار، پایلوت‌های مرحله‌ای در موارد کم‌ریسک و پربازده (گزارش‌های نزدیک‌به‌وقوع، لاگ بازرسی، گواهی‌های آموزشی)، ارتقای مهارت برای تیم‌های ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست/فناوری اطلاعات و گزارش پیش/پس با سنجه‌های استاندارد برای جلب اعتماد ذینفعان است (۱۸، ۳۰-۳۲، ۳۶، ۳۷، ۴۰). هزینه/منابع با انتخاب شبکه‌ی اجازه‌محور کنسرسیومی، ثبت هش به‌جای داده‌ی خام، تجمیع تراکنش‌ها و بهینه‌سازی مسیرهای پردازش مدیریت می‌شود (۳۱، ۳۴، ۳۷، ۴۱).

۳) راهبری و حقوقی: ابهام در پذیرش ادله‌ی زنجیره‌ای و مرزهای مالکیت داده با تدوین منشور راهبری کنسرسیوم (مالکیت/دسترسی/نگهداشت/حذف داده)، الحاقیه‌ی قراردادی برای به‌رسمیت‌شناختن لاگ‌های زنجیره‌ای در ممیزی/دعاوی و استفاده از مهرزمانی بی‌طرف به‌عنوان «اثبات وجود» تا حد زیادی رفع می‌شود (۳۰، ۳۱). در حریم خصوصی داده‌های شخصی/بیومتریک، اصل حداقل‌گرایی داده و پردازش لبه‌ای، اثبات‌های دانش صفر و هویت‌های غیرمتمرکز^۱، به‌همراه سطوح دسترسی لایه‌بندی‌شده و تفکیک داده‌ی عمومی/محرمانه توصیه می‌شود (۲۳، ۳۷، ۴۰، ۴۲). ریسک گزارش‌های نادرست در کانال‌های ناشناس با ترکیب ناشناس‌سازی و مکانیزم اعتبار گزارش‌دهنده/منبع، وثیقه‌ی خرد توکنی برای بازدارندگی و تریاژ انسانی نمونه‌ای کاهش می‌یابد (۳۷).

۱. استانداردهایی برای اثبات هویت/صلاحیت بدون پایگاه متمرکز

محدودیت‌ها

با توجه به نوظهور و تخصصی بودن کاربرد بلاک‌چین در ایمنی ساخت‌وساز، این مرور بر ۱۸ مطالعه متکی است و بخش قابل توجهی از آن‌ها ماهیت مفهومی، شبیه‌سازی یا پایلوت/نمونه‌ساخت دارند. ناهمگونی بسترهای فنی و سنجه‌ها و نیز محدود بودن شواهد میدانی (به‌ویژه مطالعات پیش/پس همراه با گروه مقایسه) تعمیم‌پذیری نتایج و برآورد اندازه‌ی اثر را با عدم قطعیت همراه می‌کند. همچنین، با توجه به اندازه‌ی کوچک بدنه‌ی شواهد، احتمال سوگیری انتشار منتفی نیست و این نکته در تفسیر نتایج مدنظر قرار گرفت.

توصیه‌های پژوهشی مبتنی بر شواهد

این بخش بر پایه‌ی تم «مسیرهای آینده» در یافته‌ها تنظیم شده و همان نشانه‌ها را به برنامه‌ی پژوهشی قابل اجرا تبدیل می‌کند. در ادامه چارچوب اقدام و اولویت‌ها ارائه می‌شود.

- اعتبارسنجی میدانی اثربخشی: پیشنهاد می‌شود اثر راهکارهای بلاک‌چینی بر ایمنی، در محیط واقعی و با طرح‌های مقایسه‌ای اجرا شود؛ به‌ویژه «طرح گام‌به‌گام خوشه‌ای» یا طرح‌های پیش/پس در حداقل دو پروژه طی ۶ تا ۱۲ ماه. معماری داده به‌صورت «برون‌زنجیره برای داده‌ی خام» و «ثبت برخط درهم‌سازی و مهر زمانی روی زنجیره» باشد و شبکه از نوع «اجازه‌محور» انتخاب شود. سنجه‌های کلیدی برای قضاوت درباره‌ی اثر شامل نرخ گزارش نزدیک‌به‌وقوع به‌ازای ۱۰۰ کارگر-ماه، «زمان تا تکمیل اقدام اصلاحی» بر حسب روز، و نرخ بسامد حوادث منجر به از دست رفتن زمان است؛ علاوه بر آن، کامل بودن و صحت ثبت‌های زنجیره نیز پایش شود.

- ادغام چندفناوری (اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و دوقلوی دیجیتال): ارزش افزوده‌ی ادغام عمیق این فناوری‌ها با بلاک‌چین باید در برابر سناریوی «بلاک‌چین تنها» سنجیده شود. پیشنهاد می‌شود جریان داده cloud-edge-end طراحی گردد،

۴۰). کنترل دسترسی نقش محور و ثبت کامل رخدادهای دسترسی نیز مرزبندی روشن بین نقش‌ها/سازمان‌ها ایجاد می‌کند (۳۰).

• مدل منطقی اثر

این مدل نشان می‌دهد ورودی‌ها (ثبت تغییرناپذیر + قرارداد هوشمند + کانال گزارش محرمانه + معماری داده‌ی ترکیبی) چگونه به خروجی‌های میانی (افزایش نرخ گزارش نزدیک‌به‌وقوع، کاهش «زمان تا تکمیل اقدام اصلاحی»، کاهش اختلاف بر سر اصالت سوابق) و در نهایت به پیامدها (کاهش بازکاری ناشی از عدم انطباق، کشف زودتر خطر، ارتقای پاسخ‌گویی و بهبود شاخص‌های حادثه مانند شاخص ایمنی مبتنی بر نرخ بسامد حوادث منجر به از دست رفتن زمان^۱/نرخ کل ثبت حوادث^۲ منجر می‌شود (۳۱، ۳۲، ۳۶-۳۸).

• پیامدهای اجرایی و سنجه‌های ارزیابی

دامنه‌ی مناسب شروع شامل ردیابی مدارک/گواهی‌های آموزشی، لاگ عدم انطباق و اقدامات اصلاحی، گزارش‌های نزدیک‌به‌وقوع با ناشناس‌سازی انتخابی و چک‌لیست‌های بازرسی خودکار است (۱۸، ۲۱، ۳۰-۳۲، ۳۶، ۳۷، ۴۰). برای قضاوت مبتنی بر داده، سنجه‌های پیش/پس از همان روز اول تعریف شود: زمان تا تکمیل اقدام اصلاحی، نرخ گزارش نزدیک‌به‌وقوع، نرخ بازکاری مرتبط با عدم انطباق، تأخیر کشف خطر، نرخ بسامد حوادث منجر به از دست رفتن زمان نرخ بسامد حوادث منجر به از دست رفتن زمان/نرخ کل ثبت حوادث و هزینه‌ی متوسط هر مورد انطباق. انتخاب شبکه‌ی اجازه‌محور کنسرسیومی (مانند هایپرلجر فابریک) با لانگر زمان‌بندی در زنجیره‌ی عمومی صرفاً برای اثبات وجود، همراه با ممیزی امنیتی و آزمون تنش پیش از بهره‌برداری توصیه می‌شود (۳۱، ۳۳، ۳۸).

1. Lost Time Injury Frequency Rate (LTIFR)
2. Total Recordable Incident Rate (TRIR)

هفتگی فعال» و «ماندگاری مشارکت در سه ماه» گزارش شود.

اولویت‌بندی زمانی در افق کوتاه‌مدت (۶ تا ۱۲ ماه)، اجرای مطالعه‌های میدانی اثربخشی و بهبود تجربه‌ی کاربری در اولویت است؛ در افق میان‌مدت (۱۲ تا ۲۴ ماه)، ادغام چندفناوری و راهکارهای حریم خصوصی دنبال شود؛ و در افق بلندمدت (۲۴ تا ۳۶ ماه)، تعامل‌پذیری و استانداردسازی به‌همراه ارزیابی هزینه-فایده به‌صورت نظام‌مند پیگیری شود.

این توصیه‌ها محدودیت‌های مرور (به‌ویژه غلبه‌ی نمونه‌های مفهومی و آزمایشگاهی) را هدف می‌گیرند و مسیر گذار از قابلیت‌سنجی آزمایشگاهی به شواهد میدانی قابل اتکا را روشن می‌کنند.

نتیجه‌گیری

این مرور نظام‌مند با هدف سنتز جامع و نظام‌مند ادبیات پژوهشی موجود در مورد کاربرد فناوری بلاک‌چین در مدیریت ایمنی کارگاه‌های ساختمانی انجام شد. هدف اصلی، شناسایی راهکارهای پیشنهادی، بررسی مزایا و چالش‌ها، و ترسیم مسیرهای تحقیقاتی آتی در این حوزه نوظهور بود.

پژوهش حاضر نشان داد که بلاک‌چین پتانسیل قابل توجهی برای تحول در ایمنی ساخت‌وساز از طریق بهبود سیستم‌های نظارت و بازرسی، گزارش‌دهی و مدیریت اطلاعات، راهکارهای متمرکز بر کارگر و کاربردهای تخصصی دارد. مزایای کلیدی شناسایی شده شامل افزایش یکپارچگی و امنیت داده‌ها، ارتقای شفافیت و پاسخ‌گویی، بهبودهای عملیاتی و تقویت فرهنگ ایمنی است. با این حال، مسیر پیاده‌سازی این فناوری با چالش‌های مهمی از جمله پیچیدگی‌های فنی، موانع ادغام و پذیرش در صنعت، نگرانی‌های مربوط به هزینه و منابع، و مسائل راهبری و مقررات روبرو است.

بر مبنای جست‌وجوی انجام‌شده تا ۱۵ اوت ۲۰۲۵، مشارکت علمی این پژوهش ارائه یکی از نخستین سنتزهای جامع و نظام‌مند از کاربردهای بلاک‌چین در ایمنی

داده‌ی حجیم برون‌زنجیره نگهداری شود و مرجعیت با ثبت درهم‌سازی و مهر زمانی روی زنجیره تأمین شود؛ اتصال به منابع بیرونی نیز از طریق اوراکل‌های معتبر صورت گیرد. برای ارزیابی، شاخص‌هایی مانند «تأخیر کشف خطر» (ثانیه)، «دقت، یادآوری» در الگوریتم‌های تشخیص، «پایداری سامانه» و «سربرار پردازش»^۱ گزارش شود.

• حریم خصوصی و امنیت (اثبات با دانش صفر و ممیزی قرارداد): برای تحقق انطباق بدون افشای داده‌ی شخصی، به‌کارگیری «اثبات با دانش صفر» در سناریوهایی مانند گواهی آموزش ایمنی و مجوزها توصیه می‌شود و کد قراردادهای هوشمند باید با ابزارهای رسمی ممیزی شود. ارزیابی با سنجه‌هایی چون «رخدادهای افشای ناخواسته در ماه»، «نقص امنیتی به‌ازای ۱۰۰۰ تراکنش» و «زمان وصله‌ی آسیب‌پذیری»^۲ (روز) انجام گیرد تا ریسک‌های عملیاتی به‌طور کمی مدیریت شوند.

• تعامل‌پذیری و استانداردسازی: برای انتقال‌پذیری داده‌ی ایمنی میان پیمانکاران و پلتفرم‌ها، ترکیبی از «آزمایشگاه انطباق»^۳ و «مطالعه‌ی میدانی چندسازمانی» اجرا شود. لازم است طرحواره‌ی داده برای رویدادهایی مانند حادثه، نزدیک‌به‌وقوع و اقدام اصلاحی استاندارد شود و پل‌های بین‌زنجیره‌ای امن به‌صورت آزمایشی ارزیابی گردد. شاخص‌های قضاوت شامل «ترخ تبادل موفق»، «ناسازگاری طرحواره به‌ازای ۱۰۰ تبادل» و «هزینه‌ی تبادل هر رکورد» است.

• تجربه‌ی کاربری و پذیرش: برای افزایش مشارکت کارگران و سرپرستان، نسخه‌های «کم‌اصطکاک» از رابط کاربری بررسی و در قالب «آزمون مقایسه‌ای دو نسخه» و مداخلات انگیزشی سبک (غیرمالی) ارزیابی شود. برای سنجش پیامدها، «شاخص قابلیت استفاده‌ی سامانه»، «پرسشنامه‌ی تجربه‌ی کاربری»، «ترخ استفاده‌ی

۱. افزایش منابع محاسباتی و زمانی لازم به‌خاطر به‌کارگیری سامانه‌ی جدید (مثلاً بلاک‌چین) نسبت به حالت مرجع
۲. فاصله‌ی زمانی از لحظه‌ی ثبت/کشف رسمی آسیب‌پذیری تا استقرار کامل اصلاحیه روی همه‌ی گره‌ها/کاربران در دامنه‌ی مطالعه
۳. محیط کنترل‌شده‌ی شبه‌واقعی برای آزمون این‌که سامانه‌ها با استانداردهای داده و پروتکل‌ها سازگارند و با هم تعامل‌پذیر کار می‌کنند—پیش از استقرار میدانی.

محدودیت‌های این مرور عمدتاً به حجم ادبیات پژوهشی در مراحل اولیه توسعه و غلبه ماهیت مفهومی یا شبیه‌سازی مطالعات بر شواهد تجربی بازمی‌گردد. از این رو، پژوهش‌های آتی باید از فاز مفهومی فراتر رفته و بر اعتبارسنجی عملی راهکارها، توسعه استانداردهای صنعتی، و بررسی عمیق‌تر جنبه‌های انسانی و اقتصادی تمرکز کنند تا پتانسیل تحول‌آفرین بلاک‌چین در ارتقای ایمنی کارگاه‌ها به طور کامل محقق شود.

ساخت‌وساز نهفته است. با استفاده از روش‌شناسی دقیق و شفاف، این مطالعه توانست نقشه‌ای روشن از وضعیت کنونی دانش ترسیم کرده و شکاف‌های حیاتی را برای پژوهش‌های آتی برجسته سازد. این بینش‌ها می‌توانند به عنوان مبنایی مستحکم برای پژوهشگران در جهت توسعه راهکارهای نوآورانه و برای دست‌اندرکاران صنعت در جهت تصمیم‌گیری‌های آگاهانه برای ارتقای ایمنی عمل کنند. با توجه به ماهیت نوظهور و تخصصی این حوزه،

REFERENCES

1. International Labour Organization. Occupational safety and health management in the construction sector [Internet]. Geneva: ILO; n.d. [cited 2025 May 2]. Available from: <https://www.ilo.org/meetings-and-events/occupational-safety-and-health-management-construction-sector-3>.
2. U.S. Bureau of Labor Statistics. National Census of Fatal Occupational Injuries in 2023 [Internet]. Washington, DC: U.S. Department of Labor; 2024 [cited 2025 May 2]. Available from: <https://www.bls.gov/news.release/cfoi.htm>.
3. 2,115 people died in workplace incidents in the year 1402; 983 workers died due to falls from height. Jamaran News (JPlus). 2024. [Persian].
4. Increase in work-related fatalities over the past three years. Islamic Republic News Agency (IRNA). 2025. [Persian].
5. Fatemeh Rap. Around two thousand people killed in workplace incidents in the year 1403. Iranian Labour News Agency (ILNA). 2025. [Persian].
6. 95 %of occupational accidents involve men; the construction sector has the highest number of occupational injuries. Iranian Labour News Agency (ILNA). 2020. [Persian].
7. 37% of work-related accidents are in the construction industry. Mehr News Agency. 2023. [Persian].
8. Izadi N, Aminian O, Esmaili B. Occupational accidents in Iran: risk factors and long term trend)2007-2016.(J Res Health Sci. 2019;19(2):e00448.
9. Haslam RA, Hide SA, Gibb AGE, Gyi DE, Pavitt T, Atkinson S, et al. Contributing factors in construction accidents. *Appl Ergon*. 2005;36(4):401-15.
10. Abdelhamid TS, Everett JG. Identifying root causes of construction accidents. *J Constr Eng Manage*. 2000 Jan;126(1):52-60.
11. Wu C, Fang D, Li N. Roles of owners' leadership in construction safety: The case of high-speed railway construction projects in China. *Int J Proj Manag*. 2015;33(8):1665-79.
12. Schwatka NV, Hecker S, Goldenhar LM. Defining and Measuring Safety Climate: A Review of the Construction Industry Literature. *Ann Occup Hyg*. 2016;60(5):537-50.
13. Ibrahim A, Nnaji C, Namian M, Koh A, Techera U. Investigating the impact of physical fatigue on construction workers' situational awareness. *Saf Sci*. 2023;163:106103.
14. Gariazzo C, Taiano L, Bonafede M, Leva A, Morabito M, de' Donato F, et al. Association between extreme temperature exposure and occupational injuries among construction workers in Italy: An analysis of risk factors. *Environ Int*. 2023;171:107677.
15. Singh AK, Kumar VRP, Irfan M, Mohandes SR, Awan U. Revealing the barriers of blockchain technology for supply chain transparency and sustainability in the construction industry: An application of Pythagorean FAHP methods. *Sustainability* [Internet]. 2023; 15(13).
16. Woźniak Z, Hoła B. The structure of near misses and occupational accidents in the polish construction

- industry. *Heliyon*. 2024;10(4):e26410.
17. Kumi L, Jeong J, Jeong J. State-of-the-Art review of blockchain applications for construction safety: Opportunities, challenges, and future directions. *Saf Sci*. 2025;191:106966.
18. Zhang P, Fung IWH, Lee RYY. A blockchain-enabled conceptual framework for near-miss management in the construction industry. *International Journal of Innovation, Management and Technology*. 2023;14(3).
19. Agbo CC, Mahmoud QH, Eklund JM. Blockchain technology in Healthcare: A systematic review. *Healthcare (Basel, Switzerland)*. 2019;7(2).
20. Celik BG, Abraham YS, Attaran M. Unlocking blockchain in construction: A systematic review of applications and barriers. *Buildings [Internet]*. 2024; 14(6).
21. Ahmadiheykhsarmast S, Aminbakhsh S, Sonmez R, Uysal F. A transformative solution for construction safety: Blockchain-based system for accident information management. *Journal of Industrial Information. Integration*. 2023;35:100491.
22. Wu H, Zhong B, Li H, Chi H-L, Wang Y. On-site safety inspection of tower cranes: A blockchain-enabled conceptual framework. *Saf Sci*. 2022;153:105815.
23. Xu J, Lu W, Wu L, Lou J, Li X. Balancing privacy and occupational safety and health in construction: A blockchain-enabled P-OSH deployment framework. *Saf Sci*. 2022;154:105860.
24. Soltani M, Kim D, Pedro A, Yang J, Tran S, Lee D, et al. iSafeIncentive: Transforming construction safety culture through blockchain incentives. In: *Proceedings. Florence (Italy): Firenze University Press; 2023. p. 360-7.*
25. Waqar A, Alharbi LA, Abdullah Alotaibi F, Alrasheed KA, Khan AM, Almujiabah H. Challenges of blockchain implementation in construction. *Journal of Engineering*. 2024;2024(1):2442345.
26. Yoon Jong H, Pishdad-Bozorgi P. State-of-the-art review of blockchain-enabled construction supply chain. *J Constr Eng Manage*. 2022;148(2):03121008.
27. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372:n71.
28. Wu L, Lu W, Xue F, editors. *Construction inspection information management with consortium Blockchain*. In: *International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate; 2020 Nov 28; Singapore. Singapore: Springer; 2020. p. 1397–1406.*
29. Wei Y, Cui E. Application of blockchain and big data technology in the safety information management of architecture employees. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;567(1):012042.
30. Morteza A, Ilbeigi M, Schwed J. A blockchain information management framework for construction safety. *Computing in Civil Engineering 2021. Proceedings2022*. p. 342-9.
31. Wu H, Zhong B, Li H, Guo J, Wang Y. On-site construction quality inspection using blockchain and smart contracts. *J Manag Eng*. 2021;37(6):04021065.
32. Yang J, Lee D, Baek C, Park C, Lan BQ, Lee D. Leveraging blockchain for scaffolding work management in construction. *IEEE Access*. 2022;10:39220-38.
33. Li J, Wang J, Ji W, Yu Y, Chen C, editors. *Construction project quality and safety management system based on blockchain technology. 2022 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Yantai); 2022 13-16 Oct. 2022.*
34. Naderi H, Shojaei A, Ly R. Autonomous construction safety incentive mechanism using blockchain-enabled tokens and vision-based techniques. *Autom Constr*. 2023;153:104959.
35. Saah AEN, Yee J-J, Choi J-H. Securing construction workers' data security and privacy with blockchain technology. *Appl Sci (Basel)*. 2023;13(24):13339.
36. Li M, Lin Q, Jin H. Research on near-miss incidents monitoring and early warning system for building construction sites based on blockchain technology. *J Constr Eng Manage*. 2023;149(12):04023124.
37. Kim D, Yang J, Lee D, Lee D, Rahimian F, Park C. Blockchain-enhanced computer vision approach for remote safety inspection in construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2024.
38. Pan X, Shen L, Zhong B, Sheng D, Huang F, Yang L. Novel blockchain deep learning framework to ensure video security and lightweight storage for construction safety management. *Adv Eng Inform*. 2024;59:102334.
39. NYATO EJ, KIMITO EC, editors. *A conceptual blockchain and token-incentive approach for near miss reporting in construction. International conference on construction engineering and project management;*

- 2024: Korea Institute of Construction Engineering and Management.
40. Nyato EJ, Kimito E, Yang J, Lee D, Lee D. Blockchain-integrated zero-knowledge proof system for privacy-preserving near-miss reporting in construction projects. *Autom Constr.* 2024;168:105825.
41. Bao QL, Tran SV-T, Yang J, Pedro A, Pham HC, Park C. Token incentive framework for virtual-reality-based construction safety training. *Autom Constr.* 2024;158:105167.
42. Pan X, Ding L, Zhong B, Shen L, Wang Y. Collaborative governance: Blockchain-based federated learning for construction safety service. *IEEE Trans Eng Manag.* 2025;72:1163-77.
43. Braun V, Clarke V. Using thematic analysis in psychology. *Qual Res Psychol.* 2006;3:77-101.