



ارائه مدلی برای بهبود مونیتورینگ زنجیره تأمین با ادغام الگوریتم‌های هوش مصنوعی فازی در بستر بلاکچین: مطالعه موردی صنعت سلامت

شبهه استناددهی: احمدی، احمد، نجفی، امیر، و ایرج پور، علیرضا. (۱۴۰۵). ارائه مدلی برای بهبود مونیتورینگ زنجیره تأمین با ادغام الگوریتم‌های هوش مصنوعی فازی در بستر بلاکچین: مطالعه موردی صنعت سلامت. یادگیری هوشمند و تحول مدیریت، ۴(۴)، ۲۸-۱.	تاریخ چاپ نهایی: ۱ آبان ۱۴۰۵ تاریخ چاپ اولیه: ۱۷ تیر ۱۴۰۵ تاریخ پذیرش: ۲۸ بهمن ۱۴۰۴ تاریخ بازنگری: ۲۱ بهمن ۱۴۰۴ تاریخ ارسال: ۱۳ آبان ۱۴۰۴	احمد احمدی ^۱ امیر نجفی ^۲ علیرضا ایرج پور ^۱
--	---	---

چکیده

پژوهش حاضر با هدف طراحی و اعتبارسنجی یک مدل یکپارچه مبتنی بر بلاکچین و الگوریتم‌های هوش مصنوعی فازی برای بهبود مونیتورینگ زنجیره تأمین در صنعت سلامت انجام شد. این پژوهش از نظر هدف کاربردی-توسعه‌ای و از نظر روش آمیخته با رویکرد اکتشافی متوالی بود. جامعه آماری شامل ۱۱۷ نفر از مدیران، کارشناسان و خبرگان فعال در زنجیره تأمین صنعت سلامت استان قزوین بود که به روش سرشماری در بخش کمی مطالعه شدند. در بخش کیفی، با ۱۵ خبره مصاحبه نیمه‌ساختاریافته انجام شد و داده‌ها از طریق کدگذاری باز، محوری و انتخابی تحلیل شدند. ابزار کمی پژوهش پرسشنامه محقق ساخته بود که پایایی کل آن با آلفای کرونباخ ۰.۹۱۶ تأیید شد. مدل پیشنهادی در سه لایه شامل بلاکچین مبتنی بر Hyperledger Fabric، هوش مصنوعی فازی شامل سیستم استنتاج فازی و نقشه شناختی فازی، و لایه یکپارچه‌سازی طراحی شد. داده‌ها با آمار توصیفی و استنباطی، تحلیل عاملی تأییدی، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، شبیه‌سازی پویای سیستم و آزمون t تحلیل شدند. نتایج FAHP نشان داد امنیت و اعتبار با وزن ۰.۳۲۴ مهم‌ترین بعد مونیتورینگ بود و پس از آن انطباق‌پذیری با وزن ۰.۲۸۷، ردیابی و پیگیری با وزن ۰.۲۲۱ و کارایی عملیاتی با وزن ۰.۱۶۸ قرار گرفتند. در نقشه شناختی فازی، تغییرناپذیری داده با درجه مرکزی ۱۵.۲۸ مؤثرترین مفهوم شناسایی شد. آزمون t تک‌نمونه‌ای نشان داد همه ابعاد به طور معناداری بالاتر از نقطه میانی مقیاس بودند. نتایج آزمون t زوجی نیز تفاوت معنادار مدل پیشنهادی با سیستم سنتی را در دقت تشخیص اختلالات، رضایت کاربری، امنیت درک شده و شفافیت اطلاعات تأیید کرد. مدل پیشنهادی با امتیاز وزنی ۸.۹۲ از ۱۰، نسبت به سیستم سنتی با امتیاز ۷.۷۴، بهبود ۱۵.۲ درصدی نشان داد. ادغام بلاکچین و هوش مصنوعی فازی می‌تواند چارچوبی کارآمد برای مونیتورینگ هوشمند زنجیره تأمین سلامت فراهم کند. اگرچه مدل پیشنهادی از نظر سرعت و مقیاس‌پذیری نسبت به سیستم‌های متمرکز محدودیت‌هایی دارد، اما مزایای آن در امنیت، شفافیت، قابلیت اعتماد و دقت تصمیم‌گیری، آن را به گزینه‌ای ارزشمند برای بهبود مدیریت زنجیره تأمین سلامت تبدیل می‌کند.

واژگان کلیدی: مونیتورینگ زنجیره تأمین، بلاکچین، هوش مصنوعی فازی، صنعت سلامت، نقشه شناختی فازی، سیستم استنتاج فازی.

مشخصات نویسندگان:

۱. گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
۲. گروه مهندسی صنایع، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پست الکترونیکی: najafi@iaui.ac.ir



A Model for Improving Supply Chain Monitoring by Integrating Fuzzy Artificial Intelligence Algorithms into a Blockchain Platform: A Case Study of the Healthcare Industry

Ahmad Ahmadi ¹ Amir Najafi ^{2*} Alireza Irajpour ¹	Submit Date: 04 November 2025 Revise Date: 10 February 2026 Accept Date: 17 February 2026 Initial Publish: 08 July 2026 Final Publish: 23 October 2026	How to cite: Ahmadi, A., Najafi, A., & Irajpour, A. (2026). A Model for Improving Supply Chain Monitoring by Integrating Fuzzy Artificial Intelligence Algorithms into a Blockchain Platform: A Case Study of the Healthcare Industry. <i>Intelligent Learning and Management Transformation</i> , 4(4), 1-28.
---	--	---

Abstract

This study aimed to design and validate an integrated model based on blockchain technology and fuzzy artificial intelligence algorithms to improve supply chain monitoring in the healthcare industry. This applied-developmental study employed a mixed-methods design with a sequential exploratory approach. The statistical population included 117 managers, specialists, and experts active in the healthcare supply chain in Qazvin Province, all of whom were included in the quantitative phase through census sampling. In the qualitative phase, semi-structured interviews were conducted with 15 experts, and the data were analyzed through open, axial, and selective coding. The quantitative instrument was a researcher-made questionnaire, whose overall reliability was confirmed using Cronbach's alpha coefficient of 0.916. The proposed model was developed in three layers: a blockchain layer based on Hyperledger Fabric, a fuzzy artificial intelligence layer consisting of a fuzzy inference system and fuzzy cognitive maps, and an integration layer. Data were analyzed using descriptive and inferential statistics, confirmatory factor analysis, fuzzy analytic hierarchy process, dynamic system simulation, and t-tests. The FAHP results showed that security and credibility had the highest priority weight among the monitoring dimensions (0.324), followed by adaptability (0.287), tracking and tracing (0.221), and operational efficiency (0.168). In the fuzzy cognitive map, data immutability was identified as the most influential concept, with a centrality degree of 15.28. The one-sample t-test indicated that all main dimensions were significantly higher than the midpoint of the scale. The paired-samples t-test confirmed significant differences between the proposed model and the traditional system in disruption detection accuracy, user satisfaction, perceived security, and information transparency. The proposed model obtained a total weighted score of 8.92 out of 10, compared with 7.74 for the traditional system, indicating a 15.2% improvement. The integration of blockchain and fuzzy artificial intelligence can provide an effective framework for intelligent monitoring of the healthcare supply chain. Although the proposed model has limitations in speed and scalability compared with centralized systems, its advantages in security, transparency, reliability, and decision-making accuracy make it a valuable option for improving healthcare supply chain management.

Keywords: Supply Chain Monitoring, Blockchain, Fuzzy Artificial Intelligence, Healthcare Industry, Fuzzy Cognitive Map, Fuzzy Inference System.

Authors' Information:

najafi@iau.ac.ir

1. Department of Industrial Management, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran
2. Department of Industrial Engineering, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran



© 2026 the authors. This is an open access article under the terms of the [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) License.

مقدمه

زنجیره تأمین سلامت یکی از حساس‌ترین و راهبردی‌ترین حوزه‌های مدیریت زنجیره تأمین به شمار می‌رود، زیرا عملکرد آن به‌طور مستقیم با دسترسی به‌موقع بیماران به دارو، تجهیزات پزشکی، اقلام مصرفی درمانی و خدمات سلامت مرتبط است. در چنین زنجیره‌ای، هرگونه اختلال در تأمین، توزیع، نگهداری، ردیابی یا اعتبارسنجی محصولات می‌تواند پیامدهایی فراتر از زیان اقتصادی داشته باشد و سلامت عمومی، ایمنی بیماران، اعتماد اجتماعی و کارایی نظام درمانی را تحت تأثیر قرار دهد. برخلاف بسیاری از زنجیره‌های تأمین صنعتی که هدف اصلی آنها کاهش هزینه، افزایش بهره‌وری و بهبود سرعت تحویل است، زنجیره تأمین سلامت علاوه بر این مؤلفه‌ها با الزاماتی مانند اصالت محصول، کنترل شرایط نگهداری، انطباق با مقررات ملی و بین‌المللی، مقابله با جعل و تضمین شفافیت داده‌ها مواجه است. از این‌رو، مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت صرفاً به معنای مشاهده جریان کالا نیست، بلکه مجموعه‌ای از فعالیت‌های فنی، مدیریتی، اطلاعاتی و کنترلی را دربر می‌گیرد که هدف آن پایش مداوم وضعیت محصولات، جریان اطلاعات، ریسک‌ها، انطباق‌ها و عملکرد ذی‌نفعان زنجیره است. اهمیت این مسئله زمانی بیشتر می‌شود که زنجیره‌های تأمین معاصر به‌صورت شبکه‌های درهم‌تنیده، چندلایه و آسیب‌پذیر عمل می‌کنند و پایداری و بقاپذیری آنها نیازمند طراحی سازوکارهای هوشمند، شفاف و تاب‌آور است (Ivanov & Dolgui, 2020).

در صنعت سلامت، پیچیدگی زنجیره تأمین به دلیل حضور بازیگران متعدد از جمله تولیدکنندگان، واردکنندگان، شرکت‌های پخش، داروخانه‌ها، بیمارستان‌ها، نهادهای نظارتی و مصرف‌کنندگان نهایی افزایش می‌یابد. این شبکه پیچیده باید هم‌زمان جریان مواد، جریان داده، جریان مالی، الزامات قانونی و استانداردهای ایمنی را مدیریت کند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بهبود عملکرد زنجیره تأمین سلامت مستلزم هماهنگی دقیق میان اعضا، کاهش اتلاف، افزایش دقت تصمیم‌گیری و ارتقای ظرفیت کنترل فرایندها است (Homaioon et al., 2021; Kumar et al., 2019). در این میان، طراحی مناسب زنجیره تأمین دارویی و انتخاب رویکردهای یکپارچه برای سازمان‌دهی شبکه توزیع، می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های طراحی و بهبود کارایی عملیاتی شود (Khojeh et al., 2023). با این حال، کارایی عملیاتی تنها یکی از ابعاد مسئله است و در زنجیره تأمین سلامت، قابلیت ردیابی، اعتبار داده‌ها و انطباق با استانداردها اهمیت بنیادین دارد. برای مثال، قابلیت ردیابی محصولات غذایی و دارویی می‌تواند ادراک مصرف‌کننده از کیفیت را تقویت کند، پاسخگویی اعضای زنجیره را افزایش دهد و امکان تشخیص منشأ اختلالات را فراهم سازد (Shafiei Nikabadi et al., 2024).

تحولات دیجیتال در سال‌های اخیر مسیر تازه‌ای برای بهبود زنجیره‌های تأمین سلامت فراهم کرده است. فناوری‌های نوین مانند بلاکچین، اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، سیستم‌های هوشمند ردیابی و پلتفرم‌های داده‌محور، امکان گذار از سیستم‌های متمرکز و واکنشی به سیستم‌های توزیع‌شده، پیش‌بینانه و بلادرنگ را فراهم کرده‌اند. در نظام سلامت، استفاده از این فناوری‌ها نه تنها به بهبود سرعت و دقت فرایندهای اجرایی کمک می‌کند،

بلکه می‌تواند سطح اعتماد، شفافیت و قابلیت پاسخگویی را نیز افزایش دهد. پژوهش‌های داخلی نیز تأکید کرده‌اند که بهره‌گیری از فناوری اطلاعات و ابزارهای دیجیتال، برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین سلامت و ارتقای عملکرد آن ضروری است (Mehrin & Laleh, 2021). همچنین، انتخاب فناوری نوین در زنجیره تأمین سلامت تابع مجموعه‌ای از عوامل سازمانی، فنی، اقتصادی و محیطی است و شناسایی این عوامل برای پیاده‌سازی موفق فناوری‌های نوظهور اهمیت دارد (Eghbali et al., 2024). از سوی دیگر، فناوری‌های هوشمند در مدیریت زنجیره تأمین دارو می‌توانند فرایندهای تصمیم‌گیری، پیش‌بینی، کنترل و هماهنگی را تسهیل کرده و زمینه‌ساز شکل‌گیری زنجیره تأمین هوشمند شوند (Abadi et al., 2024).

بلاکچین یکی از مهم‌ترین فناوری‌های نوظهور در حوزه زنجیره تأمین است که به دلیل ویژگی‌هایی مانند تمرکززدایی، شفافیت، تغییرناپذیری داده، قابلیت رهگیری، امنیت تراکنش‌ها و امکان اجرای قراردادهای هوشمند، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. مرورهای نظام‌مند نشان داده‌اند که بلاکچین می‌تواند در حوزه‌های متنوعی از جمله زنجیره تأمین، سلامت، مالی، لجستیک و مدیریت داده کاربرد داشته باشد، اما همچنان با چالش‌هایی مانند مقیاس‌پذیری، هزینه پیاده‌سازی، استانداردسازی و پذیرش سازمانی مواجه است (Casino et al., 2019). در مدیریت زنجیره تأمین، بلاکچین از طریق ثبت توزیع‌شده و غیرقابل تغییر تراکنش‌ها، امکان ایجاد سطح بالاتری از اعتماد میان بازیگران را فراهم می‌کند و از وابستگی به نهادهای متمرکز برای اعتبارسنجی داده‌ها می‌کاهد (Banerjee et al., 2019). همچنین، ارتباط میان بلاکچین و مدیریت زنجیره تأمین پایدار نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند در افزایش شفافیت، بهبود رهگیری، کاهش تقلب و ارتقای پاسخگویی نقش مهمی ایفا کند (Sabeti et al., 2019). با وجود این، مزایای بلاکچین زمانی به‌طور کامل محقق می‌شود که با نیازهای خاص صنعت و الزامات اجرایی آن هماهنگ شود.

در زنجیره تأمین سلامت و به‌ویژه زنجیره تأمین دارو، بلاکچین می‌تواند ابزاری مؤثر برای مقابله با جعل، ورود محصولات بی‌کیفیت، دستکاری داده‌ها و نبود شفافیت باشد. مسئله جعل دارو و ورود اقلام نامعتبر به زنجیره تأمین، یکی از تهدیدهای مهم نظام سلامت است و پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بلاکچین به دلیل قابلیت ثبت تغییرناپذیر داده‌ها و ایجاد مسیر ردیابی شفاف، ظرفیت بالایی برای جلوگیری از ورود داروهای تقلبی و کم‌کیفیت دارد (Mohit, 2020). همچنین، کاربرد بلاکچین در نظام سلامت و زنجیره تأمین دارویی می‌تواند پیامدهایی مانند افزایش امنیت داده‌های پزشکی، تسهیل اشتراک‌گذاری اطلاعات، ارتقای شفافیت و بهبود اعتماد میان ذی‌نفعان داشته باشد (Samiei & Ahmadi, 2021). در همین راستا، کاربرد بلاکچین در زنجیره تأمین پایدار سلامت نیز از منظر امنیت اطلاعات، شفافیت و مدیریت داده‌ها مورد توجه قرار گرفته است (Sajadian et al., 2022). پژوهش‌های جدیدتر نیز نشان داده‌اند که فناوری بلاکچین می‌تواند تاب‌آوری زنجیره تأمین دارویی را افزایش دهد و امکان بازیابی بهتر زنجیره از رویدادهای مخرب را فراهم کند (Nikzadi Panah et al., 2024). افزون بر این، بررسی کاربرد بلاکچین در

مدیریت زنجیره تأمین نشان می‌دهد که این فناوری با ایجاد شفافیت، قابلیت رهگیری و اعتماد، می‌تواند برخی از ناکارآمدی‌های ساختاری زنجیره‌های سنتی را کاهش دهد (Biyadar & Zaghari, 2025).

با وجود مزایای بلاکچین، استفاده مستقل از آن برای مونیتورینگ هوشمند زنجیره تأمین سلامت کافی نیست. بلاکچین داده‌ها را به صورت امن و شفاف ثبت می‌کند، اما به خودی خود توانایی تحلیل روابط پیچیده، پیش‌بینی اختلالات، تفسیر عدم قطعیت و تصمیم‌سازی هوشمند را ندارد. پذیرش بلاکچین در زنجیره‌های تأمین نیز با مجموعه‌ای از مزایا و چالش‌ها همراه است که شامل امنیت، شفافیت و اعتماد از یک سو، و هزینه، پیچیدگی فنی، مقاومت سازمانی و الزامات زیرساختی از سوی دیگر است (Kagigas et al., 2021). در محیط‌های صنعتی و زنجیره‌های تأمین پیچیده، فناوری‌های مرتبط با صنعت ۴.۰ نیز با موانعی مانند آمادگی سازمانی، توانمندی کارکنان، هزینه سرمایه‌گذاری و یکپارچه‌سازی سیستم‌ها مواجه هستند (Kamble et al., 2020). بنابراین، برای دستیابی به مونیتورینگ مؤثر، لازم است بلاکچین با ابزارهای تحلیلی و هوشمند ترکیب شود تا علاوه بر ثبت و اعتبارسنجی داده‌ها، امکان تحلیل پویای ریسک، شناسایی الگوهای اختلال و پشتیبانی از تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت فراهم گردد.

هوش مصنوعی و به‌ویژه رویکردهای فازی، ظرفیت قابل توجهی برای مدل‌سازی عدم قطعیت و پیچیدگی در زنجیره‌های تأمین دارند. زنجیره تأمین سلامت با داده‌هایی مواجه است که اغلب ناقص، مبهم، متغیر و وابسته به قضاوت خبرگان هستند. در چنین شرایطی، روش‌های قطعی و خطی نمی‌توانند تمام ابعاد روابط علی، تعاملات پنهان و اثرات متقابل میان شاخص‌ها را به‌خوبی نمایش دهند. نقشه‌های شناختی فازی به عنوان یکی از ابزارهای مهم هوش مصنوعی نرم، امکان مدل‌سازی روابط علی میان مفاهیم، تحلیل سناریوهای مختلف و شبیه‌سازی رفتار پویای سیستم را فراهم می‌کنند (Sabahi et al., 2020). مرور مطالعات مربوط به کاربرد نقشه‌های شناختی فازی در مدیریت ریسک زنجیره تأمین نیز نشان می‌دهد که این ابزار برای تحلیل ریسک‌های پیچیده، چندبعدی و نامطمئن مناسب است و می‌تواند در کنار قضاوت خبرگان برای تصمیم‌گیری راهبردی استفاده شود (Michitarian et al., 2021). افزون بر این، رویکردهای ترکیبی مبتنی بر نقشه شناختی فازی می‌توانند برای ارزیابی ریسک زنجیره تأمین به کار روند و روابط متقابل میان عوامل را با دقت بیشتری نسبت به مدل‌های ساده‌تر تحلیل کنند (Vojc Ferolish et al., 2019). ادغام هوش مصنوعی با فناوری‌های دفترکل توزیع‌شده، مسیر تازه‌ای برای ایجاد زنجیره‌های تأمین هوشمند، پایدار و خودتنظیم فراهم کرده است. ترکیب بلاکچین و هوش مصنوعی می‌تواند از یک سو امنیت، شفافیت و اعتبار داده‌ها را تضمین کند و از سوی دیگر تحلیل، پیش‌بینی و تصمیم‌سازی را بهبود بخشد. مطالعات نشان داده‌اند که تلفیق بلاکچین و هوش مصنوعی در زنجیره‌های تأمین پایدار می‌تواند ظرفیت تحلیل داده‌های پیچیده، کاهش عدم قطعیت، افزایش اعتماد و ارتقای تصمیم‌گیری را تقویت کند (Behneke et al., 2020). در حوزه زنجیره تأمین نیز بررسی رابطه میان بلاکچین و هوش مصنوعی نشان می‌دهد که این دو فناوری می‌توانند مکمل یکدیگر باشند؛ به گونه‌ای که بلاکچین بستر امن و قابل

اعتماد داده را فراهم کند و هوش مصنوعی لایه تحلیل و تصمیم‌سازی را بر عهده گیرد (Zahdi, 2023). کاربرد هم‌زمان بلاکچین و هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند زنجیره تأمین دارو نیز به‌عنوان رویکردی نوین برای ارتقای امنیت، پایداری، شفافیت و کارایی مطرح شده است، هرچند چالش‌های اجرایی آن در نظام سلامت دیجیتال باید به‌طور جدی بررسی شود (Ahoorani & Rahdar, 2025).

از سوی دیگر، اینترنت اشیا و فناوری‌های ردیابی هوشمند نیز در کنار بلاکچین و هوش مصنوعی می‌توانند کیفیت مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت را افزایش دهند. اینترنت اشیا از طریق حسگرها، برچسب‌های هوشمند و دستگاه‌های متصل، داده‌های لحظه‌ای درباره دما، رطوبت، مکان، وضعیت بسته‌بندی و شرایط حمل‌ونقل فراهم می‌کند و این داده‌ها می‌توانند در بسترهای بلاکچینی ثبت و در مدل‌های هوشمند تحلیل شوند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اینترنت اشیا نقش مهمی در افزایش کارایی و بهبود نظارت در زنجیره تأمین دارد و می‌تواند داده‌های دقیق و بلادرنگ برای تصمیم‌گیری فراهم کند (Bakhtiari & Rahemi Haghighi, 2024). در زنجیره تأمین دارو، پلتفرم‌های ردیابی و رهگیری هوشمند مبتنی بر بلاکچین نیز می‌توانند قابلیت مشاهده‌پذیری دارو را افزایش دهند و امکان کنترل دقیق‌تر تراکنش‌ها، مسیر انتقال و اصالت محصول را فراهم سازند (Houshmandrad, 2023). این امر نشان می‌دهد که مونیتورینگ اثربخش در صنعت سلامت نیازمند معماری چندلایه‌ای است که در آن گردآوری داده، ثبت امن، تحلیل هوشمند و ارائه خروجی مدیریتی به‌صورت یکپارچه انجام شود.

تحول دیجیتال در زنجیره تأمین دارو همچنین با عملکرد پایدار، اشتراک‌گذاری اطلاعات و قابلیت ردیابی ارتباط دارد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که میان تحول دیجیتال و عملکرد زنجیره تأمین پایدار دارویی رابطه مثبت وجود دارد و اشتراک‌گذاری اطلاعات می‌تواند نقش میانجی مهمی در این رابطه ایفا کند (Abouei Mehrizi et al., 2024). این یافته نشان می‌دهد که فناوری به‌تنهایی کافی نیست، بلکه کیفیت جریان اطلاعات، قابلیت اعتماد داده‌ها و امکان استفاده تحلیلی از داده‌ها اهمیت اساسی دارد. بر همین اساس، مدل‌های مونیتورینگ باید علاوه بر توجه به ابزارهای فناورانه، سازوکارهای مدیریت داده، شفافیت اطلاعات، هماهنگی میان ذی‌نفعان و انطباق با مقررات را نیز دربر گیرند. در صنعت سلامت، این مسئله به دلیل حساسیت محصولات، ارزش اقتصادی بالا، الزامات قانونی سخت‌گیرانه و مخاطرات ناشی از جعل یا فساد دارو اهمیت بیشتری دارد.

با مرور ادبیات موجود می‌توان دریافت که بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین یا بر بلاکچین و قابلیت‌های آن در شفافیت و رهگیری تمرکز کرده‌اند، یا به کاربرد هوش مصنوعی و روش‌های فازی در تحلیل ریسک و تصمیم‌گیری پرداخته‌اند. بخشی دیگر از پژوهش‌ها نیز اینترنت اشیا، تحول دیجیتال یا طراحی زنجیره تأمین دارویی را بررسی کرده‌اند. با این حال، همچنان خلأ نظری و کاربردی مهمی در زمینه ارائه یک مدل یکپارچه برای مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت وجود دارد؛ مدلی که بتواند هم‌زمان از قابلیت تغییرناپذیری، امنیت و شفافیت بلاکچین، توان تحلیل روابط علی و مدیریت عدم قطعیت در هوش مصنوعی فازی، و الزامات عملیاتی زنجیره تأمین سلامت استفاده کند. بسیاری از مطالعات موجود بیشتر بر ردیابی یا شفافیت تمرکز داشته‌اند، در حالی که مونیتورینگ، مفهومی گسترده‌تر است و علاوه بر رهگیری محصول، تشخیص اختلالات، تحلیل

ریسک، اعتبارسنجی داده‌ها، انطباق مقرراتی، ارزیابی کارایی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی را شامل می‌شود. بنابراین، توسعه مدلی که بتواند این ابعاد را در یک چارچوب منسجم و قابل اعتبارسنجی ادغام کند، می‌تواند به غنای نظری ادبیات مدیریت زنجیره تأمین و همچنین به بهبود عملکرد عملی صنعت سلامت کمک کند.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر طراحی و اعتبارسنجی مدلی یکپارچه برای بهبود مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت از طریق ادغام الگوریتم‌های هوش مصنوعی فازی در بستر بلاکچین است.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی - توسعه‌ای و از نظر روش، آمیخته از نوع کیفی - کمی با رویکرد اکتشافی متوالی بود. در این طرح، ابتدا مرحله کیفی با هدف شناسایی ابعاد، مؤلفه‌ها و شاخص‌های مؤثر بر مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت انجام شد و سپس بر اساس یافته‌های مرحله کیفی، ابزار کمی طراحی و مدل اولیه پژوهش تدوین گردید. پس از آن، مدل یکپارچه پیشنهادی در سه لایه اصلی شامل لایه بلاکچین، لایه هوش مصنوعی فازی و لایه یکپارچه‌سازی توسعه یافت و در نهایت از طریق تحلیل‌های آماری، شبیه‌سازی و مقایسه با سیستم سنتی مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفت. جامعه آماری پژوهش شامل کلیه مدیران، کارشناسان و خبرگان فعال در زنجیره تأمین صنعت سلامت استان قزوین در سال ۱۴۰۴ بود که بر اساس اطلاعات سازمان غذا و داروی استان قزوین، شامل مدیران ارشد و میانی شرکت‌های پخش دارو، مسئولان فنی و مدیران داروخانه‌های مرکزی، و کارشناسان وزارت بهداشت و سازمان غذا و دارو بودند. تعداد کل جامعه آماری ۱۱۷ نفر بود که به دلیل محدود و در دسترس بودن جامعه، در بخش کمی از روش سرشماری استفاده شد و کلیه افراد واجد شرایط به عنوان نمونه پژوهش در نظر گرفته شدند. در بخش کیفی، نمونه‌گیری به روش هدفمند قضاوتی انجام شد و مصاحبه‌ها تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت؛ بر این اساس، ۱۵ نفر از خبرگان حوزه زنجیره تأمین سلامت در مرحله کیفی مشارکت داشتند. بر اساس داده‌های جمعیت‌شناختی گزارش شده، بیشتر شرکت‌کنندگان در بازه سنی ۳۰ تا ۴۰ سال قرار داشتند و این گروه ۴۱ درصد از جامعه آماری را تشکیل می‌داد.

برای گردآوری داده‌ها در بخش کیفی از مصاحبه نیمه‌ساختاریافته استفاده شد. این مصاحبه‌ها با هدف شناسایی چالش‌های اصلی مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت، تعیین شاخص‌های کلیدی عملکرد در ردیابی و پایش محصولات سلامت، و بررسی نقش فناوری‌های نوین در افزایش شفافیت، امنیت و قابلیت اعتماد زنجیره تأمین طراحی شدند. پرسش‌های مصاحبه به گونه‌ای تنظیم شدند که دیدگاه خبرگان درباره ابعاد فنی، مدیریتی، امنیتی و عملیاتی مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت استخراج شود. داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها از طریق تحلیل محتوای کیفی و بر اساس کدگذاری باز، محوری و انتخابی تحلیل شدند و در نتیجه این مرحله، چهار بعد اصلی و دوازده شاخص فرعی مؤثر بر مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت شناسایی شد. در بخش کمی، از پرسشنامه محقق ساخته استفاده شد که بر اساس یافته‌های مرحله کیفی و مبانی نظری پژوهش طراحی گردید.

این پرسشنامه شامل بخش مشخصات جمعیت‌شناختی، بخش مربوط به ابعاد مونیتورینگ، بخش روابط علی میان شاخص‌ها و بخش ارزیابی مدل پیشنهادی بود. بخش ابعاد مونیتورینگ شامل ۲۴ گویه در مقیاس لیکرت پنج‌درجه‌ای، بخش روابط علی شامل ۱۸ گویه مبتنی بر ماتریس مقایسات زوجی فازی، و بخش ارزیابی مدل شامل ۸ گویه در مقیاس لیکرت پنج‌درجه‌ای بود. روایی محتوای پرسشنامه توسط پنج نفر از خبرگان حوزه فناوری اطلاعات و مدیریت زنجیره تأمین سلامت بررسی و تأیید شد. برای بررسی پایایی ابزار، پرسشنامه به صورت آزمایشی بر روی ۳۰ نفر از افراد خارج از نمونه اصلی اجرا شد و ضریب آلفای کرونباخ برای کل پرسشنامه ۰.۹۱۶ به دست آمد. همچنین پایایی سازه‌های اصلی شامل ردیابی و پیگیری، امنیت و اعتبار، انطباق‌پذیری و کارایی عملیاتی به ترتیب با ضرایب ۰.۸۹۲، ۰.۹۰۷، ۰.۸۸۵ و ۰.۸۷۴ تأیید شد که همگی نشان‌دهنده پایایی مطلوب ابزار بودند.

در طراحی مدل فنی پژوهش، لایه بلاکچین بر اساس پلتفرم Hyperledger Fabric نسخه ۲.۴ توسعه یافت. ساختار شبکه به صورت اجازه‌دار طراحی شد و چهار سازمان اصلی شامل سازمان غذا و دارو به عنوان ناظر، شرکت تولیدکننده، شرکت پخش، و داروخانه یا بیمارستان در آن در نظر گرفته شدند. برای ثبت و مدیریت تراکنش‌ها، قرارداد هوشمند طراحی شد و تابع ثبت تراکنش در قرارداد هوشمند با زبان Go توسعه یافت. لایه هوش مصنوعی فازی از دو بخش اصلی سیستم استنتاج فازی و نقشه‌شناختی فازی تشکیل شد. در سیستم استنتاج فازی، متغیرهای دما، رطوبت و زمان تأخیر به عنوان ورودی و سطح ریسک محصول به عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. برای مدل‌سازی این متغیرها از توابع عضویت مثلثی و دوزنقه‌ای استفاده شد؛ به این صورت که دما در سه سطح پایین، مطلوب و بالا، رطوبت نسبی در سه سطح کم، مطلوب و زیاد، و زمان تأخیر در سه سطح کم، متوسط و زیاد تعریف شد. خروجی سیستم نیز سطح ریسک محصول بود که در سه سطح کم، متوسط و زیاد و در بازه صفر تا صد درصد تعیین گردید. در بخش نقشه‌شناختی فازی، ماتریس مجاورت اولیه بر اساس نظرات خبرگان تشکیل شد، مقادیر زبانی به اعداد فازی مثلثی تبدیل شدند و سپس با استفاده از روش مرکز ثقل، دفا‌سازی انجام گرفت. لایه یکپارچه‌سازی نیز برای اتصال لایه بلاکچین و لایه هوش مصنوعی فازی و ارائه خروجی قابل استفاده برای کاربران طراحی شد. این لایه شامل یک API Gateway از نوع RESTful API، پایگاه داده MongoDB برای ذخیره داده‌های غیرتراکنشی و گزارش‌های تحلیلی، و داشبورد تحت وب مبتنی بر React.js برای نمایش بلادرنگ اطلاعات و وضعیت زنجیره تأمین بود.

داده‌های حاصل از مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با استفاده از نرم‌افزار MAXQDA نسخه ۲۰۲۲ و از طریق فرآیند کدگذاری باز، محوری و انتخابی تحلیل شدند. در مرحله کدگذاری باز، مفاهیم اولیه مرتبط با مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت از متن مصاحبه‌ها استخراج شد. در مرحله کدگذاری محوری، مفاهیم مشابه در قالب مقوله‌ها و ابعاد اصلی سازمان‌دهی شدند و در مرحله کدگذاری انتخابی، ساختار نهایی ابعاد و شاخص‌های مؤثر بر مونیتورینگ تدوین گردید. برای افزایش اعتبار یافته‌های کیفی، نتایج کدگذاری توسط سه نفر از خبرگان حوزه موضوعی بازبینی و تأیید شد.

همچنین پایایی بین کدگذاران با استفاده از ضریب کاپای کوهن بررسی شد و مقدار آن بیش از ۰.۸ به دست آمد که نشان‌دهنده توافق مطلوب میان کدگذاران بود. در بخش کمی، ابتدا از شاخص‌های آمار توصیفی شامل فراوانی، درصد، میانگین و انحراف معیار برای توصیف ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و متغیرهای پژوهش استفاده شد. سپس برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف استفاده گردید. روایی سازه پرسشنامه با استفاده از تحلیل عاملی تأییدی در نرم‌افزار ۴ SmartPLS بررسی شد و شاخص‌های واریانس متوسط استخراج‌شده و پایایی ترکیبی برای ارزیابی روایی همگرا و قابلیت اعتماد سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر AVE برای همه سازه‌ها بالاتر از ۰.۵ و مقادیر CR بالاتر از ۰.۷ بود که بیانگر روایی همگرا و پایایی ترکیبی مناسب ابزار پژوهش است.

برای تعیین وزن نهایی ابعاد و شاخص‌های مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت، از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی استفاده شد. در این بخش، داده‌های حاصل از مقایسات زوجی خبرگان تحلیل شد و وزن نسبی ابعاد اصلی و شاخص‌های فرعی محاسبه گردید. میزان سازگاری قضاوت‌های خبرگان نیز با استفاده از شاخص ناسازگاری بررسی شد و مقدار CR برابر با ۰.۳۸ به دست آمد که کمتر از حد مجاز ۰.۱ بود و سازگاری قابل قبول قضاوت‌ها را نشان داد. برای تحلیل روابط علی میان شاخص‌ها و بررسی رفتار پویای سیستم، نقشه شناختی فازی در محیط پایتون و با استفاده از کتابخانه FCMpy پیاده‌سازی شد. در این مرحله، ماتریس وزنی روابط میان دوازده مفهوم کلیدی تشکیل شد و شاخص‌های درجه ورودی، درجه خروجی و درجه مرکزی برای شناسایی مفاهیم اثرگذار و اثرپذیر محاسبه گردید. سپس سناریوهای مختلف با شرایط اولیه متفاوت شبیه‌سازی شدند تا واکنش سیستم در شرایط عادی، اختلال در زنجیره سرما، تأخیر در حمل‌ونقل و نگرانی امنیتی بررسی شود. برای ارزیابی عملکرد مدل یکپارچه، معیارهایی مانند دقت، سرعت، مقیاس‌پذیری، امنیت، قابلیت اعتماد، رضایت کاربری و شفافیت اطلاعات مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با سیستم متمرکز سنتی از آزمون t زوجی استفاده شد و برای ارزیابی اهمیت آماری ابعاد اصلی نیز آزمون t تک‌نمونه‌ای به کار رفت. علاوه بر تحلیل‌های آماری، برای اطمینان از عملکرد صحیح مدل فنی، آزمون واحد بر روی کدهای قرارداد هوشمند بلاکچین انجام شد و شبیه‌سازی استرس برای بررسی مقیاس‌پذیری مدل تحت بار تراکنش‌های سنگین صورت گرفت. همچنین ارزیابی امنیتی با استفاده از ابزارهای تحلیل ایستای کد انجام شد تا آسیب‌پذیری‌های احتمالی مدل شناسایی و کنترل شوند.

یافته‌ها

بر اساس تحلیل داده‌های کیفی و نظر خبرگان، ابعاد کلیدی مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت در چهار گروه اصلی شامل ردیابی و پیگیری، امنیت و اعتبار، انطباق‌پذیری و کارایی عملیاتی طبقه‌بندی شد. بعد ردیابی و پیگیری شامل موقعیت جغرافیایی، شرایط محیطی و وضعیت بسته‌بندی بود. بعد امنیت و اعتبار شامل اصالت محصول، دسترسی مجاز و تغییرناپذیری داده بود. بعد انطباق‌پذیری بر استانداردهای ملی، الزامات بین‌المللی و قوانین داخلی تمرکز داشت و بعد کارایی عملیاتی نیز زمان تحویل، هزینه‌های لجستیک و رضایت مشتری را دربر گرفت.

نتایج حاصل از تحلیل کیفی مصاحبه‌های خبرگان نشان داد که دوازده شاخص فرعی در قالب چهار بعد اصلی قابل طبقه‌بندی هستند. این شاخص‌ها مبنای طراحی پرسشنامه، تشکیل ماتریس روابط علی، مدل‌سازی نقشه شناختی فازی و توسعه مدل یکپارچه پیشنهادی قرار گرفتند.

جدول ۱. ابعاد و شاخص‌های شناسایی شده در مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت

بعد اصلی	شاخص فرعی	کد	تعریف عملیاتی
ردیابی و پیگیری	موقعیت جغرافیایی	T _۱	توانایی ردیابی لحظه‌ای مکان محصول
ردیابی و پیگیری	شرایط محیطی	T _۲	نظارت بر دما، رطوبت و نور
ردیابی و پیگیری	وضعیت بسته‌بندی	T _۳	سلامت فیزیکی بسته‌ها
امنیت و اعتبار	اصالت محصول	S _۱	جلوگیری از جعل و تقلب
امنیت و اعتبار	دسترسی مجاز	S _۲	کنترل سطوح دسترسی
امنیت و اعتبار	تغییر ناپذیری داده	S _۳	ثبت غیرقابل تغییر اطلاعات
انطباق‌پذیری	استانداردهای ملی	C _۱	رعایت استانداردهای ایران
انطباق‌پذیری	الزامات بین‌المللی	C _۲	مطابقت با FDA و WHO
انطباق‌پذیری	قوانین داخلی	C _۳	رعایت دستورالعمل‌های وزارت بهداشت
کارایی عملیاتی	زمان تحویل	E _۱	مدت زمان از تولید تا مصرف
کارایی عملیاتی	هزینه‌های لجستیک	E _۲	هزینه‌های حمل و نگهداری
کارایی عملیاتی	رضایت مشتری	E _۳	ارزیابی نهایی دریافت‌کنندگان

یافته‌های توصیفی نشان داد که همه ابعاد اصلی مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت از میانگین بالاتر از ۴ در مقیاس پنج‌درجه‌ای لیکرت برخوردار بودند. این وضعیت بیانگر آن است که خبرگان، همه ابعاد شناسایی شده را برای طراحی مدل مونیتورینگ هوشمند زنجیره تأمین سلامت مهم ارزیابی کرده‌اند. بعد امنیت و اعتبار با میانگین ۴.۴۵ و انحراف معیار ۰.۵۹، بالاترین میانگین و کمترین پراکندگی را داشت و بنابراین مهم‌ترین و باثبات‌ترین بعد از نظر خبرگان شناسایی شد. پس از آن، انطباق‌پذیری با میانگین ۴.۳۱، ردیابی و پیگیری با میانگین ۴.۲۳ و کارایی عملیاتی با میانگین ۴.۱۸ قرار گرفتند. همچنین، ضریب تغییرات بعد کارایی عملیاتی برابر با ۱۷.۹ درصد بود که نشان‌دهنده اختلاف نظر نسبی بیشتر خبرگان درباره اهمیت این بعد است. میانگین کلی ابعاد برابر با ۴.۲۹ به دست آمد که ضرورت استقرار یک سیستم مونیتورینگ پیشرفته در زنجیره تأمین سلامت را تأیید می‌کند.

جدول ۲. آمار توصیفی ابعاد اصلی پژوهش

بعد	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	ضریب تغییرات
ردیابی و پیگیری	۴.۲۳	۰.۶۸	۲.۵۰	۵.۰۰	۱۶.۱٪
امنیت و اعتبار	۴.۴۵	۰.۵۹	۳.۰۰	۵.۰۰	۱۳.۳٪
انطباق‌پذیری	۴.۳۱	۰.۷۲	۲.۶۷	۵.۰۰	۱۶.۷٪
کارایی عملیاتی	۴.۱۸	۰.۷۵	۲.۳۳	۵.۰۰	۱۷.۹٪
میانگین کل	۴.۲۹	۰.۶۹	۲.۶۳	۵.۰۰	۱۶.۱٪

برای تعیین اهمیت نسبی ابعاد اصلی، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده شد. در این روش، قضاوت‌های خبرگان به صورت اعداد فازی مثلثی نمایش داده شد. هر عدد فازی مثلثی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{A} = (l, m, u)$$

در این رابطه، l حد پایین، m مقدار محتمل و u حد بالای قضاوت فازی است. پس از تشکیل ماتریس مقایسات زوجی فازی، وزن‌های فازی محاسبه و سپس نرمال‌سازی شدند؛ به گونه‌ای که مجموع وزن‌های نرمال‌شده برابر با یک باشد:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

ماتریس مقایسات زوجی فازی نشان داد که امنیت و اعتبار در مقایسه با سایر معیارها از اهمیت بیشتری برخوردار است. برای مثال، مقدار فازی مقایسه ردیابی و پیگیری با امنیت و اعتبار برابر با $(0.5, 0.7, 0.9)$ بود که نشان می‌دهد خبرگان، امنیت و اعتبار را نسبت به ردیابی و پیگیری مهم‌تر ارزیابی کرده‌اند. همچنین مقادیر بالاتر از $(1, 1, 1)$ در ردیف امنیت و اعتبار، نشان‌دهنده برتری این معیار نسبت به سایر ابعاد است. نتایج نهایی وزن‌دهی نیز نشان داد که امنیت و اعتبار با وزن 0.324 در رتبه نخست قرار دارد. انطباق‌پذیری با وزن 0.287 در رتبه دوم، ردیابی و پیگیری با وزن 0.221 در رتبه سوم، و کارایی عملیاتی با وزن 0.168 در رتبه چهارم را به خود اختصاص داد. این نتایج نشان می‌دهد که اهمیت امنیت و اعتبار تقریباً دو برابر کارایی عملیاتی است.

جدول ۳. ماتریس مقایسات زوجی فازی و وزن نهایی ابعاد اصلی

معیار	ردیابی و پیگیری	امنیت و اعتبار	انطباق‌پذیری	کارایی عملیاتی	وزن نهایی	رتبه
ردیابی و پیگیری	$(1, 1, 1)$	$(0.5, 0.7, 0.9)$	$(0.6, 0.8, 1.0)$	$(0.7, 0.9, 1.1)$	0.221	۳
امنیت و اعتبار	$(1, 1, 1)$	$(1, 1, 1)$	$(1.2, 1.4, 1.6)$	$(1.3, 1.5, 1.7)$	0.324	۱
انطباق‌پذیری	$(1, 0.1, 0.2, 0.4)$	$(0.6, 0.8, 1.0)$	$(1, 1, 1)$	$(1.1, 1.3, 1.5)$	0.287	۲
کارایی عملیاتی	$(0.9, 1.1, 1.3)$	$(0.6, 0.8, 1.0)$	$(0.7, 0.9, 1.1)$	$(1, 1, 1)$	0.168	۴

پس از تجمیع نظرات خبرگان و انجام محاسبات فازی، ماتریس وزنی نهایی نقشه شناختی فازی به دست آمد و برای شناسایی مؤثرترین مفاهیم در سیستم، شاخص‌های درجه ورودی، درجه خروجی و درجه مرکزی برای هر مفهوم محاسبه شد. با استفاده از نرم‌افزار FCMpy، ماتریس مجاورت روابط علی بین دوازده مفهوم کلیدی تحلیل شد.

در مدل FCM، وضعیت هر مفهوم در تکرار بعدی تابعی از وضعیت قبلی آن مفهوم و اثرات ورودی سایر مفاهیم است. معادله به روزرسانی حالت مفاهیم به صورت زیر به کار رفت:

$$A_i^{(t+1)} = f \left(A_i^{(t)} + \sum_{j=1}^n w_{ji} A_j^{(t)} \right)$$

در این معادله، $A_i^{(t+1)}$ مقدار مفهوم i در تکرار بعدی، $A_i^{(t)}$ مقدار همان مفهوم در تکرار فعلی، w_{ji} وزن رابطه علی از مفهوم j به مفهوم i ، و f تابع فعال سازی است. تابع فعال سازی سیگموئید نیز به صورت زیر تعریف شد:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}}, \lambda = 1$$

برای شناسایی مفاهیم اثرگذار و اثرپذیر، درجه ورودی، درجه خروجی و درجه مرکزی هر مفهوم محاسبه شد. درجه مرکزی از مجموع درجه ورودی و درجه خروجی به دست آمد:

$$C_i = ID_i + OD_i$$

نتایج تحلیل FCM نشان داد که مفهوم تغییرناپذیری داده با کد S^3 ، با درجه ورودی ۷.۲۳ ، درجه خروجی ۸.۰۵ و درجه مرکزی ۱۵.۲۸ ، مؤثرترین مفهوم در مدل است. این یافته از نقش محوری بلاکچین در مدل پیشنهادی حمایت می کند، زیرا تغییرناپذیری داده یکی از اصلی ترین ویژگی های فناوری بلاکچین است. پس از آن، الزامات بین المللی با درجه مرکزی ۱۴.۲۹ و زمان تحویل با درجه مرکزی ۱۴.۰۳ در رتبه های دوم و سوم قرار گرفتند. مفاهیم مربوط به ردیابی شامل موقعیت جغرافیایی، شرایط محیطی و وضعیت بسته بندی در رتبه های پایین تر قرار گرفتند؛ این امر نشان می دهد که اگرچه ردیابی از نظر عملیاتی مهم است، اما در ساختار علی کل سیستم، اثرگذاری آن بر سایر مفاهیم کمتر از امنیت، انطباق پذیری و برخی مؤلفه های کارایی عملیاتی است.

جدول ۴. شاخص های مرکزی مفاهیم در نقشه شناختی فازی

مفهوم	درجه ورودی (ID)	درجه خروجی (OD)	درجه مرکزی (ID+OD)	رتبه مرکزی
S^3 ؛ تغییرناپذیری داده	۷.۲۳	۸.۰۵	۱۵.۲۸	۱
C^2 ؛ الزامات بین المللی	۶.۸۷	۷.۴۲	۱۴.۲۹	۲
E^1 ؛ زمان تحویل	۷.۰۵	۶.۹۸	۱۴.۰۳	۳
E^3 ؛ رضایت مشتری	۶.۹۲	۶.۸۴	۱۳.۷۶	۴
S^1 ؛ اصالت محصول	۶.۷۴	۶.۵۹	۱۳.۳۳	۵

۶	۱۲.۹۵	۶.۴۲	۶.۵۳	C۱؛ استانداردهای ملی
۷	۱۲.۸۵	۶.۳۷	۶.۴۸	C۳؛ قوانین داخلی
۸	۱۲.۵۳	۶.۲۱	۶.۳۲	S۲؛ دسترسی مجاز
۹	۱۲.۲۵	۶.۰۷	۶.۱۸	E۲؛ هزینه‌های لجستیک
۱۰	۱۲.۰۹	۶.۱۵	۵.۹۴	T۱؛ موقعیت جغرافیایی
۱۱	۱۱.۸۳	۵.۹۶	۵.۸۷	T۲؛ شرایط محیطی
۱۲	۱۱.۳۵	۵.۷۲	۵.۶۳	T۳؛ وضعیت بسته‌بندی

برای بررسی رفتار پویای سیستم، چهار سناریوی شبیه‌سازی طراحی شد. سناریوی نخست بیانگر شرایط عادی و وضعیت پایه سیستم بود که در آن همه مفاهیم در حالت تعادل قرار داشتند. سناریوی دوم به اختلال در زنجیره سرما اختصاص داشت و با فعال‌سازی شرایط محیطی با مقدار $T_2=1.0$ و وضعیت بسته‌بندی با مقدار $T_3=0.8$ شکست سیستم سرمایه‌ی را شبیه‌سازی کرد. سناریوی سوم اختلال لجستیکی و تأخیر در حمل‌ونقل را با فعال‌سازی زمان تحویل با مقدار $E_1=1.0$ و موقعیت جغرافیایی با مقدار $T_1=0.7$ نشان داد. سناریوی چهارم نیز نگرانی امنیتی ناشی از گزارش جعل دارو را با فعال‌سازی اصالت محصول با مقدار $S_1=1.0$ ، دسترسی مجاز با مقدار $S_2=0.9$ و تغییر ناپذیری داده با مقدار $S_3=0.8$ بررسی کرد.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در سناریوی عادی، سیستم پس از ۱۲ تکرار به وضعیت پایدار رسید. در سناریوی اختلال دما، سیستم پس از ۱۸ تکرار به وضعیت ناپایدار رسید و رضایت مشتری به مقدار ۰.۵۸۶ کاهش یافت. در سناریوی تأخیر حمل، وضعیت نهایی نیز ناپایدار بود و رضایت مشتری به کمترین مقدار، یعنی ۰.۴۹۲، رسید که نشان‌دهنده حساسیت بالای دریافت‌کنندگان محصولات سلامت به تأخیر در تحویل دارو و تجهیزات پزشکی است. در سناریوی نگرانی امنیتی، سیستم پس از ۱۶ تکرار در وضعیت نیمه‌پایدار قرار گرفت و اصالت محصول به مقدار ۰.۸۹۲ افزایش یافت؛ این وضعیت نشان می‌دهد که فعال شدن نگرانی امنیتی، توجه سیستم را به کیفیت، اصالت و کنترل داده‌ها افزایش می‌دهد.

جدول ۵. سناریوهای شبیه‌سازی و مقادیر نهایی مفاهیم کلیدی

سناریو	شرایط اولیه	E۳ رضایت مشتری	S۱ اصالت محصول	C۲ الزامات بین‌المللی	E۱ زمان تحویل	تعداد تکرار تا تعادل	وضعیت نهایی
سناریو ۱؛ شرایط عادی	همه مفاهیم در حالت تعادل	۰.۷۲۳	۰.۸۱۵	۰.۷۸۴	۰.۷۶۵	۱۲	پایدار
سناریو ۲؛ اختلال در زنجیره سرما	$T_3=0.8, T_2=1.0$	۰.۵۸۶	۰.۶۷۲	۰.۷۴۵	۰.۶۸۷	۱۸	ناپایدار
سناریو ۳؛ تأخیر در حمل‌ونقل	$T_1=0.7, E_1=1.0$	۰.۴۹۲	۰.۷۲۸	۰.۷۶۳	۰.۵۵۲	۲۱	ناپایدار
سناریو ۴؛ نگرانی امنیتی	$S_1=1.0, S_2=0.9, S_3=0.8$	۰.۶۳۴	۰.۸۹۲	۰.۷۹۸	۰.۷۰۳	۱۶	نیمه‌پایدار

مدل یکپارچه پیشنهادی در محیط آزمایشگاهی با چهار نود و بر روی سرورهای مجازی پیاده‌سازی شد. نتایج ارزیابی عملکرد لایه بلاکچین نشان داد که مدل پیشنهادی در زمان تأیید تراکنش و تعداد تراکنش بر ثانیه نسبت به سیستم متمرکز سنتی عملکرد کندتری دارد. زمان تأیید تراکنش در مدل پیشنهادی ۱۸۷ میلی‌ثانیه و در سیستم متمرکز سنتی ۱۱۲ میلی‌ثانیه بود که نشان‌دهنده کاهش نسبی ۶۶.۹ درصدی از نظر سرعت تأیید است. همچنین تعداد تراکنش بر ثانیه در مدل پیشنهادی ۲۸۵ و در سیستم سنتی ۵۲۰ بود که کاهش ۴۵.۲ درصدی را نشان می‌دهد. مصرف حافظه در مدل پیشنهادی ۴۲۳ مگابایت بود، در حالی که این مقدار در سیستم سنتی ۱۸۵ مگابایت گزارش شد. افزون بر این، افزایش اندازه دفتر کل در ماه در مدل بلاکچینی ۱.۲ گیگابایت و در سیستم سنتی ۰.۸ گیگابایت بود. با وجود این محدودیت‌ها، نرخ موفقیت تراکنش‌ها در مدل پیشنهادی ۹۹.۹۸ درصد بود که اندکی بالاتر از نرخ ۹۹.۸۵ درصدی سیستم سنتی است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل بلاکچینی اگرچه از نظر منابع محاسباتی سنگین‌تر است، اما قابلیت اطمینان بالاتری فراهم می‌کند.

در ارزیابی مدل هوش مصنوعی فازی، عملکرد سیستم استنتاج فازی، نقشه شناختی فازی، مدل تلفیقی پیشنهادی و مدل پایه رگرسیون لجستیک مقایسه شد. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، شاخص‌های دقت، حساسیت، ویژگی، امتیاز $F1$ و $AUC-ROC$ استفاده شد. فرمول شاخص‌های اصلی به‌صورت زیر است:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP}$$

$$F1-Score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

مدل تلفیقی پیشنهادی با دقت ۰.۹۲۸، حساسیت ۰.۹۱۵، ویژگی ۰.۹۳۹، مقدار $F1-Score$ برابر با ۰.۹۲۲ و مقدار $AUC-ROC$ برابر با ۰.۹۶۱، بهترین عملکرد را نشان داد. این نتایج بیانگر توان بالای مدل تلفیقی در تشخیص اختلالات زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت است. در مقابل، مدل پایه رگرسیون لجستیک با دقت ۰.۸۲۳، حساسیت ۰.۸۰۷، ویژگی ۰.۸۳۵، مقدار $F1-Score$ برابر با ۰.۸۱۶ و $AUC-ROC$ برابر با ۰.۸۷۴، ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. این یافته، برتری رویکردهای فازی را در تحلیل داده‌های نامطمئن و پیچیده زنجیره تأمین سلامت تأیید می‌کند.

جدول ۶. ارزیابی عملکرد فنی مدل بلاکچین و دقت مدل‌های هوش مصنوعی فازی

بخش ارزیابی	معیار / مدل	مدل پیشنهادی یا مقدار اصلی	مقدار مقایسه‌ای	نتیجه یا شاخص تکمیلی
عملکرد بلاکچین	زمان تأیید تراکنش	۱۸۷ میلی ثانیه	۱۱۲ میلی ثانیه در سیستم سنتی	۶۶.۹٪ کاهش نسبی عملکرد سرعت
عملکرد بلاکچین	تعداد تراکنش بر ثانیه	۲۸۵	۵۲۰ در سیستم سنتی	۴۵.۲٪ کاهش نسبی
عملکرد بلاکچین	مصرف حافظه	۴۲۳ مگابایت	۱۸۵ مگابایت در سیستم سنتی	۱۲۸.۶٪ افزایش
عملکرد بلاکچین	افزایش اندازه دفتر کل در ماه	۱.۲ گیگابایت	۰.۸ گیگابایت در سیستم سنتی	۵۰.۰٪ افزایش
عملکرد بلاکچین	نرخ موفقیت تراکنش‌ها	۹۹.۹۸٪	۹۹.۸۵٪ در سیستم سنتی	۰.۱۳٪ افزایش
دقت مدل فازی	سیستم استنتاج فازی (FIS)	دقت ۰.۸۹۲	حساسیت ۰.۸۷۶؛ ویژگی ۰.۹۰۵	۰.۹۳۲ = AUC؛ ۰.۸۸۴ = F۱
دقت مدل فازی	نقشه شناختی فازی (FCM)	دقت ۰.۸۶۷	حساسیت ۰.۸۵۴؛ ویژگی ۰.۸۷۹	۰.۹۰۸ = AUC؛ ۰.۸۶۱ = F۱
دقت مدل فازی	مدل تلفیقی پیشنهادی	دقت ۰.۹۲۸	حساسیت ۰.۹۱۵؛ ویژگی ۰.۹۳۹	۰.۹۶۱ = AUC؛ ۰.۹۲۲ = F۱
دقت مدل فازی	مدل پایه؛ رگرسیون لجستیک	دقت ۰.۸۲۳	حساسیت ۰.۸۰۷؛ ویژگی ۰.۸۳۵	۰.۸۷۴ = AUC؛ ۰.۸۱۶ = F۱

برای بررسی اهمیت آماری ابعاد اصلی، از آزمون t تک‌نمونه‌ای با مقدار آزمون ۳، یعنی نقطه میانی مقیاس لیکرت، استفاده شد. فرمول آزمون t تک‌نمونه‌ای به صورت زیر است:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$$

در این رابطه، $\bar{X}$ میانگین مشاهده شده، μ_0 مقدار ملاک یا نقطه میانی مقیاس، s انحراف معیار و n حجم نمونه است. برای محاسبه اندازه اثر نیز از رابطه زیر استفاده شد:

$$d = \frac{\bar{X} - \mu_0}{s}$$

نتایج نشان داد که میانگین همه ابعاد به طور معناداری بالاتر از مقدار ۳ است. امنیت و اعتبار با مقدار t برابر با ۲۵.۸۷ و اندازه اثر ۲.۴۷ بیشترین تفاوت را با نقطه میانی مقیاس داشت. انطباق پذیری با مقدار t برابر با ۱۸.۹۶ و اندازه اثر ۱.۸۲ و ردیابی و پیگیری با مقدار t برابر با ۱۸.۴۲ و اندازه اثر ۱.۷۶ نیز تفاوت معنادار و بزرگی را نشان دادند. مقدار t برای کارایی عملیاتی نیز برابر با ۱۵.۷۳ و اندازه اثر آن برابر با ۱.۵۰ بود. میانگین کل ابعاد نیز با مقدار t برابر با ۱۹.۵۲ و اندازه اثر ۱.۸۷ به طور معناداری بالاتر از نقطه میانی مقیاس قرار گرفت.

برای مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با سیستم سنتی، از آزمون t زوجی استفاده شد. فرمول آزمون t زوجی به صورت زیر است:

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}}$$

در این رابطه، d میانگین تفاوت‌های زوجی، S_d انحراف معیار تفاوت‌ها و n تعداد زوج‌ها است. نتایج آزمون t زوجی نشان داد که تفاوت میان مدل پیشنهادی و سیستم سنتی در همه معیارها معنادار است. دقت تشخیص اختلالات با میانگین تفاوت ۰.۱۰۵، رضایت کاربری با میانگین تفاوت ۰.۸۶، امنیت درک‌شده با میانگین تفاوت ۱.۱۲ و شفافیت اطلاعات با میانگین تفاوت ۱.۰۵ افزایش معناداری داشتند. با این حال، زمان پاسخگویی با میانگین تفاوت ۱.۸۷- ثانیه کاهش یافت که نشان‌دهنده کندتر بودن مدل پیشنهادی نسبت به سیستم سنتی از نظر سرعت پاسخگویی است. همه مقادیر Sig. برابر با ۰.۰۰۰ بودند و فاصله‌های اطمینان ۹۵ درصدی نیز دامنه نسبتاً محدودی داشتند که پایداری نتایج را تأیید می‌کند.

جدول ۷. نتایج آزمون t تک‌نمونه‌ای و آزمون t زوجی

نوع آزمون	بعد / معیار	میانگین یا میانگین تفاوت	انحراف معیار یا انحراف معیار تفاوت	مقدار t	درجه آزادی	Sig.	اندازه اثر یا فاصله اطمینان ۹۵٪
t تک‌نمونه‌ای	ردیابی و پیگیری	۴.۲۳	۰.۶۸	۱۸.۴۲	۱۰۹	۰.۰۰۰	۱.۷۶=d
t تک‌نمونه‌ای	امنیت و اعتبار	۴.۴۵	۰.۵۹	۲۵.۸۷	۱۰۹	۰.۰۰۰	۲.۴۷=d
t تک‌نمونه‌ای	انطباق‌پذیری	۴.۳۱	۰.۷۲	۱۸.۹۶	۱۰۹	۰.۰۰۰	۱.۸۲=d
t تک‌نمونه‌ای	کارایی عملیاتی	۴.۱۸	۰.۷۵	۱۵.۷۳	۱۰۹	۰.۰۰۰	۱.۵۰=d
t تک‌نمونه‌ای	میانگین کل	۴.۲۹	۰.۶۹	۱۹.۵۲	۱۰۹	۰.۰۰۰	۱.۸۷=d
t زوجی	دقت تشخیص اختلالات	۰.۱۰۵	۰.۰۲۸	۱۲.۴۵	۲۹	۰.۰۰۰	[۰.۱۱۹، ۰.۰۹۱]
t زوجی	زمان پاسخگویی	-۱.۸۷	۰.۴۵	-۱۴.۲۳	۲۹	۰.۰۰۰	[-۱.۷۰، -۲.۰۴]
t زوجی	رضایت کاربری	۰.۸۶	۰.۲۱	۱۱.۷۶	۲۹	۰.۰۰۰	[۰.۹۴، ۰.۷۸]
t زوجی	امنیت درک‌شده	۱.۱۲	۰.۳۲	۱۰.۵۴	۲۹	۰.۰۰۰	[۱.۲۴، ۱.۰۰]
t زوجی	شفافیت اطلاعات	۱.۰۵	۰.۲۷	۱۱.۲۳	۲۹	۰.۰۰۰	[۱.۱۵، ۰.۹۵]

برای بررسی مقاومت مدل نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی، تحلیل حساسیت انجام شد. نتایج نشان داد که مدل بیشترین حساسیت را به تعداد نودهای شبکه و میزان نویز داده‌ها دارد. تغییر ۲۰ درصدی در تعداد نودهای شبکه باعث تغییر زمان اجرا در دامنه ۱۹.۸- تا ۲۲.۷+ درصد شد و بنابراین حساسیت این پارامتر زیاد ارزیابی گردید. میزان نویز داده‌ها نیز بیشترین اثر را بر دقت مدل داشت؛ به گونه‌ای که تغییر ۲۰ درصدی نویز داده‌ها می‌توانست دقت مدل را در دامنه ۷.۵- تا ۶.۲+ درصد تغییر دهد. در مقابل، اندازه بلوک بلاکچین و تعداد قوانین فازی حساسیت کمتری ایجاد کردند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در پیاده‌سازی عملی مدل، کنترل کیفیت داده‌ها و طراحی بهینه تعداد نودهای شبکه اهمیت بالایی دارد.

در ارزیابی نهایی مدل یکپارچه، عملکرد کلی مدل بر اساس شاخص‌های ترکیبی دقت و صحت، سرعت و کارایی، امنیت و قابلیت اعتماد، قابلیت اطمینان و مقیاس‌پذیری بررسی شد. امتیاز وزنی کل مدل از رابطه زیر محاسبه شد:

$$Score = \sum_{k=1}^m W_k S_k$$

در این رابطه، W_k وزن شاخص ارزیابی و S_k امتیاز مدل در شاخص مربوطه است. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی با امتیاز وزنی کل ۸.۹۲ از ۱۰، نسبت به سیستم سنتی با امتیاز ۷.۷۴، بهبود ۱.۱۸ امتیازی یا ۱۵.۲ درصدی دارد. بیشترین بهبود در امنیت و قابلیت اعتماد با افزایش ۳.۳ امتیازی و سپس در دقت و صحت با افزایش ۱.۵ امتیازی مشاهده شد. در مقابل، سرعت و کارایی مدل پیشنهادی ۱.۴ امتیاز و مقیاس‌پذیری آن ۱.۱ امتیاز کمتر از سیستم سنتی بود که این موضوع با ماهیت محاسباتی سنگین تر بلاکچین، مکانیزم‌های اجماع، رمزنگاری و ذخیره‌سازی توزیع شده داده‌ها قابل تبیین است. وزن‌های اختصاص یافته به شاخص‌ها نیز نشان می‌دهد که امنیت و قابلیت اعتماد با وزن ۰.۳۰ و دقت و صحت با وزن ۰.۲۵، مهم‌ترین معیارهای ارزیابی در صنعت سلامت بوده‌اند.

جدول ۸. تحلیل حساسیت و ارزیابی نهایی مدل یکپارچه پیشنهادی

بخش ارزیابی	پارامتر یا شاخص	تغییر / وزن	تأثیر یا امتیاز مدل پیشنهادی	مقدار مقایسه‌ای	سطح حساسیت یا بهبود
تحلیل حساسیت	تعداد مفاهیم FCM	$\pm 20\%$	دقت: $+3.8 / -4.2\%$	زمان اجرا: $+18.5 / -15.2\%$	متوسط
تحلیل حساسیت	تعداد قوانین فازی	$\pm 20\%$	دقت: $+2.5 / -2.8\%$	زمان اجرا: $+12.3 / -15.2\%$	کم
تحلیل حساسیت	اندازه بلوک بلاکچین	$\pm 20\%$	دقت: $+0.8 / -0.9\%$	زمان اجرا: $+8.4 / -7.1\%$	کم
تحلیل حساسیت	تعداد نودهای شبکه	$\pm 20\%$	دقت: $+1.1 / -1.2\%$	زمان اجرا: $+22.7 / -19.8\%$	زیاد
تحلیل حساسیت	میزان نویز داده‌ها	$\pm 20\%$	دقت: $+6.2 / -7.5\%$	زمان اجرا: $+5.3 / -4.8\%$	زیاد
ارزیابی نهایی	دقت و صحت	وزن ۰.۲۵	۹.۳	۷.۸ در سیستم سنتی	+۱.۵
ارزیابی نهایی	سرعت و کارایی	وزن ۰.۲۰	۷.۵	۸.۹ در سیستم سنتی	-۱.۴
ارزیابی نهایی	امنیت و قابلیت اعتماد	وزن ۰.۳۰	۹.۸	۶.۵ در سیستم سنتی	+۳.۳
ارزیابی نهایی	قابلیت اطمینان	وزن ۰.۱۵	۹.۲	۸.۱ در سیستم سنتی	+۱.۱
ارزیابی نهایی	مقیاس‌پذیری	وزن ۰.۱۰	۸.۱	۹.۲ در سیستم سنتی	-۱.۱
ارزیابی نهایی	امتیاز وزنی کل	وزن ۱.۰۰	۸.۹۲	۷.۷۴ در سیستم سنتی	+۱.۱۸ ± معادل ۱۵.۲٪ بهبود

در پایان، نظرات کیفی خبرگان درباره مدل پیشنهادی در سه محور اصلی شامل نقاط قوت، چالش‌های پیاده‌سازی و پیشنهادها به‌جمع‌بندی شد. در محور نقاط قوت، ۸۹ درصد خبرگان ایجاد شفافیت کامل در زنجیره تأمین را از مهم‌ترین مزایای مدل دانستند. همچنین ۸۵ درصد خبرگان کاهش قابل توجه ریسک جعل و تقلب را به عنوان یکی از پیامدهای مهم مدل مطرح کردند و ۹۲ درصد آنان امکان ردیابی لحظه‌ای محصولات سلامت را نقطه قوت اصلی مدل پیشنهادی ارزیابی نمودند. در محور چالش‌های پیاده‌سازی، ۷۸ درصد خبرگان به نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا،

۶۵ درصد به مقاومت در برابر تغییر فناوری و ۸۲ درصد به ضرورت آموزش نیروی انسانی اشاره کردند. در محور پیشنهادهای بهبود نیز ۷۱ درصد خبرگان توسعه رابط کاربری ساده‌تر، ۸۸ درصد یکپارچه‌سازی با سیستم‌های موجود و ۷۶ درصد کاهش هزینه‌های عملیاتی را برای ارتقای قابلیت اجرای مدل ضروری دانستند.

در مجموع، یافته‌های کمی و کیفی پژوهش نشان داد که مدل پیشنهادی، علی‌رغم برخی چالش‌های فنی، اقتصادی و اجرایی، پتانسیل بالایی برای بهبود مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت دارد. برتری مدل در امنیت، قابلیت اعتماد، شفافیت اطلاعات، دقت تشخیص اختلالات و امکان تحلیل روابط پیچیده تحت عدم قطعیت، آن را به یک چارچوب جامع برای استفاده در صنعت سلامت تبدیل می‌کند. با این حال، کندتر بودن زمان پاسخگویی، افزایش مصرف حافظه، رشد اندازه دفترکل و چالش مقیاس‌پذیری نشان می‌دهد که بهینه‌سازی فنی مدل در مراحل بعدی توسعه ضروری است.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف طراحی و اعتبارسنجی مدلی یکپارچه برای بهبود مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت از طریق ادغام الگوریتم‌های هوش مصنوعی فازی در بستر بلاکچین انجام شد. یافته‌های پژوهش نشان داد که چهار بعد اصلی مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت شامل امنیت و اعتبار، انطباق‌پذیری، ردیابی و پیگیری، و کارایی عملیاتی هستند. در میان این ابعاد، امنیت و اعتبار با وزن ۰.۳۲۴ مهم‌ترین بعد شناسایی شد و پس از آن انطباق‌پذیری با وزن ۰.۲۸۷، ردیابی و پیگیری با وزن ۰.۲۲۱ و کارایی عملیاتی با وزن ۰.۱۶۸ قرار گرفتند. این یافته بیانگر آن است که در صنعت سلامت، دغدغه اصلی مدیران و خبرگان صرفاً سرعت یا کاهش هزینه نیست، بلکه اطمینان از اصالت محصول، جلوگیری از جعل، کنترل دسترسی، تغییرناپذیری داده و ایجاد اعتماد میان ذی‌نفعان در اولویت قرار دارد. این نتیجه با ماهیت حساس زنجیره تأمین سلامت همخوان است؛ زیرا هرگونه خطا، جعل، دستکاری داده یا ورود محصول غیرمعتبر می‌تواند پیامدهای مستقیم بر سلامت بیماران و اعتبار نظام درمانی داشته باشد. مطالعات پیشین نیز تأکید کرده‌اند که بلاکچین از طریق ایجاد شفافیت، قابلیت رهگیری و اعتماد می‌تواند پاسخ مناسبی به چالش‌های زنجیره تأمین باشد (Banerjee et al., 2019; Biyadar & Zaghari, 2025; Casino et al., 2019). همچنین، یافته حاضر با پژوهش‌هایی همسو است که نشان داده‌اند بلاکچین در زنجیره تأمین سلامت و دارو می‌تواند از ورود داروهای تقلبی و کم‌کیفیت جلوگیری کند و امنیت داده‌ها را افزایش دهد (Mohit, 2020; Sajadian et al., 2022; Samiei & Ahmadi, 2021).

قرار گرفتن انطباق‌پذیری در رتبه دوم اهمیت نشان می‌دهد که مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت بدون توجه به استانداردها، مقررات و الزامات نظارتی نمی‌تواند اثربخش باشد. محصولات سلامت، به‌ویژه داروها و تجهیزات پزشکی، در معرض مقررات سخت‌گیرانه ملی و بین‌المللی قرار دارند و هرگونه ضعف در ثبت، گزارش‌دهی، ردیابی یا کنترل کیفیت می‌تواند موجب عدم انطباق سازمان با الزامات قانونی شود. بنابراین، مدل

پیشنهادی هنگامی ارزشمند است که بتواند علاوه بر ردیابی فنی محصول، قابلیت گزارش‌دهی شفاف، مستند، معتبر و قابل حسابرسی را نیز فراهم کند. این نتیجه با پژوهش‌هایی همسو است که بر ضرورت بهبود عملکرد زنجیره تأمین سلامت، رعایت پروتکل‌های کنترلی و یکپارچه‌سازی فرایندهای تصمیم‌گیری تأکید داشته‌اند (Homaioon et al., 2021; Khojeh et al., 2023; Kumar et al., 2019). همچنین، یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج مطالعاتی سازگار است که نشان داده‌اند تحول دیجیتال، اشتراک‌گذاری اطلاعات و قابلیت ردیابی می‌توانند عملکرد زنجیره تأمین پایدار دارویی را بهبود دهند (Abouei Mehrizi et al., 2024). بر این اساس، اهمیت بالای انطباق‌پذیری را می‌توان ناشی از آن دانست که زنجیره تأمین سلامت نه تنها باید کارآمد باشد، بلکه باید از نظر قانونی، فنی و اخلاقی نیز قابل دفاع و قابل ردیابی باشد.

یافته دیگر پژوهش نشان داد که در نقشه شناختی فازی، مفهوم «تغییرناپذیری داده» با درجه مرکزی ۱۵.۲۸ مؤثرترین مفهوم در کل سیستم است. این نتیجه از منظر نظری و کاربردی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا نشان می‌دهد که در ساختار علی مونیورینگ زنجیره تأمین سلامت، ثبت غیرقابل تغییر اطلاعات فقط یک ویژگی فنی نیست، بلکه یک متغیر راهبردی است که بر اعتماد، اصالت محصول، قابلیت حسابرسی، انطباق‌پذیری و شفافیت اثر می‌گذارد. این یافته مستقیماً استفاده از بلاکچین را در مدل پیشنهادی توجیه می‌کند. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که بلاکچین با ایجاد دفتر کل توزیع‌شده و تغییرناپذیر می‌تواند اعتماد میان بازیگران زنجیره را تقویت کرده و احتمال دستکاری داده‌ها را کاهش دهد (Kagigas et al., 2021; Saberi et al., 2019). افزون بر این، پژوهش‌های مربوط به زنجیره تأمین دارو نشان داده‌اند که استفاده از پلتفرم‌های مبتنی بر بلاکچین می‌تواند قابلیت رهگیری، شفافیت و تاب‌آوری زنجیره را افزایش دهد (Houshmandrad, 2023; Nikzadi Panah et al., 2024). از این رو، برجسته شدن تغییرناپذیری داده در پژوهش حاضر با ادبیات موجود همخوان است و نشان می‌دهد که در زنجیره تأمین سلامت، امنیت داده و اعتماد به داده، پیش شرط هرگونه تصمیم‌گیری هوشمند است.

نتایج تحلیل نقشه شناختی فازی همچنین نشان داد که الزامات بین‌المللی و زمان تحویل پس از تغییرناپذیری داده، بالاترین درجات مرکزی را دارند. این یافته نشان می‌دهد که مونیورینگ اثربخش باید هم‌زمان دو منطبق را دنبال کند: از یک سو، منطق انطباق و استانداردسازی که بر رعایت قواعد و الزامات قانونی تأکید دارد؛ و از سوی دیگر، منطق عملیاتی که بر زمان تحویل، دسترسی به موقع و پاسخگویی به نیاز مصرف‌کننده تمرکز می‌کند. این دو منطق در صنعت سلامت از یکدیگر جدا نیستند، زیرا تأخیر در تحویل دارو یا اختلال در زنجیره سرما می‌تواند به همان اندازه خطرناک باشد که جعل یا دستکاری داده خطرناک است. این تفسیر با مطالعاتی همسو است که نشان داده‌اند زنجیره تأمین سلامت برای بهبود عملکرد نیازمند هماهنگی میان کیفیت، زمان، هزینه و کنترل اطلاعات است (Ivanov & Dolgui, 2020; Kumar et al., 2019). همچنین، یافته‌های مرتبط با اهمیت فناوری‌های نوین در ارتقای نظارت، کارایی و کنترل زنجیره تأمین با مطالعات انجام‌شده درباره اینترنت اشیا و فناوری‌های هوشمند در

زنجیره تأمین سلامت و دارو همراستا است (Abadi et al., 2024; Bakhtiari & Rahemi Haghighi, 2024; Mehrin & Laleh, 2021).

نتایج شبیه‌سازی سناریوها نشان داد که مدل پیشنهادی قادر است رفتار پویای سیستم را در شرایط مختلف تحلیل کند. در سناریوی عادی، سیستم به وضعیت پایدار رسید، اما در سناریوهای اختلال در زنجیره سرما و تأخیر حمل و نقل، وضعیت نهایی ناپایدار شد. این یافته نشان می‌دهد که اختلالات عملیاتی، به‌ویژه اختلالات مرتبط با شرایط محیطی و زمان تحویل، می‌توانند پایداری کل سیستم را تحت تأثیر قرار دهند. کاهش رضایت مشتری در سناریوی تأخیر حمل نیز نشان می‌دهد که دریافت کنندگان محصولات سلامت نسبت به تأخیر در تحویل حساسیت بالایی دارند. در مقابل، در سناریوی نگرانی امنیتی، اصالت محصول افزایش یافت و سیستم در وضعیت نیمه‌پایدار قرار گرفت؛ این امر بیانگر آن است که فعال شدن هشدارهای امنیتی می‌تواند توجه سیستم را به کنترل اصالت و اعتبار داده‌ها افزایش دهد. چنین قابلیت با ماهیت نقشه‌های شناختی فازی سازگار است، زیرا این روش‌ها امکان تحلیل روابط علی، بازخوردها و سناریوهای پیچیده را فراهم می‌کنند (Michitarian et al., 2021; Sabahi et al., 2020). همچنین، نتایج حاضر با پژوهش‌هایی همسو است که کاربرد رویکردهای فازی و نقشه شناختی فازی را برای ارزیابی ریسک زنجیره تأمین مناسب دانسته‌اند (Vojc Ferolish et al., 2019).

ارزیابی فنی مدل نشان داد که مدل تلفیقی پیشنهادی از نظر دقت تشخیص اختلالات، حساسیت، ویژگی، $F1$ -Score و AUC -ROC عملکرد بهتری نسبت به سیستم استنتاج فازی، نقشه شناختی فازی و مدل پایه رگرسیون لجستیک دارد. دقت 0.928 و AUC -ROC برابر با 0.961 نشان می‌دهد که ترکیب سیستم استنتاج فازی و نقشه شناختی فازی می‌تواند در تشخیص اختلالات زنجیره تأمین سلامت کارآمد باشد. این یافته با این استدلال همسو است که روش‌های فازی در محیط‌های نامطمئن و پیچیده عملکرد مناسبی دارند، زیرا امکان تبدیل قضاوت‌های زبانی خبرگان به مدل محاسباتی و تحلیل روابط غیرخطی را فراهم می‌کنند (Michitarian et al., 2021; Sabahi et al., 2020). همچنین، برتری مدل تلفیقی نسبت به مدل پایه نشان می‌دهد که در مسئله‌ای مانند مونیتورینگ زنجیره تأمین سلامت، مدل‌های خطی و کلاسیک ممکن است نتوانند تمام پیچیدگی‌های موجود را پوشش دهند. این نتیجه از منظر ادغام فناوری نیز با پژوهش‌هایی همخوان است که ترکیب بلاکچین و هوش مصنوعی را راهکاری برای ایجاد زنجیره‌های تأمین هوشمندتر، شفاف‌تر و پایدارتر دانسته‌اند (Ahoorani & Rahdar, 2025; Behneke et al., 2020; Zahdi, 2023).

با وجود عملکرد مطلوب مدل از نظر دقت، امنیت و شفافیت، ارزیابی لایه بلاکچین نشان داد که مدل پیشنهادی در زمان تأیید تراکنش، تعداد تراکنش بر ثانیه، مصرف حافظه و رشد اندازه دفترکل نسبت به سیستم متمرکز سنتی عملکرد سنگین‌تری دارد. این یافته قابل انتظار است، زیرا معماری بلاکچین به دلیل استفاده از سازوکارهای اجماع، رمزنگاری، ثبت توزیع شده داده‌ها و حفظ نسخه‌های متعدد دفترکل، نسبت به سیستم‌های

متمرکز منابع بیشتری مصرف می‌کند. با این حال، نرخ موفقیت تراکنش‌ها در مدل پیشنهادی بالاتر بود و این موضوع نشان می‌دهد که هزینه محاسباتی بیشتر با افزایش قابلیت اعتماد و امنیت جبران می‌شود. این نتیجه با مطالعاتی همسو است که ضمن تأکید بر مزایای بلاکچین در شفافیت و اعتماد، به چالش‌های آن در مقیاس‌پذیری، هزینه، پیچیدگی فنی و پذیرش سازمانی اشاره کرده‌اند (Casino et al., 2019; Kagigas et al., 2021; Kamble et al., 2020). بنابراین، مدل پیشنهادی از منظر کاربردی نوعی مبادله میان کارایی محاسباتی و اعتمادپذیری اطلاعات ایجاد می‌کند؛ مبادله‌ای که در صنعت سلامت، به دلیل حساسیت بالای محصولات و پیامدهای خطا، اغلب به سود امنیت و قابلیت اعتماد قابل توجه است. نتایج آزمون‌های آماری نیز نشان داد که میانگین همه ابعاد اصلی به‌طور معناداری بالاتر از نقطه میانی مقیاس است و همه تفاوت‌ها دارای اندازه اثر بالا هستند. این یافته نشان می‌دهد که از دیدگاه خبرگان، ابعاد شناسایی شده نه تنها از نظر نظری مهم هستند، بلکه از نظر عملی نیز برای استقرار مونیتورینگ پیشرفته در زنجیره تأمین سلامت ضرورت دارند. همچنین، نتایج آزمون زوجی نشان داد که مدل پیشنهادی نسبت به سیستم سنتی در دقت تشخیص اختلالات، رضایت کاربری، امنیت درک‌شده و شفافیت اطلاعات بهبود معناداری ایجاد کرده است. این یافته با مطالعاتی همسو است که نشان داده‌اند فناوری‌های نوین می‌توانند کارایی و کیفیت نظارت در زنجیره تأمین را افزایش دهند (Bakhtiari & Rahemi Haghighi, 2024; Eghbali et al., 2024). همچنین، همخوان با مطالعاتی است که بلاکچین را ابزاری برای ارتقای شفافیت، رهگیری و اعتماد در زنجیره‌های تأمین معرفی کرده‌اند (Banerjee et al., 2019; Biyadar & Zaghari, 2025). از سوی دیگر، کاهش سرعت پاسخگویی در مدل پیشنهادی تأیید می‌کند که پیاده‌سازی چنین مدل‌هایی بدون توجه به زیرساخت، بهینه‌سازی فنی و ظرفیت پردازشی می‌تواند چالش‌برانگیز باشد.

تحلیل حساسیت نشان داد که مدل بیشترین حساسیت را به تعداد نودهای شبکه و میزان نویز داده‌ها دارد. حساسیت زیاد به تعداد نودهای شبکه نشان می‌دهد که طراحی معماری بلاکچین، انتخاب تعداد نودهای اعتبارسنج، تنظیم سازوکار اجماع و مدیریت بار تراکنش‌ها برای پیاده‌سازی موفق مدل اهمیت زیادی دارد. همچنین، حساسیت مدل به نویز داده‌ها نشان می‌دهد که کیفیت داده‌های ورودی در زنجیره تأمین سلامت نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد مدل دارد. این مسئله به‌ویژه زمانی اهمیت می‌یابد که داده‌ها از منابع مختلف مانند حسگرها، سامانه‌های سازمانی، گزارش‌های انسانی، اسناد حمل‌ونقل و سیستم‌های نظارتی جمع‌آوری می‌شوند. در چنین شرایطی، یکپارچه‌سازی داده‌ها، پاک‌سازی داده‌ها، کنترل کیفیت و استانداردسازی قالب اطلاعات باید بخشی جدایی‌ناپذیر از مدل مونیتورینگ باشد. این یافته با پژوهش‌هایی همسو است که بر نقش فناوری‌های دیجیتال، اشتراک‌گذاری اطلاعات و قابلیت ردیابی در عملکرد زنجیره تأمین پایدار تأکید کرده‌اند (Abouei Mehrizi et al., 2024; Shafiei Nikabadi et al., 2024). همچنین، یافته حاضر با مطالعاتی که استفاده از اینترنت اشیا و فناوری‌های هوشمند را برای افزایش کیفیت داده و نظارت بلادرنگ پیشنهاد کرده‌اند، همخوان است (Bakhtiari & Rahemi Haghighi, 2024; Mehrin & Laleh, 2021).

در ارزیابی نهایی، مدل پیشنهادی با امتیاز وزنی ۸.۹۲ از ۱۰، نسبت به سیستم سنتی با امتیاز ۷.۷۴، بهبود ۱۵.۲ درصدی نشان داد. بیشترین بهبود در امنیت و قابلیت اعتماد و سپس در دقت و صحت مشاهده شد، در حالی که سرعت و مقیاس پذیری مدل پیشنهادی نسبت به سیستم سنتی پایین تر بود. این نتیجه نشان می دهد که ارزش اصلی مدل در ارتقای اعتماد، امنیت، شفافیت، اعتبار داده و تصمیم گیری هوشمند است، نه صرفاً افزایش سرعت پردازش. چنین الگویی با نیازهای صنعت سلامت سازگار است؛ زیرا در این صنعت، خطای تصمیم گیری، جعل داده یا نبود قابلیت ردیابی می تواند هزینه های انسانی و اجتماعی بسیار بالاتری نسبت به تأخیر محدود پردازشی داشته باشد. بنابراین، مدل پیشنهادی را می توان چارچوبی مناسب برای حرکت از ردیابی ساده به مونیتورینگ هوشمند دانست؛ چارچوبی که در آن بلاکچین نقش زیرساخت اعتماد و ثبت داده را ایفا می کند و هوش مصنوعی فازی نقش تحلیل، تفسیر عدم قطعیت و پشتیبانی از تصمیم گیری را بر عهده دارد. این نتیجه با مسیر کلی ادبیات نوین زنجیره تأمین همسو است که بر ضرورت ادغام فناوری های دیجیتال برای ایجاد زنجیره های شفاف، تاب آور، هوشمند و داده محور تأکید دارد (Ahoorani & Rahdar, 2025; Behneke et al., 2020; Nikzadi Panah et al., 2024).

این پژوهش با وجود ارائه یک مدل یکپارچه و چندلایه، دارای محدودیت هایی است که باید در تفسیر یافته ها مورد توجه قرار گیرد. نخست آنکه جامعه پژوهش به مدیران، کارشناسان و خبرگان زنجیره تأمین سلامت استان قزوین محدود بود و بنابراین تعمیم نتایج به کل کشور یا سایر بخش های نظام سلامت باید با احتیاط انجام شود. دوم آنکه بخش هایی از مدل در محیط آزمایشگاهی و شبیه سازی شده ارزیابی شد و عملکرد آن در مقیاس واقعی، با حجم بالای تراکنش، تنوع بیشتر بازیگران و ناهمگونی سامانه های اطلاعاتی هنوز نیازمند بررسی میدانی گسترده تر است. سوم آنکه اگرچه مدل از شاخص های مختلف امنیت، دقت، شفافیت و کارایی استفاده کرد، اما برخی متغیرهای سازمانی مانند فرهنگ پذیرش فناوری، هزینه های واقعی پیاده سازی، سطح بلوغ دیجیتال سازمان ها و مقاومت ذی نفعان به صورت عمیق و طولی بررسی نشدند.

پیشنهاد می شود در مطالعات آینده، مدل پیشنهادی در سایر استان ها، سازمان های سلامت، شرکت های پخش دارو، بیمارستان ها و داروخانه های بزرگ اجرا و اعتبارسنجی شود تا قابلیت تعمیم آن در محیط های متنوع تر بررسی گردد. همچنین، پژوهش های آینده می توانند از داده های واقعی حسگرهای اینترنت اشیا، داده های تراکنشی عملیاتی و اطلاعات زنجیره سرد برای آزمون میدانی مدل استفاده کنند. توسعه نسخه های پیشرفته تر مدل با بهره گیری از یادگیری عمیق، الگوریتم های بهینه سازی، قراردادهای هوشمند پیشرفته تر و سازوکارهای اجماع سبک تر نیز می تواند به کاهش زمان پاسخگویی و افزایش مقیاس پذیری کمک کند. افزون بر این، انجام مطالعات اقتصادی برای ارزیابی هزینه - منفعت پیاده سازی مدل و مطالعات رفتاری برای بررسی پذیرش فناوری توسط مدیران و کارکنان می تواند مسیر عملیاتی سازی مدل را روشن تر سازد.

برای اجرای موفق چنین مدلی در صنعت سلامت، لازم است سازمان های مسئول ابتدا زیرساخت های داده ای و ارتباطی خود را استانداردسازی کرده و کیفیت داده های ورودی را تضمین کنند. ایجاد یک معماری تدریجی برای پیاده سازی، از پایلوت های محدود در زنجیره داروهای حساس یا

محصولات نیازمند زنجیره سرد آغاز شود و سپس به سایر بخش‌ها گسترش یابد. آموزش نیروی انسانی، طراحی رابط کاربری ساده، تعریف نقش‌ها و سطوح دسترسی، تدوین پروتکل‌های امنیتی و یکپارچه‌سازی مدل با سامانه‌های موجود از الزامات اصلی استقرار عملی مدل است. همچنین، سیاست‌گذاران حوزه سلامت باید چارچوب‌های حقوقی و اجرایی مشخصی برای استفاده از بلاکچین، قراردادهای هوشمند و تحلیل هوش مصنوعی در زنجیره تأمین سلامت تدوین کنند تا امکان بهره‌برداری ایمن، شفاف و پایدار از این فناوری‌ها فراهم شود.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

موازین اخلاقی

در تمامی مراحل پژوهش حاضر اصول اخلاقی مرتبط با نشر و انجام پژوهش رعایت گردیده است.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در انجام این پژوهش ما را همراهی کردند تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

Extended Abstract

Introduction

Healthcare supply chain monitoring has become a strategic requirement for ensuring the timely, safe, transparent, and reliable flow of medicines, medical equipment, and health-related products. Unlike conventional supply chains, healthcare supply chains are directly connected to patient safety, public health, regulatory compliance, and trust in health systems. Therefore, monitoring in this context is not limited to tracking the physical movement of products; rather, it includes continuous supervision of data integrity, product authenticity, environmental conditions, delivery performance, traceability, access control, and compliance with national and international standards. The increasing complexity of supply networks, the vulnerability of pharmaceutical distribution systems, and the need for resilience against disruptions have intensified the demand for intelligent and transparent monitoring mechanisms (Homaioon et al., 2021; Ivanov & Dolgui, 2020; Kumar et al., 2019). Previous studies have shown that healthcare and pharmaceutical supply chains require integrated design, information sharing, technological readiness, and advanced traceability capabilities to improve performance and reduce operational risks (Abouei Mehrizi et al., 2024; Khojeh et al., 2023; Shafiei Nikabadi et al., 2024). In this regard, digital transformation and smart technologies have

created new opportunities for improving pharmaceutical supply chain management, enhancing visibility, and supporting data-driven decision-making (Abadi et al., 2024; Eghbali et al., 2024; Mehrin & Laleh, 2021). Blockchain technology has been widely introduced as a promising solution for improving transparency, traceability, data immutability, transaction security, and trust among supply chain actors. Its distributed and tamper-resistant structure can reduce dependence on centralized validation mechanisms and provide a reliable infrastructure for recording sensitive supply chain transactions (Banerjee et al., 2019; Casino et al., 2019; Saberi et al., 2019). In healthcare and pharmaceutical supply chains, blockchain can help prevent counterfeit medicines, improve product authentication, and strengthen the security of health-related records (Mohit, 2020; Sajadian et al., 2022; Samiei & Ahmadi, 2021). Recent research has also emphasized the role of blockchain in enhancing transparency, traceability, trust, and resilience in pharmaceutical supply chain systems (Biyadar & Zaghari, 2025; Houshmandrad, 2023; Nikzadi Panah et al., 2024). However, blockchain alone is not sufficient for intelligent monitoring because it mainly provides secure recording and verification of data, while it does not inherently model uncertainty, predict disruptions, or analyze complex causal relationships. Therefore, the integration of blockchain with artificial intelligence, fuzzy cognitive maps, fuzzy inference systems, and Internet of Things-based monitoring can provide a more comprehensive framework for intelligent supply chain monitoring (Ahoorani & Rahdar, 2025; Bakhtiari & Rahemi Haghighi, 2024; Behneke et al., 2020; Zahdi, 2023). Fuzzy cognitive maps and other fuzzy artificial intelligence approaches are particularly suitable for complex and uncertain systems because they can represent causal relations, expert judgments, dynamic interactions, and scenario-based behavior in supply chain risk assessment (Michitarian et al., 2021; Sabahi et al., 2020; Vojc Ferolish et al., 2019). Accordingly, the present study aimed to design and validate an integrated model for improving healthcare supply chain monitoring by integrating fuzzy artificial intelligence algorithms into a blockchain platform.

Methods and Materials

This study was applied-developmental in terms of purpose and employed a mixed-methods design with a sequential exploratory approach. The research process began with a qualitative exploratory phase in which semi-structured interviews were conducted to identify the main dimensions, indicators, and causal relationships affecting healthcare supply chain monitoring. The qualitative findings were then used to develop the quantitative instrument and to design the initial model. The quantitative phase included questionnaire distribution, statistical analysis, fuzzy prioritization, fuzzy cognitive modeling, technical implementation, simulation, and model validation.

The statistical population consisted of managers, specialists, and experts active in the healthcare supply chain in Qazvin Province in 2025. Based on information from the provincial Food and Drug Administration, the population included senior and middle managers of pharmaceutical distribution companies, technical officers and managers of central pharmacies, and experts from the Ministry of Health and the Food and Drug Administration. Because the population was limited and accessible, census sampling was used in the

quantitative phase, and all 117 eligible individuals were included. In the qualitative phase, purposive judgmental sampling was applied, and interviews were continued until theoretical saturation was reached; accordingly, 15 experts participated in the qualitative phase.

Data were collected using semi-structured interviews and a researcher-made questionnaire. The interviews focused on the challenges of current monitoring systems, key performance indicators in tracking healthcare products, and the potential contribution of emerging technologies to transparency and security. The questionnaire included demographic information, monitoring dimensions, causal relationships, and model evaluation items. The reliability of the questionnaire was confirmed using Cronbach's alpha, with an overall coefficient of 0.916. The technical model was designed in three layers. The blockchain layer was developed using Hyperledger Fabric version 2.4 and included a permissioned network with four organizations: the Food and Drug Administration as regulator, the manufacturer, the distributor, and the pharmacy or hospital. The fuzzy artificial intelligence layer included a fuzzy inference system and fuzzy cognitive maps. The fuzzy inference system used temperature, humidity, and delay time as inputs and product risk level as output. The integration layer included a RESTful API Gateway, MongoDB for non-transactional and analytical data, and a React.js-based web dashboard for real-time visualization.

Qualitative data were analyzed using content analysis through open, axial, and selective coding in MAXQDA 2022. Quantitative data were analyzed using descriptive statistics, inferential statistics, confirmatory factor analysis, fuzzy analytic hierarchy process, fuzzy cognitive map simulation, sensitivity analysis, one-sample t-test, and paired-samples t-test. SmartPLS 4 was used for construct validity analysis, and Python with the FCMpy library was used for fuzzy cognitive map simulation.

Findings

The qualitative findings identified four main dimensions and twelve sub-indicators of healthcare supply chain monitoring. The four dimensions were tracking and tracing, security and credibility, adaptability, and operational efficiency. Tracking and tracing included geographic location, environmental conditions, and packaging status. Security and credibility included product authenticity, authorized access, and data immutability. Adaptability included national standards, international requirements, and domestic regulations. Operational efficiency included delivery time, logistics costs, and customer satisfaction.

Descriptive findings showed that all four dimensions had mean scores higher than 4 on a five-point Likert scale, indicating their high importance from the experts' perspective. Security and credibility had the highest mean score ($M = 4.45$, $SD = 0.59$) and the lowest coefficient of variation, indicating that it was both the most important and the most stable dimension. Adaptability followed with a mean of 4.31, tracking and tracing with a mean of 4.23, and operational efficiency with a mean of 4.18. The overall mean score was 4.29, confirming the perceived necessity of an advanced monitoring system in the healthcare supply chain.

The fuzzy analytic hierarchy process showed that security and credibility had the highest priority weight (0.324), followed by adaptability (0.287), tracking and tracing (0.221), and operational efficiency (0.168).

These results indicate that security-related concerns were almost twice as important as operational efficiency in the evaluated healthcare supply chain monitoring model.

The fuzzy cognitive map analysis showed that data immutability was the most influential concept in the system, with an input degree of 7.23, output degree of 8.05, and centrality degree of 15.28. International requirements ranked second with a centrality degree of 14.29, followed by delivery time with a centrality degree of 14.03. Customer satisfaction, product authenticity, national standards, domestic regulations, authorized access, logistics costs, geographic location, environmental conditions, and packaging status followed in subsequent ranks.

Scenario simulation results showed that the normal condition scenario reached a stable state after 12 iterations. The cold chain disruption scenario resulted in instability after 18 iterations, and customer satisfaction decreased to 0.586. The transportation delay scenario produced the most severe decline in customer satisfaction, reaching 0.492, and the system became unstable after 21 iterations. In the security concern scenario, the system reached a semi-stable state after 16 iterations, and product authenticity increased to 0.892, indicating that security alerts increased the system's focus on authenticity and data validation.

The technical evaluation showed that the blockchain-based model had higher computational costs than the traditional centralized system. Transaction confirmation time was 187 milliseconds in the proposed model compared with 112 milliseconds in the traditional system. Transactions per second were 285 in the proposed model and 520 in the traditional system. Memory consumption was 423 MB in the proposed model compared with 185 MB in the traditional system. Monthly ledger growth was 1.2 GB compared with 0.8 GB. However, the transaction success rate was slightly higher in the proposed model, reaching 99.98% compared with 99.85% in the traditional system.

The fuzzy artificial intelligence evaluation showed that the integrated proposed model outperformed the separate fuzzy inference system, fuzzy cognitive map, and logistic regression baseline. The proposed model achieved an accuracy of 0.928, sensitivity of 0.915, specificity of 0.939, F1-score of 0.922, and AUC-ROC of 0.961. The one-sample t-test showed that all main dimensions were significantly above the midpoint of the scale. The paired-samples t-test showed significant improvements in disruption detection accuracy, user satisfaction, perceived security, and information transparency compared with the traditional system. The final weighted evaluation indicated that the proposed model scored 8.92 out of 10, while the traditional system scored 7.74, representing a 15.2% improvement.

Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that healthcare supply chain monitoring requires a multidimensional model in which security, credibility, adaptability, traceability, and operational efficiency are integrated rather than treated as separate functions. The priority of security and credibility indicates that in healthcare supply chains, the prevention of data tampering, product counterfeiting, unauthorized access, and unreliable reporting is more critical than speed alone. The central role of data immutability in the fuzzy cognitive map further confirms that

blockchain is not merely a technical addition but a foundational infrastructure for building trust and accountability in healthcare supply chain monitoring.

The results also show that fuzzy artificial intelligence enhances the analytical capacity of the monitoring system. While blockchain provides secure and transparent data registration, fuzzy inference and fuzzy cognitive mapping enable the system to interpret uncertain conditions, model causal relationships, simulate disruptions, and support decision-making. The superior performance of the integrated model compared with the individual fuzzy models and logistic regression baseline confirms the value of combining rule-based fuzzy reasoning with causal dynamic modeling.

The proposed model, however, involves a trade-off between computational efficiency and trustworthiness. It performed better in security, reliability, transparency, and detection accuracy but weaker in speed, memory consumption, and scalability compared with the centralized system. In healthcare contexts, this trade-off may be acceptable because the consequences of counterfeit products, manipulated records, and untraceable disruptions are substantially more serious than moderate computational delays. Overall, the study concludes that integrating blockchain with fuzzy artificial intelligence provides an effective framework for intelligent healthcare supply chain monitoring. The model can improve transparency, enhance security, increase disruption detection accuracy, and support more reliable decision-making under uncertainty. Future implementation should focus on optimizing scalability, reducing computational overhead, improving data quality, integrating Internet of Things-based data sources, and testing the model in real operational healthcare supply chain environments.

References

- Abadi, F., Jamali, G., & Ghorbanpour, A. (2024). Analyzing the role of smart technologies in pharmaceutical supply chain management. First National Conference on New Perspectives in Management and Accounting with an Organizational Transformation Approach, Shiraz, Iran.
- Abouei Mehrizi, S., Diosalar, H., & Sharif, F. (2024). Investigating the relationship between digital transformation and sustainable pharmaceutical supply chain performance considering the mediating role of information sharing and traceability capability. Fourteenth International Conference on Industrial Engineering, Productivity, and Quality, Tehran, Iran.
- Ahoorani, Z., & Rahdar, M. (2025). Application of blockchain and artificial intelligence in smart pharmaceutical supply chain management: Implementation challenges in the digital health system. Eleventh International Conference on Industrial and Systems Engineering, Mashhad, Iran.
- Bakhtiari, M., & Rahemi Haghighi, M. (2024). The role of the Internet of Things in increasing efficiency and monitoring in the supply chain. Seventeenth International Conference on Management, Global Trade, Economics, Finance, and Social Sciences,
- Banerjee, S., Kim, J., & Tiwari, M. K. (2019). Blockchain-based supply chain management: A review. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2110-2133. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1545750>
- Behneke, R., Kolbe, L., & Becker, J. (2020). Combining blockchain and AI for sustainable supply chains: An exploration. *Business & Information Systems Engineering*, 62, 295-309. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00645-0>
- Biyadar, M., & Zaghari, N. (2025). Examining the application of blockchain in supply chain management, transparency, traceability, and trust. Twenty-Sixth National Conference on Applied Research in Electrical Sciences, Computer Science, and Biomedical Engineering, Shirvan, Iran.
- Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*, 36, 55-81. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>
- Eghbali, H., Tavangar, A., & Nematollahi, Z. (2024). Identifying factors affecting the selection of modern technology in the health supply chain. First National Conference on Management in the Age of Transformations with Emphasis on Technology, Science, and Practice, Ardabil, Iran.

- Homaioon, A., Shafiee, M., & Kianmehr, M. H. (2021). Supply chain performance improvement in healthcare industry: A multi-agent approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.02.005>
- Houshmandrad, M. (2023). Blockchain-based intelligent tracking and tracing platform for the pharmaceutical supply chain. Fifth National Conference on Professional Research in Psychology and Counseling with a Teacher's Perspective Approach,
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: Extending the supply chain resilience angles towards survivability. *International Journal of Production Research*, 58(10), 2904-2915. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1722048>
- Kagigas, S., Choudhary, A., & Dwivedi, Y. K. (2021). Blockchain adoption in supply chains: Benefits and challenges. *Information Systems Frontiers*, 23, 1185-1202. <https://doi.org/10.1007/s10796-020-10019-8>
- Kamble, S., Gunasekaran, A., & Sharma, R. (2020). Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt Industry 4.0 in Indian manufacturing industry. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106846. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106846>
- Khojeh, Z., Darvish-Mohammadi, T., & Mohajer Tabrizi, M. (2023). Pharmaceutical supply chain design: An integrated approach. Ninth International Conference on Industrial and Systems Engineering, Mashhad, Iran.
- Kumar, S., Goswami, S., & Sharma, V. (2019). Performance improvement of healthcare supply chain using lean-six sigma. *International Journal of Health Care Quality Assurance*, 32(5), 1043-1057. <https://doi.org/10.1108/IJHCQA-12-2018-0340>
- Mehrin, M. S., & Laleh, S. (2021). An exploratory model of factors affecting optimization of health system supply chains using blockchain technology and the Internet of Things. Eighteenth International Conference on Industrial Engineering,
- Michitarian, A., Sabahi, M., & Vojc Ferolish, M. (2021). Fuzzy cognitive maps in supply chain risk management: A systematic review. *Applied Soft Computing*, 110, 107648. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107648>
- Mohit, M. (2020). The role of blockchain in preventing counterfeit and low-quality medicines from entering the pharmaceutical supply chain. Third International Conference on Information Technology, Computer, and Telecommunications Engineering of Iran, Tehran, Iran.
- Nikzadi Panah, A., Rahdar, M., & Bandani, G. (2024). Pharmaceutical supply chain resilience using blockchain technology. *Journal of Military Medicine*, 26(3).
- Sabahi, M., Mousavi, S., & Shafiee, M. (2020). Fuzzy cognitive maps for modeling complex systems in supply chains. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106789. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106789>
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117-2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>
- Sajadian, F., Karimi Takloo, S., & Shool, A. (2022). Examining the application of blockchain in the sustainable healthcare supply chain. *Health Information Management Journal*, 19(5).
- Samiei, S. A., & Ahmadi, A. (2021). Infrastructures and consequences of applying blockchain technology in the healthcare system and pharmaceutical supply chain. Fourteenth National Conference on Computer Science and Engineering and Information Technology, Babol, Iran.
- Shafiei Nikabadi, M., Moghadam, A., & Eshghali, M. (2024). A causal model for analyzing factors affecting implementation of traceability capability in the food supply chain. *Supply Chain Management Quarterly*, 26(85).
- Vojc Ferolish, M., Pourjavad, E., & Shahin, A. (2019). A hybrid fuzzy cognitive map approach for supply chain risk assessment. *International Journal of Supply and Operations Management*, 6(3), 199-214.
- Zahdi, A. (2023). Investigating the relationship between blockchain technology and artificial intelligence in supply chain management. Nineteenth National Conference on Computer Science and Engineering and Information Technology, Babol, Iran.