Journal of Quality Engineering and Management

www.pqprc.ir

J. Qual. Eng. Manag. Vol. 15, No. 4 (2025) 468–488.

Paper Type: Original Article

Reliability Enhancing in Hospital Pharmaceutical Supply Chains Using a Blockchain-Based System Dynamics Approach

Hamidreza Savarolia[1], Babak Shirazi[1,*], Iraj Mahdavi[1], Ali Tajdin[1]

[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran; hamid.savar@gmail.com; shirazi_b@yahoo.com; shirazi_b@yahoo.com; ali_tajdin@yahoo.com.

Citation:

Received: 03 May 2025 *Revised: 07 September 2025* *Accepted: 14 October 2025*	Savarolia, H., Shirazi, B., Mahdavi, I., & Tajdin, A. (2025). Reliability enhancing in hospital pharmaceutical supply chains using a blockchain-based system dynamics approach. *Journal of Quality Engineering and Management, 15*(4), 468-488.

Abstract

Purpose: This paper examines how blockchain technology can improve reliability and operational performance in hospital pharmaceutical supply chains with a focus on inventory variability and responsiveness to demand.

Methodology: A system dynamics model of a three-echelon chain (manufacturer–distributor–hospital) is developed. Two information-sharing scenarios are compared: a traditional setting with centralized, delayed information and a blockchain setting with real-time, decentralized data sharing.

Findings: Results indicate that blockchain adoption enhances behavioral stability, reduces the persistence of hospital backlog, and shortens mean delivery lead time. Specifically, mean lead time decreases by ~15.1% and mean hospital backlog decreases by ~15.8% (both statistically significant). However, the difference in mean hospital inventory is not significant; stability improves, with inventory SD decreasing by ~21.5% and lead-time SD decreasing by ~10%. Taken together, these effects strengthen service reliability and overall supply-chain performance.

Originality/Value: By integrating blockchain-based decentralized data sharing with system dynamics modeling in the hospital pharmaceutical context, this study provides quantitative evidence of how transparency supports quality-oriented supply chain management.

Keywords: Blockchain, System dynamics, Hospital pharmaceutical supply chain, Reliability, Performance paper.

Corresponding Author: shirazi_b@yahoo.com

10.48313/jqem.2025.544998.1572

Licensee System Analytics. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

مهندسی و مدیریت کیفیت

www.pqprc.ir

دوره ۱۵، شماره (۴)، (۱۴۰۴)، ۴۸۸-۴۶۸

نوع مقاله: پژوهشی

ارتقای قابلیت اطمینان در زنجیره‌های تامین دارویی بیمارستانی با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم مبتنی بر بلاک‌چین

حمیدرضا ساورعلیا[۱]، بابک شیرازی[۱،*]، ایرج مهدوی[۱]، علی تاجدین[۱]

[۱]مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران.

چکیده

هدف: این پژوهش بررسی می‌کند که چگونه فناوری بلاکچین می‌تواند قابلیت اطمینان و عملکرد عملیاتی را در زنجیره‌های تامین دارویی بیمارستان با تمرکز بر تغییرپذیری موجودی و پاسخگویی به تقاضا بهبود بخشد.

روش‌شناسی پژوهش: یک مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای شبیه‌سازی زنجیره سه‌سطحی شامل تولیدکننده، توزیع‌کننده و بیمارستان توسعه داده شد. در این مدل دو سناریوی اشتراک‌گذاری اطلاعات، مقایسه گردید که شامل: روش سنتی با جریان اطلاعات متمرکز و دارای تاخیر و روش مبتنی بر بلاک‌چین با اشتراک‌گذاری بلادرنگ و غیرمتمرکز داده‌ها هستند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که به‌کارگیری بلاک‌چین موجب پایداری بیشتر موجودی‌ها، کاهش ماندگاری عقب‌ماندگی سفارش بیمارستان و کوتاه‌تر شدن میانگین تاخیر تحویل می‌شود. شفافیت اطلاعات بلاک‌چین، پویایی‌های داخلی سیستم را بهبود می‌بخشد. متوسط زمان تاخیر تحویل سفارشات بیمارستان حدود ۱۵/۱% کاهش و متوسط سفارشات معوق بیمارستان نیز ۱۵/۸% بهبود یافته است. همچنین، پایداری موجودی‌ها و سفارشات معوق تقویت شده است، به‌طوری‌که انحراف معیار موجودی بیمارستان ۲۱/۵% کاهش و انحراف معیار زمان تاخیر تحویل حدود۱۰% کاهش یافته است. این تغییرات درمجموع به بهبود قابلیت اطمینان خدمت و ارتقای عملکرد کلی زنجیره تامین منجر می‌گردد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: این پژوهش با ادغام فناوری بلاک‌چین و مدلسازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها در بستر زنجیره دارویی بیمارستانی، شواهد کمی و کاربردی در زمینه نقش شفافیت غیرمتمرکز در مدیریت کیفیت‌محور زنجیره تامین ارایه می‌کند.

کلیدواژه‌ها: بلاک‌چین، پویایی‌شناسی سیستم‌ها، زنجیره تامین دارویی بیمارستانی، قابلیت اطمینان، عملکرد.

۱- مقدمه

زنجیره تامین دارویی بیمارستانی شبکه‌ای از تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و بیمارستان‌هاست که مسئولیت تامین به‌موقع داروهای ضروری را بر عهده دارد. با تکیه بر نوآوری‌های صنعت ۴/۰ مانند بلاک‌چین و اینترنت اشیا، این زنجیره‌ها به سمت ساختارهایی پاسخگوتر و غیرمتمرکزتر حرکت می‌کنند که با عنوان زنجیره تامین دارویی بیمارستانی ۴/۰ (*HPSC 4.0*) شناخته می‌شود. در این پژوهش، عملکرد نسخه سنتی زنجیره تامین و نسخه

پیشرفته آن از منظر پاسخ‌گویی، شفافیت و کارایی عملیاتی مقایسه می‌شود. کارایی و تاب‌آوری زنجیره تامین دارویی بیمارستانی برای تضمین دسترسی پایدار به داروهای حیاتی و حفظ استانداردهای مراقبت از بیمار حیاتی است. با این‌حال، سامانه‌های سنتی این زنجیره غالبا با ناکارآمدی‌هایی همچون ناپایداری موجودی، زمان تحویل طولانی و تحقق سفارش کمتر از سطح بهینه مواجه‌اند [1]. ریشه این ناکارآمدی‌ها در سازوکارهای تکه‌تکه و تاخیردار اشتراک‌گذاری اطلاعات است که دیدپذیری و هماهنگی برخط را میان بازیگران محدود می‌کند [2]. نتیجه این وضعیت، افزایش ریسک کمبود دارو، تاخیر درمان و رشد هزینه‌های عملیاتی برای بیمارستان‌هاست. از دیدگاه مدیریت کیفیت، چنین کاستی‌هایی معادل کاهش قابلیت اطمینان خدمت و افت رضایت بیماران تلقی می‌شوند. مطالعات داخلی نیز نشان می‌دهد استقرار مدیریت کیفیت سازمانی در بیمارستان‌ها به بهینه‌سازی فرایندها و ارتقای کیفیت خدمات درمانی منجر می‌شود [3].

پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های غیرمتمرکز، به‌ویژه بلاک‌چین، راهکارهای امیدبخشی برای غلبه بر این چالش‌ها فراهم کرده‌اند. بلاک‌چین امکان اشتراک‌گذاری ایمن و بلادرنگ داده میان ذی‌نفعان متعدد را ایجاد می‌کند و درنتیجه شفافیت را افزایش می‌دهد، پیش‌بینی تقاضا را بهبود می‌بخشد و ناکارآمدی‌های سیستمی را کاهش می‌دهد [4]. برخلاف سکوهای سنتی ابری که بر کنترل متمرکز متکی‌اند و در معرض دستکاری داده قرار دارند، بلاک‌چین با دفترکل توزیع‌شده و تغییرناپذیر خود، اعتماد و پاسخ‌گویی را ارتقا می‌دهد [1].

با این‌حال، زنجیره تامین دارویی بیمارستانی همچنان با چالش‌هایی بنیادی مانند عدم تقارن اطلاعات، ارتباطات تاخیردار و فقدان دید جامع انتها به انتها مواجه است. جریان‌های داده‌ی گسسته معمولا به پیش‌بینی نادرست تقاضا، تشدید نوسانات موجودی (اثر شلاقی) و افزایش زمان تحویل می‌انجامند [1]، [5]. اگرچه سامانه‌های متمرکز ابری تا حدی از این تاخیرها کاسته‌اند، همچنان در برابر خرابی‌های تک‌نقطه‌ای، چالش‌های هم‌کنش‌پذیری و محدودیت‌های شفافیت آسیب‌پذیر هستند [4]؛ بنابراین، نیاز فوری به سازوکارهای اشتراک‌گذاری اطلاعات تاب‌آور، شفاف و غیرمتمرکز برای بهبود عملکرد عملیاتی و افزایش تاب‌آوری زنجیره تامین در حوزه سلامت وجود دارد. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر توسعه یک مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای تحلیل و مقایسه عملکرد زنجیره تامین دارویی بیمارستانی در دو حالت سنتی و مبتنی بر بلاک‌چین است. نوآوری این پژوهش در آن است که علاوه بر بررسی شاخص‌های عملیاتی مانند سطح موجودی، زمان تحویل و میزان سفارش‌های برآورده‌نشده، این شاخص‌ها در چارچوب مدیریت کیفیت نیز تحلیل می‌شوند تا نقش بلاک‌چین در ارتقای قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد کلی زنجیره دارویی روشن گردد.

این پژوهش با توسعه یک مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها، عملکرد زنجیره تامین دارویی بیمارستانی را در دو حالت سنتی و مبتنی بر بلاک‌چین تحلیل و مقایسه می‌کند. نوآوری این پژوهش در ترکیب رویکرد پویایی‌شناسی سیستم با سیاست شفافیت اطلاعات (بلاک‌چین) برای کشف شرایط و آستانه‌های بروز اثر در محیط‌های دارای تاخیر و بازخورد است. نشان داده می‌شود که بهبود عملکرد، نتیجه‌ای بدیهی یا آنی نیست و تنها پس از دوره‌ای از انباشت بازخورد به‌صورت معنادار در شاخص‌ها ظاهر می‌شود؛ بنابراین، نتیجه وابسته به ساختار دینامیکی سیستم است، نه صرفا افزایش دسترسی به داده. ساختار باقی‌مانده مقاله به این صورت است: در بخش دوم، مروری بر ادبیات مرتبط شامل زنجیره تامین دارویی، کاربردهای بلاک‌چین و مدلسازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها در لجستیک سلامت ارایه می‌شود. بخش سوم به روش‌شناسی پژوهش اختصاص دارد و جزئیات مربوط به ساختار مدل، مفروضات و فرمول‌بندی ریاضی تشریح می‌شود. در بخش چهارم، نتایج حاصل از آزمایش‌های عددی و تحلیل حساسیت بررسی می‌شود و نهایتا بخش پنجم به جمع‌بندی یافته‌ها، ارایه دلالت‌های مدیریتی و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده می‌پردازد.

۲- مرور ادبیات

بخش مرور ادبیات در دو قسمت ارایه می‌شود: نخست، پیشینه تحقیق که به‌صورت موضوع‌محور، مطالعات مرتبط را به‌صورت بخش به بخش بررسی می‌کند؛ سپس، شکاف پژوهش که با اتکا به این مرور، کاستی‌های باقی‌مانده را به‌طور روشن بیان کرده و مبنای صورت‌بندی مساله و روش‌شناسی مطالعه حاضر را فراهم می‌سازد.

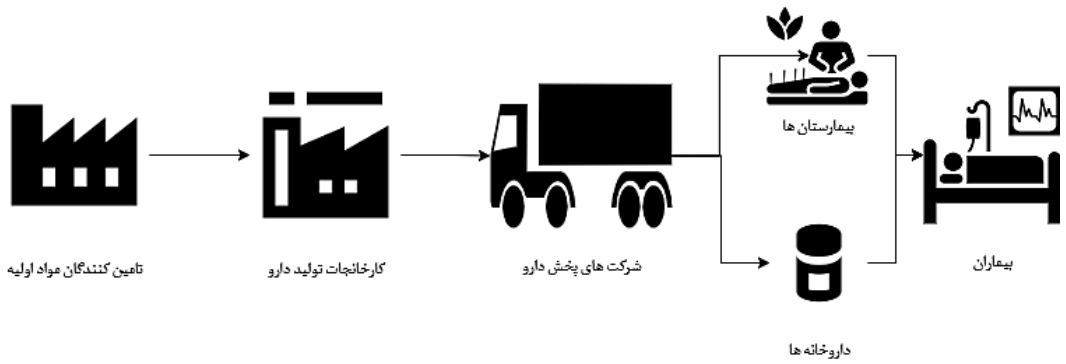
۱-۲- پیشینه تحقیق

در این بخش، پیشینه مرتبط با موضوع پژوهش به‌صورت سه‌لایه مرور می‌شود تا هم بستر مساله روشن شود و هم مسیر نوآوری پژوهش مشخص گردد. ابتدا مطالعات زنجیره تامین دارویی در سطح کلان را می‌آوریم؛ سپس به ادبیات زنجیره تامین دارویی بیمارستانی می‌پردازیم که نزدیک‌ترین بستر عملیاتی به مساله این پژوهش است و در نهایت پژوهش‌های مبتنی بر بلاک‌چین در زنجیره دارویی بیمارستانی را مرور می‌کنیم که به‌طور مستقیم با سیاست پیشنهادی ما پیوند دارند.

۱-۱-۲- زنجیره تامین دارویی

زنجیره تامین دارویی شبکه‌ای از ذی‌نفعان و فرایندهاست که مسئولیت انتقال دارو از تولیدکنندگان به مصرف‌کنندگان نهایی را بر عهده دارد. این سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده است که کیفیت کالاهای حساس در طول حمل‌ونقل و توزیع به‌دقت حفظ شود [6]. زنجیره تامین دارویی نقشی اساسی در تضمین دسترس‌پذیری، ایمنی و تحویل به‌موقع داروها به مراکز درمانی ایفا می‌کند. با این‌حال، ناکارآمدی‌هایی مانند زمان تحویل طولانی، کمبود موجودی و ناهماهنگی داده‌ها همچنان از چالش‌های جدی این حوزه به شمار می‌آیند [1].

ساختار کلیک زنجیره تامین دارویی در **شکل ۱** نشان داده شده است. در این ساختار، جریان مواد اولیه از تامین‌کنندگان آغاز می‌شود و پس از تولید، داروها از طریق شبکه توزیع به بیمارستان‌ها و داروخانه‌ها منتقل شده و در نهایت به دست بیماران می‌رسند. این ساختار بر اهمیت لجستیک و اشتراک‌گذاری اطلاعات در تضمین دسترسی پایدار به دارو و ارتقای کارایی زنجیره تامین تاکید دارد.



شکل ۱- زنجیره تامین دارویی.
Figure 1- Pharmaceutical supply chain.

زنجیره تامین در حوزه سلامت نیازمند راهکارهای موثر برای کاهش هزینه‌های عملیاتی و رفع ناکارآمدی‌هاست. بسیاری از سازمان‌های پیشرو در این حوزه به‌طور فزاینده‌ای در حال بررسی و پیاده‌سازی فناوری بلاک‌چین به‌منظور ارتقای کارایی، امنیت و قابلیت رهگیری هستند [7]. افزایش تمرکز بر ایمنی دارو موجب شده تقاضا برای رهگیری و شفافیت بیشتر در زنجیره تامین دارویی به‌طور قابل‌توجهی رشد یابد. در همین راستا، شرکت‌های داروسازی از سامانه‌های رهگیری سنتی مبتنی بر پایگاه‌های داده متمرکز یا توزیع‌شده استفاده کرده‌اند تا کیفیت دارو را کنترل و سطح شفافیت را ارتقا دهند. با این‌حال، اتصال همه ذی‌نفعان دارویی به یک زنجیره واحد برای اشتراک‌گذاری اطلاعات همچنان چالش‌برانگیز است؛ زیرا احتمال دستکاری داده‌ها و تضاد منافع وجود دارد [8].

مدیریت موثر زنجیره تامین در صنایع مختلف یک چالش اساسی است، اما در بخش سلامت به دلیل پیچیدگی‌ها و ریسک‌های بالا، مستقیما با ایمنی بیماران در ارتباط قرار می‌گیرد [7]. پژوهش‌های اخیر بر ضرورت استفاده از چارچوب‌های داده‌محور در زنجیره تامین دارویی تاکید کرده‌اند. این رویکردها با تکیه بر تحلیل‌های کمی و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده، امکان بهبود پاسخ‌گویی و تاب‌آوری در شرایط بحرانی را فراهم می‌کنند. بهره‌گیری از فناوری‌های نوظهور همچون "صنعت داروسازی ۴/۰" نیز می‌تواند زمینه‌ساز خلق ارزش پایدار در این صنعت شود و به شرکت‌های دارویی کمک کند تا چابک‌تر، هوشمندتر و متناسب با نیازهای فردی عمل کرده و در بلندمدت مزیت رقابتی کسب کنند [9].

باوجوداین، موانع متعددی مانع از دستیابی به پایداری کامل در زنجیره‌های دارویی می‌شوند. ازجمله این موانع می‌توان به هزینه‌ها و زمان‌بر بودن فرایندها، کمبود دانش تخصصی و آموزش، الزامات سخت‌گیرانه قانونی، نبود انگیزه‌های تجاری کافی، همکاری ناکارآمد میان بازیگران زنجیره، فقدان شاخص‌های شفاف برای ارزیابی و آگاهی اندک نسبت به نیازهای واقعی مصرف‌کننده نهایی اشاره کرد [9]. مطالعات اخیر بر ضرورت ایجاد سازوکارهای قدرتمند برای اشتراک‌گذاری اطلاعات تاکید دارند تا دیدپذیری، رهگیری و کارایی عملیاتی زنجیره تامین ارتقا یابد [4]. در مقابل، زنجیره‌های سنتی عمدتا بر سامانه‌های متمرکز متکی هستند که در برابر دستکاری داده‌ها، مشکلات هم‌کنش‌پذیری و ناکارآمدی‌های فرایندی آسیب‌پذیرند [1]. ازاین‌رو، حرکت به‌سوی فناوری‌های غیرمتمرکز مانند بلاک‌چین به‌طور روزافزون به‌عنوان یک راهکار عملی برای غلبه بر این چالش‌ها مطرح می‌شود [4].

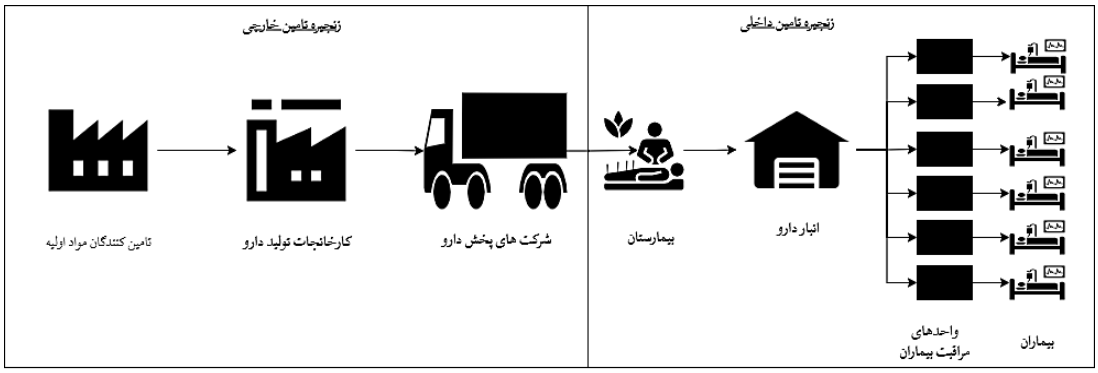
۲-۱-۲- زنجیره تامین دارویی بیمارستانی

بیمارستان‌ها مجموعه‌ای گسترده از فعالیت‌ها و فرایندها را مدیریت می‌کنند که هدف اصلی آن ارایه خدمات درمانی کارآمد به بیماران است. یکی از حیاتی‌ترین اجزای این فرایند، مدیریت موثر موجودی دارو و توزیع به‌موقع آن به بیماران است. ازآنجاکه کارایی زنجیره تامین بیمارستان مستقیما با سلامت بیماران ارتباط دارد، حتی خطاها یا ناکارآمدی‌های کوچک می‌تواند پیامدهای جدی و گاه جبران‌ناپذیر به همراه داشته باشد [3].

زنجیره تامین دارویی در بیمارستان‌ها به‌طورکلی از دو بخش اصلی تشکیل می‌شود:

۱. زنجیره تامین خارجی که شامل تامین و انتقال دارو از تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان به بیمارستان است.
۲. زنجیره تامین داخلی که بر ذخیره‌سازی دارو، کنترل موجودی و توزیع نهایی آن به واحدهای درمانی و بیماران تمرکز دارد.

اجزای اصلی و بخش‌های این شبکه پیچیده در **شکل ۲** نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲- زنجیره تامین دارویی بیمارستانی.
Figure 2- Hospital pharmaceutical supply chain.

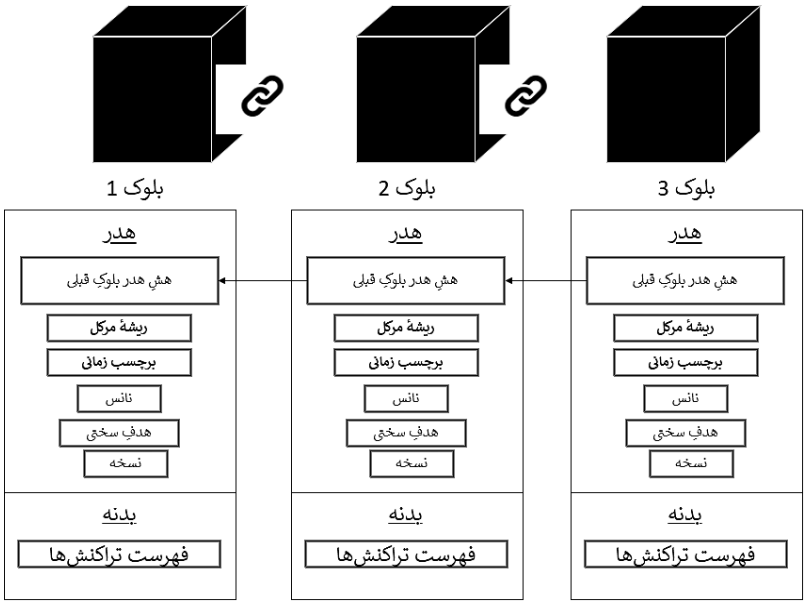
پیچیدگی‌های مدیریت زنجیره تامین بیمارستانی، به‌ویژه در زمینه تضمین ایمنی و دسترس‌پذیری داروهای حیاتی، اهمیت دقت، کارایی و شفافیت در لجستیک دارویی را دوچندان می‌کند. هرگونه اختلال یا ناکارآمدی در این زنجیره می‌تواند سلامت بیماران را تهدید کرده و پیامدهایی همچون تاخیر در درمان، کمبود دارو یا تجویز نادرست را به همراه داشته باشد [7]؛ بنابراین، ایجاد زنجیره تامین بیمارستانی تاب‌آور و پاسخگو به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی نهادهای درمانی مطرح است. تحقق این هدف مستلزم بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته و راهبردهای نوین مدیریت زنجیره تامین برای ارتقای کارایی، قابلیت رهگیری و ایمنی بیماران است.

۳-۱-۲- زنجیره تامین دارویی بیمارستانی مبتنی بر بلاک‌چین

زنجیره تامین دارویی ساختاری پیچیده دارد و با چالش‌هایی همچون ناکامی‌های عملیاتی، ورود داروهای تقلبی و کمبود شفافیت روبه‌روست. برای رفع این مشکلات، فناوری بلاک‌چین به‌عنوان راهکاری نویدبخش معرفی شده است که می‌تواند رهگیری، امنیت و شفافیت در زنجیره دارویی را تضمین کند [10].

در مطالعات داخلی نیز نشان داده شده است که ترکیب پویایی‌شناسی سیستم‌ها و بلاک‌چین می‌تواند با ایجاد تصویر واحد از تقاضا و موجودی، دامنه نوسانات رفتاری را مهار کند و شاخص‌های عملکردی را بهبود دهد [11]. در سطح بین‌المللی، یک راهکار بلاک‌چینی برای اشتراک‌گذاری امن اطلاعات در زنجیره دارویی سه فاز ثبت، گردش و تسویه را پوشش داده و بر تمامیت داده و رهگیری انتهابه‌انتها تاکید می‌کند[12] .

بلاک‌چین یک دفترکل غیرمتمرکز، تغییرناپذیر و توزیع‌شده است که از مجموعه‌ای از بلوک‌های به‌هم‌پیوسته تشکیل می‌شود. هر بلوک شامل داده‌های تراکنشی، برچسب زمانی و کد رمزنگاری‌شده است که به‌طور ایمن ذخیره می‌شوند [13]. این ساختار مانع از تغییر یا دستکاری داده‌ها می‌شود و درنتیجه، سطح اعتماد و پاسخ‌گویی در زنجیره تامین دارویی افزایش می‌یابد. استفاده از بلاک‌چین با فراهم کردن شفافیت، قابلیت رهگیری و مصونیت در برابر دستکاری، اعتماد میان ذی‌نفعان را تقویت کرده و زمینه بهبود کیفیت خدمت را ایجاد می‌کند. ساختار یک شبکه بلاک‌چین و اجزای اصلی آن در **شکل ۳** نشان داده شده است.



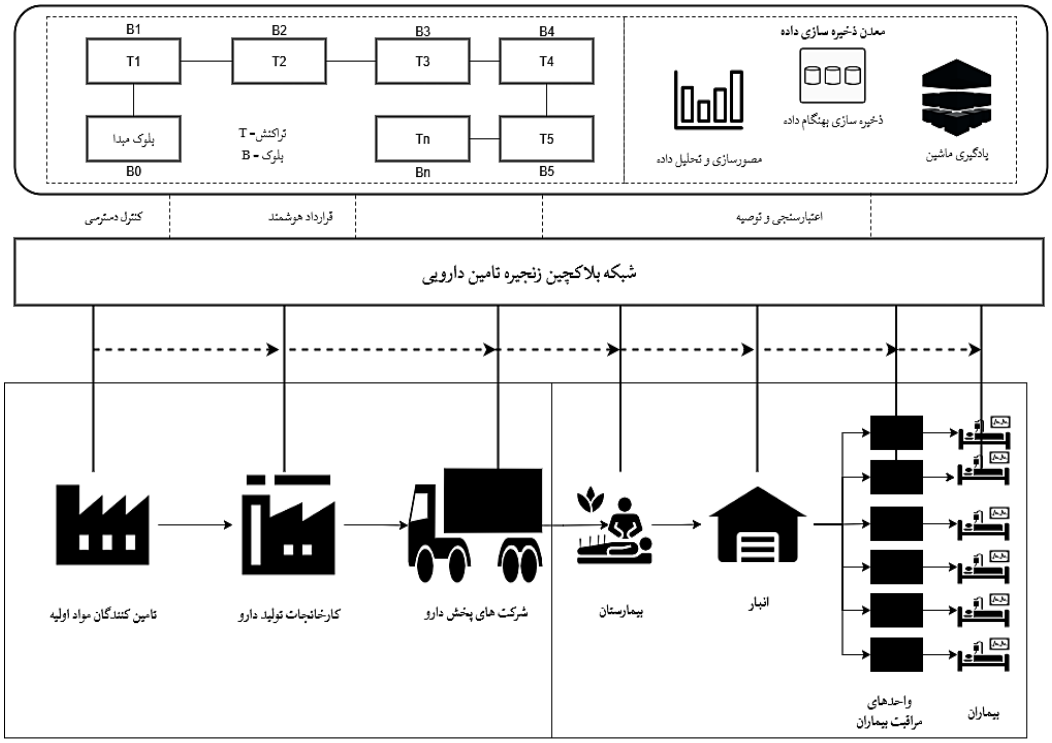
شکل ۳- ساختار بلاک‌چین [4].

Figure 3- Blockchain structure [4].

بلاک‌چین امکان اشتراک‌گذاری ایمن و بلادرنگ اطلاعات را در قالب یک شبکه همتابه‌همتا (*P2P*) میان ذی‌نفعان فراهم می‌کند. برخلاف زنجیره‌های سنتی که عمدتا بر سامانه‌های متمرکز متکی‌اند و در معرض دستکاری داده و ناکارآمدی قرار دارند، در بلاک‌چین داده‌ها به‌صورت توزیع‌شده در سراسر شبکه ذخیره می‌شوند. این ویژگی غیرمتمرکز بودن، ریسک‌هایی همچون تقلب، ورود داروهای جعلی و دستکاری اطلاعات را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد [4].

کاربرد بلاک‌چین در مدیریت زنجیره تامین دارویی مزایای متعددی به همراه دارد. ازجمله این مزایا می‌توان به افزایش شفافیت و قابلیت رهگیری اشاره کرد؛ به‌گونه‌ای که امکان رهگیری انتهابه‌انتها فراهم و دقت و اصالت داده‌ها تضمین می‌شود [4]. همچنین، ماهیت غیرمتمرکز بلاک‌چین موجب توزیع اطلاعات در میان چندین گره می‌شود و بدین ترتیب مانع از تغییرات غیرمجاز خواهد شد. ویژگی تغییرناپذیری و امنیت این فناوری سبب می‌شود تراکنش‌های ثبت‌شده قابل‌تغییر یا حذف نباشند و ریسک ورود داروهای تقلبی کاهش یابد [14]. افزون بر این، یکپارچگی داده‌ها اعتماد و همکاری میان تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، داروخانه‌ها و بیمارستان‌ها را تقویت می‌کند. ماهیت غیرمتمرکز بلاک‌چین همچنین نقش

واسطه‌ها را کاهش داده و احتمال بروز فساد و تقلب در تراکنش‌های زنجیره تامین را به حداقل می‌رساند [15]. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از بلاک‌چین با ایجاد شفافیت و ثبت غیرقابل تغییر داده‌ها، به کاهش تقلب و افزایش قابلیت رهگیری دارو منجر می‌شود [16]. **شکل ۴** نمای کلی از زنجیره تامین دارویی مبتنی بر بلاک‌چین را نشان می‌دهد. این چارچوب نحوه ادغام بلاک‌چین در ساختار زنجیره تامین را نمایش می‌دهد؛ ادغامی که با هدف ارتقای امنیت، شفافیت و قابلیت رهگیری صورت می‌گیرد.



شکل ۴- زنجیره تامین دارویی بیمارستانی مبتنی بر بلاک‌چین [17].
Figure 4- Blockchain-based hospital pharmaceutical supply chain [17].

بلاک‌چین در زنجیره‌های دارویی می‌تواند چالش‌هایی چون نبود دیدپذیری، ورود داروهای تقلبی و انطباق با مقررات را برطرف کند. همگام‌سازی برخط داده‌ها، ثبت‌های دیجیتال ایمن و سابقه حسابرسی تغییرناپذیر، شفافیت و اعتماد را افزایش داده و پایبندی به مقررات را تسهیل می‌کند [18].

با وجود مزایای متعدد، به‌کارگیری بلاک‌چین در صنعت داروسازی با موانع و چالش‌هایی همراه است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از پیچیدگی یکپارچه‌سازی، محدودیت مقیاس‌پذیری و نگرانی‌های مربوط به محرمانگی داده [4]، [15]. چشم‌انداز آینده نشان می‌دهد ادغام بلاک‌چین با فناوری‌های نوظهور مانند اینترنت اشیا برای رهگیری برخط، هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تقاضا و قراردادهای هوشمند برای خودکارسازی تراکنش‌ها می‌تواند کارایی، امنیت و تاب‌آوری زنجیره‌های دارویی بیمارستانی را در عصر صنعت ۴/۰ ارتقا دهد [19].

۲-۲- شکاف‌های پژوهشی

این بخش شکاف‌های شناسایی‌شده در ادبیات را بر اساس یک طبقه‌بندی موضوعی و روش‌شناختی جمع‌بندی می‌کند. در چارچوب رویکرد پیشنهادی [4]، مقالات بررسی‌شده در چهار گروه قرار می‌گیرند: ۱- مقالات مفهومی که چارچوب‌های نظری یا مدل‌های مفهومی ارایه کرده‌اند، ۲- مطالعات تجربی مبتنی بر تحلیل موردی یا پیاده‌سازی‌های واقعی، ۳- پژوهش‌های مدلسازی با استفاده از روش‌های ریاضی و شبیه‌سازی مانند

پویایی‌شناسی سیستم هایا ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره[1] و ۴- مطالعات فنی که بر معماری و جزئیات پیاده‌سازی پلتفرم‌های بلاک‌چین تمرکز دارند. این طبقه‌بندی روندهای پژوهشی را روشن می‌سازد و شکاف‌های روش‌شناختی را برجسته می‌کند که پژوهش حاضر درصدد پاسخ به آن‌هاست. یافته‌های اولیه نشان می‌دهد که بخش بزرگی از ادبیات موجود بر تاب‌آوری زنجیره تامین، عملکرد لجستیکی و تحول دیجیتال در پرتو فناوری‌های صنعت ۴/۰ متمرکز بوده است. بسیاری از مطالعات به بلاک‌چین پرداخته‌اند، اما عمدتا در قالب چارچوب‌های مفهومی یا در حوزه‌هایی خارج از سلامت [10]، [13]. بخشی دیگر از پژوهش‌ها مشکلات زنجیره تامین بیمارستانی مانند ناکارآمدی‌ها، نوسانات تقاضا و چالش‌های موجودی را بررسی کرده‌اند، اما غالبا بر سامانه‌های سنتی یا مبتنی بر ابر برای اشتراک‌گذاری اطلاعات متکی بوده‌اند [4].

جدول ۱- خلاصه مطالعات مرورشده و شکاف‌های پژوهشی.

Table 1- Summary of reviewed studies and research gaps.

پژوهش	تعریف مساله						نوع زنجیره تامین	روش‌شناسی
	اشتراک‌گذاری اطلاعات	قابلیت ردیابی	تاب‌آوری	پایداری	هزینه‌ها	موجودی		
[20]						✓	دارویی	شبیه‌سازی
[21]					✓	✓	بیمارستان	تصمیم‌گیری چندمعیاره
[22]			✓		✓	✓	دارویی	مدلسازی ریاضی
[23]						✓	دارویی	شبیه‌سازی
[24]						✓	دارویی	مدلسازی ریاضی
[25]						✓	دارویی	شبیه‌سازی
[26]	✓				✓		دارویی	مرور ادبیات
[27]					✓	✓	دارویی	مدلسازی ریاضی
[28]					✓	✓	دارویی	شبیه‌سازی
[1]	✓		✓				بیمارستان	شبیه‌سازی
[29]					✓	✓	بیمارستان	شبیه‌سازی
[2]					✓	✓	بیمارستان	مرور ادبیات
[30]				✓	✓		دارویی	نظریه بازی‌ها
[31]			✓		✓		دارویی	تصمیم‌گیری چندمعیاره
[32]	✓	✓					دارویی	مرور ادبیات
پژوهش حاضر (۲۰۲۵)	✓	✓	✓			✓	بیمارستان	شبیه‌سازی

اگرچه مدلسازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها به‌طور گسترده در تحلیل زنجیره تامین و ارزیابی سیاست‌ها به‌کار رفته، مطالعات محدودی این رویکرد را با سازوکارهای اشتراک‌گذاری غیرمتمرکز اطلاعات مبتنی بر بلاک‌چین در چارچوب زنجیره تامین دارویی بیمارستانی ۴/۰ ترکیب کرده‌اند [1]، [33]. شکاف مهم دیگر، فقدان تحلیل‌های کمی است که نشان دهد اشتراک‌گذاری غیرمتمرکز و بلادرنگ اطلاعات بر بستر بلاک‌چین تا چه اندازه می‌تواند شاخص‌هایی مانند زمان تحویل، پایداری موجودی و نرخ تحقق سفارش را در محیط‌های درمانی بهبود بخشد.

بیشتر مدل‌های موجود یا کیفیت جریان اطلاعات را نادیده گرفته‌اند یا صرفا بر شرایط ناشی از همه‌گیری‌ها تمرکز داشته‌اند. **جدول ۱** ادبیات مرتبط را خلاصه کرده و حوزه تمرکز، روش‌شناسی، شکاف‌های شناسایی‌شده و پاسخ این مطالعه به آن‌ها را نشان می‌دهد. پژوهش حاضر در پی پر کردن

[1] Multi-Criteria Decision Making (MCDM)

خلا ناشی از کمبود تحقیقات یکپارچه و شبیه‌سازی‌شده است که نقش اشتراک‌گذاری غیرمتمرکز داده‌ها را در زنجیره تامین دارویی بیمارستانی ۴/۰ بررسی می‌کنند. برخلاف مطالعاتی که تنها چارچوب‌های مفهومی بلاک‌چین یا شرایط اختلالی را بررسی کرده‌اند، این تحقیق عملکرد زنجیره در حالت پایدار را مدلسازی کرده و تبادل داده میان تولیدکننده، توزیع‌کننده و بیمارستان را شبیه‌سازی می‌کند. نوآوری اصلی این مطالعه در ترکیب بلاک‌چین با مدلسازی پویایی‌شناسی سیستم‌هاست؛ ترکیبی که اثرات غیرمتمرکزسازی داده‌ها بر شاخص‌هایی مانند موجودی، زمان تحویل و سفارش‌های برآورده‌نشده را کمی‌سازی می‌کند و نشان می‌دهد فناوری‌های صنعت ۴/۰ چگونه می‌توانند شفافیت و پاسخ‌گویی در لجستیک دارویی را ارتقا دهند.

۳- روش‌شناسی پژوهش

۳-۱- رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها

این پژوهش برای تحلیل اثر اشتراک‌گذاری غیرمتمرکز داده‌ها بر عملکرد زنجیره تامین دارویی بیمارستانی از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها[1] استفاده می‌کند. این رویکرد برای فهم تعاملات پیچیده زنجیره دارویی و ارزیابی اثرات بلندمدت مداخلات کیفیتی مبتنی بر بلاک‌چین مناسب است. روش‌شناسی *SD* امکان بررسی ساختارهای بازخورد، تاخیرهای زمانی و تعاملات غیرخطی میان عامل‌ها، شامل تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و بیمارستان‌ها را فراهم می‌آورد. برای مقایسه مکانیزم‌های اشتراک‌گذاری داده، دو سناریو طراحی و شبیه‌سازی شده است: در سناریوی سنتی، عامل‌های بالادستی تصمیمات موجودی و سفارش‌دهی خود را بر پایه پیش‌بینی‌های تاخیردار و هموارشده از تقاضای پایین‌دستی اتخاذ می‌کنند. در مقابل، در سناریوی مبتنی بر بلاک‌چین دسترسی بلادرنگ به سفارش‌های پایین‌دستی، نیاز به هموارسازی تقاضا را حذف کرده و امکان تصمیم‌گیری سریع‌تر و دقیق‌تر را فراهم می‌کند.

در طراحی مرزهای مدل، از چارچوب تامین‌کننده–ورودی–فرایند–خروجی–مشتری[2] به‌عنوان منطق اصلی تعریف زنجیره تامین استفاده شده است تا روابط علی میان اجزای زنجیره به‌صورت فرایندمحور بازنمایی گردد. در این چارچوب، تولیدکننده و توزیع‌کننده به‌عنوان تامین‌کنندگان (*Suppliers*) دارو، بیمارستان به‌عنوان مشتری (*Customer*) و جریان سفارش، تولید و تحویل دارو به‌عنوان فرایند (*Process*) اصلی مدل در نظر گرفته شده‌اند. ورودی‌ها (*Inputs*) شامل داده‌های تقاضا، موجودی و اطلاعات سفارش بوده و خروجی‌ها (*Outputs*) متغیرهای عملکردی نظیر زمان تحویل، سطح موجودی و قابلیت اطمینان سیستم هستند. با تکیه بر این ساختار، سیاست پیشنهادی بلاک‌چین به‌عنوان تغییری در سطح "فرایند" (یعنی نحوه اشتراک و انتقال اطلاعات) مدلسازی شده تا اثر آن بر "خروجی" (افزایش قابلیت اطمینان) ارزیابی گردد. بدین ترتیب، چارچوب *SIPOC* پایه‌ای مفهومی برای تحلیل پویای بهبود فرایندها و تبیین مسیر علی ارتقای قابلیت اطمینان در زنجیره دارویی فراهم می‌کند.

مدل شبیه‌سازی با نرم‌افزار *Vensim* ساخته و طیبک بازه ۲۵۰ روزه اجرا شده است تا هم رفتار گذرا و هم رفتار پایدار سیستم پوشش داده شود. مفروضات ساختاری، مقادیر پارامترها و روابط میان عامل‌ها بر اساس ادبیات معتبر پویایی‌شناسی سیستم‌ها استخراج و متناسب با بستر زنجیره دارویی بیمارستانی ۴/۰ تنظیم گردیده‌اند. این رویکرد امکان مقایسه شاخص‌هایی مانند پایداری موجودی، زمان تحویل و نرخ تحقق سفارش‌ها را در سطوح مختلف دسترسی به اطلاعات فراهم می‌کند.

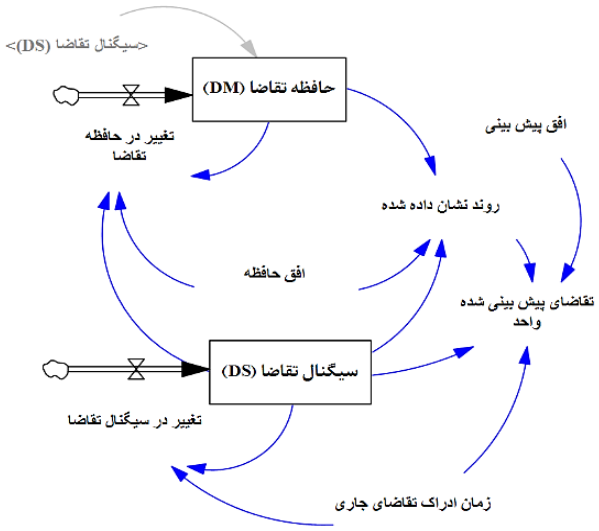
۳-۲- ساختار مدل

مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها در این پژوهش، رفتار یک زنجیره تامین دارویی بیمارستانی سه‌سطحی شامل تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و بیمارستان‌ها را بازنمایی می‌کند. عامل تولیدکننده شامل سه سازوکار اصلی است: ۱- پیش‌بینی تقاضا، ۲- مدیریت ظرفیت و ۳- کنترل موجودی.

[1] Systems Dynamics (SD)

[2] Supplier-Input-Process-Output-Customer (SIPOC)

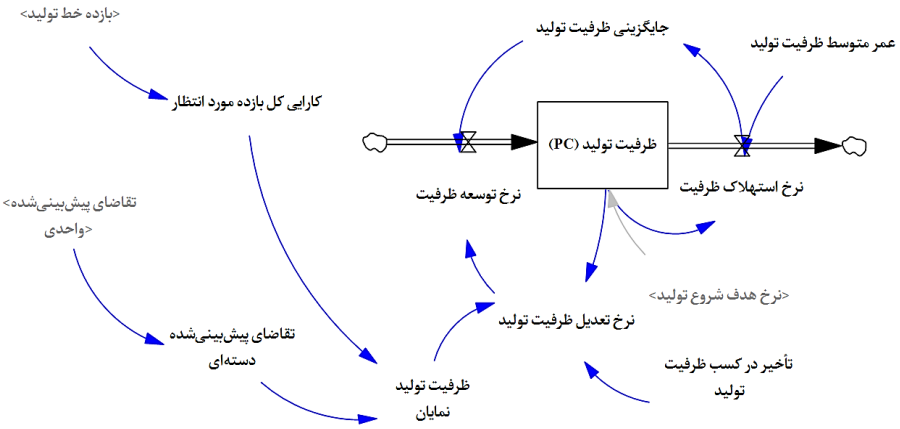
در گام نخست، با استفاده از سیگنال تقاضا[1] و حافظه تقاضا[2]، روند تقاضا هموار شده و برآوردی از نیاز آینده بیمارستان‌ها تولید می‌شود. این سازوکار در **شکل ۵** نشان داده شده و امکان هماهنگی برنامه‌های تولید و موجودی با تغییرات تقاضا را فراهم می‌کند.



شکل ۵- پویایی‌های پیش‌بینی تقاضا.

Figure 5- Demand forecast dynamics.

در گام دوم، ظرفیت تولید[3] بر اساس تقاضای پیش‌بینی‌شده و بازده کل مورد انتظار تعدیل می‌شود. همان‌طور که در **شکل ۶** مشاهده می‌شود، ظرفیت تولید تحت jhedv دو جریان توسعه ظرفیت و استهلاک قرار دارد و با یک تاخیر ذاتی در دستیابی به ظرفیت جدید همراه است.

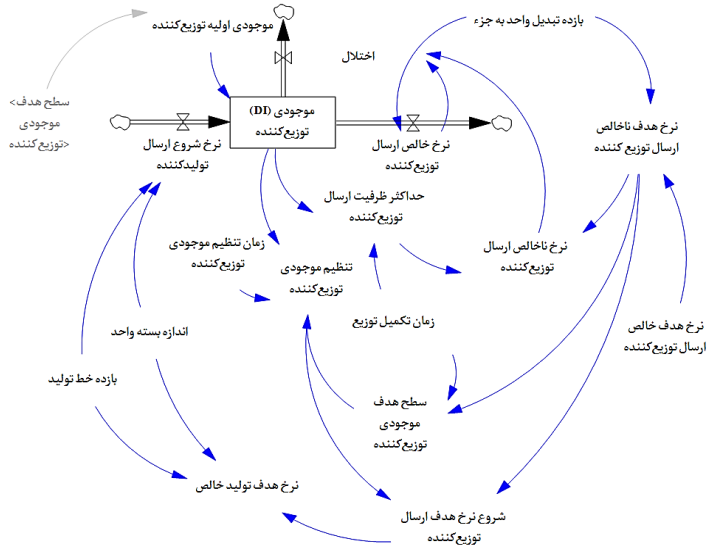


شکل ۶- پویایی‌های ظرفیت تولید.

Figure 6- Production capacity dynamics.

در نهایت، سطح موجودی تولیدکننده[4] بر پایه نرخ شروع و تکمیل تولید به‌روز می‌شود، درحالی‌که محصولات مردود نیز محاسبه می‌شوند. همان‌طور که در **شکل ۷** نشان داده شده است، این سازوکار کنترل موجودی تضمین می‌کند شکاف میان موجودی واقعی و موجودی هدف کاهش یافته و جریان پایدار دارو در زنجیره حفظ شود.

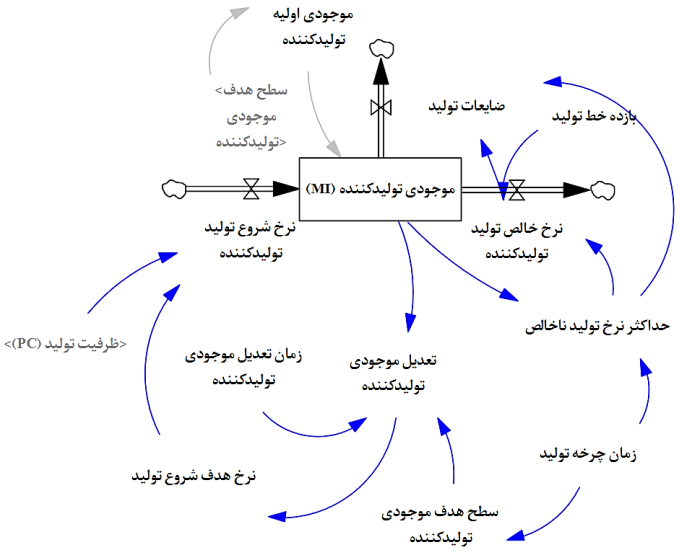
[1] Demand Signal (DS)
[2] Demand Memory (DM)
[3] Production Capacity (PC)
[4] Manufacturer's Inventory (MI)



شکل ۷- ماژول مدیریت موجودی تولیدکننده.

Figure 7- Manufacturer inventory management module.

عامل توزیع‌کننده موجودی خود را از طریق تعامل میان ورودی از تولیدکننده و خروجی به بیمارستان‌ها تنظیم می‌کند. در **شکل ۸** ساختار کلی این تعاملات نمایش داده شده است. موجودی توزیع‌کننده[1] با استفاده از مکانیزم تعدیل موجودی کنترل می‌شود تا هرگونه انحراف از سطح مطلوب اصلاح گردد. توان تامین نیز به‌وسیله نرخ ارسال ناخالص، ظرفیت حداکثری و بازده عملیاتی تعیین می‌شود. این سازوکار، نقش توزیع‌کننده را به‌عنوان یک میانگیر برجسته می‌سازد که نوسانات سیستم را تعدیل و دسترس‌پذیری پایدار دارو را تضمین می‌کند.

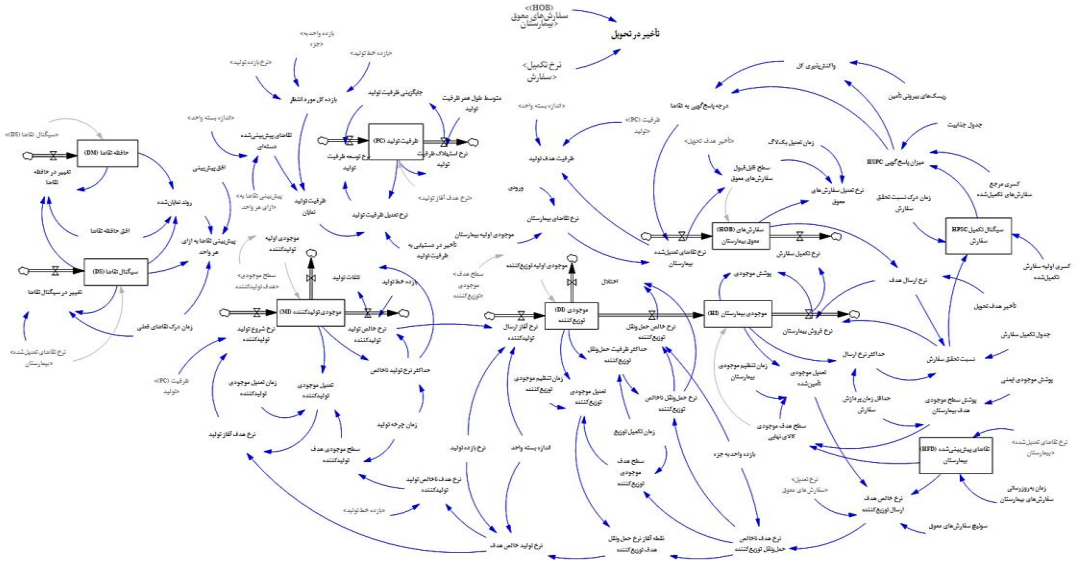


شکل ۸- تنظیم موجودی توزیع‌کننده.

Figure 8- Distributor inventory adjustment.

[1] Distributor Inventory (DI)

عامل بیمارستان تقاضای بیماران را پایش و تامین می‌کند. همان‌طور که در **شکل ۹** مشاهده می‌شود، متغیرهایی همچون بک‌لاگ سفارش، پوشش موجودی و سیگنال تحقق سفارش رفتار این بخش را شکل می‌دهند. بیمارستان به‌عنوان پایین‌دست زنجیره، بیشترین *jhedv* را از نوسانات و تاخیرها دریافت می‌کند.



شکل ۹- نمودار انباشت و جریان زنجیره تامین دارویی بیمارستانی.

Figure 9- Hospital pharmaceutical supply chain flow and accumulation diagram.

درمجموع، این ساختار یکپارچه امکان شبیه‌سازی عرضه و تقاضا را در شرایط گوناگون ازجمله نوسانات تقاضای بیمارستانی، محدودیت ظرفیت تولید یا تغییر در راهبردهای اشتراک‌گذاری اطلاعات فراهم می‌کند. بازنمایی حلقه‌های بازخورد و تاخیرهای عملیاتی در مدل، درک اثرات موجی تصمیمات محلی بر عملکرد کل زنجیره را ممکن می‌سازد. در ادامه، روابط ریاضی میان متغیرهای معرفی‌شده فرمول‌بندی خواهد شد تا چارچوب کمی تحلیل تکمیل گردد.

۳-۳- فرمول‌بندی مدل

در این بخش مبانی ریاضی مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها ارایه می‌شود. ساختار انباشت و جریان که پیش‌تر تشریح شد، در قالب مجموعه‌ای از معادلات پویا بازنویسی می‌شود تا تکامل متغیرهای اصلی در طول زمان را توضیح دهد. این معادلات بر پایه منطق زمان پیوسته و با گام‌های روزانه تدوین شده‌اند و سازوکارهایی همچون هموارسازی، تاخیرهای زمانی، تعدیل موجودی و کنترل بازخورد را در بر می‌گیرند. ساختار ریاضی مدل پیرامون سه عامل اصلی سازمان‌دهی شده است. عامل بیمارستان مسئول مدیریت موجودی محلی، تامین تقاضا و ایجاد سفارش‌های تکمیلی است. عامل توزیع‌کننده نقش میانگیر را ایفا می‌کند و سطح موجودی و جریان ارسال‌ها میان تولیدکننده و بیمارستان را تنظیم می‌سازد. عامل تولیدکننده نیز به برنامه‌ریزی تولید، تنظیم ظرفیت و مدیریت ارسال‌های خروجی می‌پردازد.

در کنار این عوامل، یک مکانیزم پیش‌بینی تقاضا نیز در مدل گنجانده شده است که با ترکیب روندهای تاریخی و مشاهدات اخیر، نیاز آینده را برآورد می‌کند. اگرچه این مکانیزم به‌عنوان یک عامل مستقل در نظر گرفته نشده، اما نقشی محوری در همسوسازی تولید بالادستی با نیازهای پایین‌دستی ایفا می‌نماید. برای تسهیل درک مدل، **جدول ۲** مهم‌ترین متغیرها و پارامترهای استفاده‌شده را خلاصه می‌کند. این جدول شامل متغیرهای حالت مانند موجودی و بک‌لاگ، متغیرهای جریان مانند نرخ‌های تولید و ارسال و متغیرهای کمکی کلیدی است. تعاریف جدول با اصطلاحات به‌کاررفته در ساختار مدل همسو هستند.

جدول ۲- متغیرها و پارامترهای اصلی مدل.

Table 2- Main variables and parameters of the model.

دسته‌بندی	تعریف	Definition	Symbol
پارامترها	تاخیر هدف در تحویل	Target delivery delay	TDD
پارامترها	حداقل زمان پردازش سفارش	Minimum order processing time	PIT
پارامترها	پوشش موجودی ایمنی	Safety stock coverage	SSC
پارامترها	زمان تعدیل موجودی بیمارستان	Time to adjust hospital inventory	TAHI
پارامترها	حداقل زمان پردازش سفارش	Minimum order processing time	MOPT
پارامترها	چرخه زمانی تولید	Manufacturing cycle time	MCT
پارامترها	بازده بسته‌بندی	Pack yield	PY
انباشت‌ها	موجودی بیمارستان	Hospital inventory	HI(t)
انباشت‌ها	بک‌لاگ سفارش بیمارستان	Hospital order backlog	HOB(t)
انباشت‌ها	تقاضای پیش‌بینی‌شده بیمارستان	Hospital forecasted demand	HFD(t)
انباشت‌ها	موجودی توزیع‌کننده	Distributor inventory	DI(t)
متغیرهای انباشت	موجودی تولیدکننده	Manufacturer inventory	MI(t)
متغیرهای جریان	نرخ سفارش	Order rate	OR(t)
متغیرهای جریان	نرخ تحویل بیمارستان	Delivery Rate Hospital	DRH(t)
متغیرهای جریان	نرخ آزادسازی تولید	Production release rate	PRR(t)
متغیرهای جریان	نرخ ارسال مورد انتظار به بیمارستان	Desired Supply Rate Hospital	DSRH(t)
متغیرهای جریان	نرخ تکمیل تولید	Production completion rate	PCT(t)
متغیرهای جریان	نرخ ارسال توزیع‌کننده	Supply Rate Distributor	SRDD(t)
متغیرهای جریان	نرخ ارسال مورد انتظار به توزیع‌کننده	Desired Supply Rate Distributor	DSRD(t)
متغیرهای جریان	نرخ تحقق سفارش	Order fulfillment rate	OFR(t)
متغیرهای کمکی	نرخ ارسال موردنظر	Desired shipment rate	SRD(t)
متغیرهای کمکی	تاخیر واقعی در تحویل	Actual delivery delay	ADD(t)
متغیرهای کمکی	نسبت تحقق سفارش	Order fulfillment ratio	OFRT (t)
کمکی	پوشش موجودی بیمارستان	Coverage of Hospital Inventory	CRH(t)
کمکی	پوشش موجودی توزیع‌کننده	Coverage of Distributor Inventory	CRD(t)
کمکی	پوشش موجودی تولیدکننده	Coverage of Manufacturer Inventory	CRM(t)
کمکی	سفارش‌های موردنظر بیمارستان	Desired Orders of Hospital	DOH(t)
کمکی	سفارش‌های موردنظر توزیع‌کننده	Desired Orders of Manufacturer	DOM(t)
کمکی	تولید موردنظر	Desired Production of Manufacturer	DPM(t)
کمکی	کار در جریان ساخت	Work In Progress	WIP(t)

زیربخش‌های آتی روابط ریاضی مربوط به هر یک از عامل‌ها را تعریف می‌کنند. در این چارچوب، شرایط اولیه و مقادیر کلیدی پارامترها که برای اجرای شبیه‌سازی مورداستفاده قرار گرفته‌اند نیز معرفی می‌شوند.

عامل بیمارستان

$$OR(t) = PD(t), \quad (۱)$$

که در آن $OR(t)$ نرخ سفارش بیمارستان و $PD(t)$ تقاضای بیماران می‌باشد.

$$HOBHOB(t) = HOB(t-1) + OR(t) - DRH(t), \quad (۲)$$

که در آن $HOB(t)$ بک‌لاگ سفارش بیمارستان و $DRH(t)$ نرخ تحویل به بیمارستان می‌باشد.

$$HI(t) = HI(t-1) + DRH(t) - PD(t), \quad (۳)$$

که در آن $HI(t)$ موجودی بیمارستان است.

$$HFD(t) = HFD(t-1) + (PD(t) - HFD(t-1)) / TAHI, \quad (۴)$$

که در آن $HFD(t)$ پیش‌بینی تقاضای بیمارستان و $TAHI$ زمان تعدیل موجودی بیمارستان است.

$$DIH(t) = PIT + SSC * HFD(t), \quad (۵)$$

که در آن $DIH(t)$ موجودی هدف بیمارستان، PIT حداقل زمان پردازش سفارش و SSC پوشش موجودی ایمنی است.

$$GIH(t) = (DIH(t) - HI(t)) / TAHI, \quad (۶)$$

که در آن $GIH(t)$ شکاف موجودی بیمارستان است.

$$DOH(t) = max(0, HFD(t) + GIH(t)), \quad (۷)$$

که در آن $DOH(t)$ سفارش‌های موردنظر بیمارستان است.

$$DSRH(t) = HOB(t) / TDD, \quad (۸)$$

که در آن $DSRH(t)$ نرخ ارسال مورد انتظار بیمارستان و TDD زمان تحویل هدف است.

$$MSRH(t) = DI(t) / PIT, \quad (۹)$$

که در آن $MSRH(t)$ حداکثر نرخ ارسال بیمارستان و $DI(t)$ موجودی توزیع‌کننده می‌باشد.

$$DRH(t) = min(DSRH(t), MSRH(t)), \quad (۱۰)$$

که در آن $DRH(t)$ نرخ تحویل واقعی به بیمارستان می‌باشد.

$$ORD(t) = DOH(t), \quad (۱۱)$$

که در آن $ORD(t)$ نرخ سفارش توزیع‌کننده و $DOH(t)$ سفارش‌های موردنظر بیمارستان می‌باشد.

$$DOB(t) = DOB(t-1) + ORD(t) - DSRD(t), \quad (۱۲)$$

که در آن $DOB(t)$ بک‌لاگ سفارش توزیع‌کننده و $DSRD(t)$ نرخ ارسال مورد انتظار توزیع‌کننده می‌باشد.

$$DI(t) = DI(t-1) + DSRD(t) - DRH(t), \quad (۱۳)$$

که در آن $DI(t)$ موجودی توزیع‌کننده می‌باشد.

$$DID(t) = MOPT + SSC \times HFD(t), \quad (۱۴)$$

که در آن $DID(t)$ موجودی هدف توزیع‌کننده، $MOPT$ حداقل زمان پردازش سفارش و SSC پوشش موجودی ایمنی می‌باشد.

عامل توزیع‌کننده

$$GID(t) = (DID(t) - DI(t)) / TAHI, \quad (۱۵)$$

که در آن $GID(t)$ شکاف موجودی توزیع‌کننده می‌باشد.

$$DOM(t) = max(0, HFD(t) + GID(t), \quad (۱۶)$$

که در آن $DOM(t)$ سفارش‌های موردنظر به تولیدکننده می‌باشد.

$$DPM(t) = max(0, HFD(t) + GIM(t)), \quad (۱۷)$$

که در آن *DPM(t)* تولید موردنظر تولیدکننده و *GIM(t)* شکاف موجودی تولیدکننده می‌باشد.

$$WIP(t) = WIP(t-1) + PRR(t) - PCT(t), \quad (۱۸)$$

که در آن *WIP(t)* کار در جریان ساخت، *PRR(t)* نرخ آزادسازی تولید و *PCT(t)* نرخ تکمیل تولید می‌باشد.

$$PCT(t) = PRR(t) \times PY, \quad (۱۹)$$

که در آن *PCT(t)* نرخ تکمیل تولید و *PY* بازده بسته‌بندی می‌باشد.

$$MI(t) = MI(t-1) + PCT(t) - DSRD(t), \quad (۲۰)$$

که در آن *MI(t)* موجودی تولیدکننده می‌باشد.

$$DIM(t) = MOPT + SSC \times HFD(t), \quad (۲۱)$$

که در آن *DIM(t)* موجودی هدف تولیدکننده می‌باشد.

مدل توسعه‌یافته صرفا برای تحلیل روندهای زمانی به‌کار نرفته است، بلکه به‌عنوان ابزاری برای آزمون پیش‌بینی سیاست‌های مدیریتی نیز مورداستفاده قرار گرفته است. در ساختار زنجیره تامین دارویی، تاخیر و عدم شفافیت اطلاعات به‌عنوان نقطه بحرانی اصلی شناسایی شد که منجر به نوسانات سفارش و کاهش قابلیت اطمینان می‌شود. ازاین‌رو، سیاست حذف این تاخیر از طریق فناوری بلاک‌چین به‌عنوان مداخله‌ای مدیریتی تعریف و اثر آن بر شاخص‌های کلیدی عملکرد در بخش نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۴- آزمایش‌های عددی و تحلیل حساسیت

۴-۱- تنظیمات شبیه‌سازی

به‌منظور ارزیابی رفتار پویای مدل پیشنهادی زنجیره تامین دارویی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار *VENSIM* انجام شد. شبیه‌سازی در یک افق زمانی ۲۵۰ روزه اجرا گردید تا امکان مشاهده واکنش‌های سیستم تحت شرایط مختلف تقاضا و مفروضات ساختاری فراهم شود. مدل شامل سه عامل اصلی تولیدکننده، توزیع‌کننده و بیمارستان است و با مقادیر پایه‌ی کالیبره‌شده برای موجودی، بک‌لاگ و تقاضا آغاز گردید. این مقادیر در **جدول ۳** ارایه شده‌اند و بازتابی از مقادیر واقع‌بینانه مشاهده‌شده در زنجیره‌های تامین حوزه سلامت بوده و با رویه‌های مدلسازی پیشین هم‌راستا هستند.

جدول ۳- مقادیر اولیه و پارامترهای مبنا در شبیه‌سازی.
Table 3- Initial values and base parameters in the simulation.

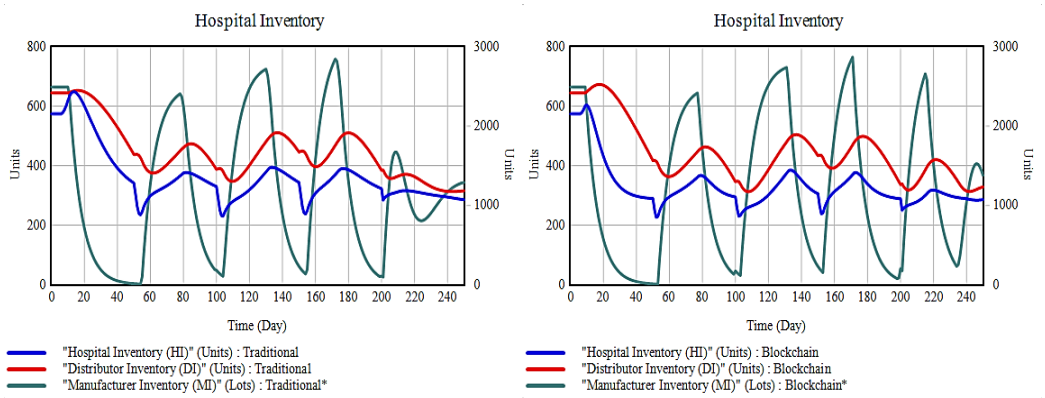
پارامتر	مقدار	نماد
موجودی اولیه بیمارستان	40	HI(0)
موجودی اولیه توزیع‌کننده	40	DI(0)
موجودی اولیه تولیدکننده	100	MI(0)
اندازه بسته واحد	400	UPS
بازده مؤلفه به واحد	0.95	UCY
حداقل زمان پردازش سفارش	7.5	PIT
تاخیر تحویل هدف	7.5	TDD
زمان تنظیم موجودی بیمارستان	15	TAHI
زمان درک تقاضای جاری	7.5	TPPD

به‌منظور بررسی اثر ساختارهای اطلاعاتی، دو سناریو تعریف شد: ۱- سناریوی سنتی که در آن عامل‌های بالادستی صرفا به داده‌های تاریخی و هموارشده تقاضا متکی‌اند و ۲- سناریوی مبتنی بر بلاک‌چین که در آن‌همه عامل‌ها به داده‌های برخط بیمارستان دسترسی دارند. برای بازنمایی نوسانات تصادفی تقاضا نیز از ورودی پالس-قطاری استفاده شد.

۲-۴- مقایسه سناریوهای سنتی و مبتنی بر بلاک‌چین

تحلیل و مقایسه عملکرد دو سناریوی شبیه‌سازی‌شده سنتی (اطلاعات متمرکز و تاخیری) و مبتنی بر بلاک‌چین (اطلاعات غیرمتمرکز و بلادرنگ) نشان‌دهنده تفاوت‌های ساختاری و آماری معنادار در شاخص‌های کلیدی عملکرد زنجیره تامین دارویی بیمارستانی است. نتایج مدل پویایی سیستم نشان می‌دهد که حذف تاخیر اطلاعات و افزایش شفافیت ناشی از بلاک‌چین، پویایی‌های داخلی سیستم را بهبود می‌بخشد. در سناریوی سنتی، نبود دیدپذیری مستقیم به تقاضا باعث تاخیر در واکنش و بروز اثر شلاقی می‌شود؛ پیامدی که به نوسانات شدید موجودی و عقب‌ماندگی سفارش در سطوح بالادست می‌انجامد. در مقابل، در سناریوی مبتنی بر بلاک‌چین، دسترسی برخط به داده‌ها موجب کاهش تاخیر اطلاعاتی، هم‌راستایی بهتر تصمیم‌ها و کاهش عقب‌ماندگی سفارش می‌گردد. برای مقایسه، سه شاخص کلیدی بررسی شد: سطح موجودی بیمارستان، عقب‌ماندگی سفارش بیمارستان و میانگین زمان تحویل.

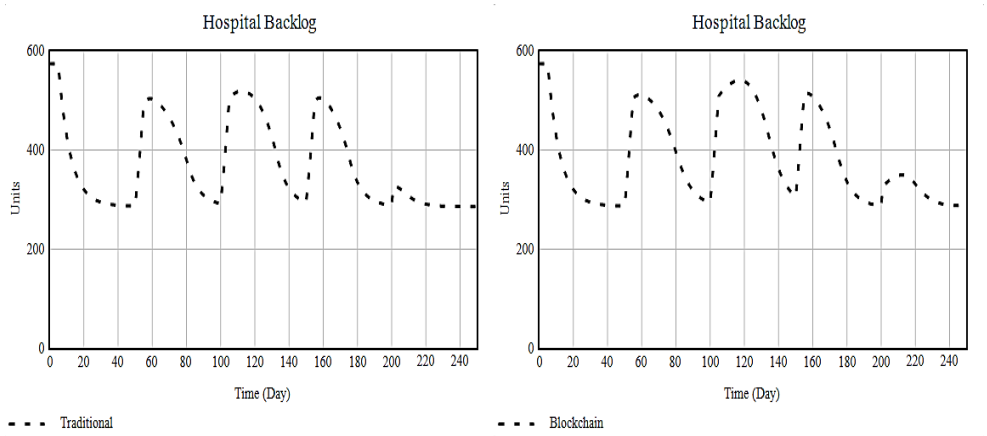
برای بررسی دقیق پویایی سیستم، باید به رفتار در بازه‌های زمانی مختلف توجه کرد. همان‌گونه که در نمودارهای مربوط به متغیرهای کلیدی مشاهده می‌شود، در دوره اولیه شبیه‌سازی، عملکرد دو سناریو شباهت قابل‌توجهی دارد. این امر مطابق با نوآوری تحقیق است و نشان می‌دهد بهبود عملکرد نتیجه‌ای بدیهی یا آنی نیست؛ در این فاز، رفتار سیستم بیش از همه تحت *jhedv* شرایط اولیه و تاخیرهای فیزیکی ذاتی (مانند زمان حمل‌ونقل) قرار دارد و اثر تغییر ساختار اطلاعاتی کم‌رنگ است. با این‌حال، با گذشت زمان و انباشت بازخوردهای ناشی از تصمیم‌گیری دقیق‌تر، اثر بلاک‌چین نمایان می‌شود و سناریوی مبتنی بر بلاک‌چین در افق بلندمدت از سناریوی سنتی متمایز می‌گردد؛ این تمایز در کاهش پایدار زمان تحویل و کاهش نوسانات موجودی در سطوح بالادست نمود می‌یابد. برای سنجش استحکام و معناداری آماری تفاوت‌هایی که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، هر سناریو با $N = 30$ تکرار اجرا شد و بر خروجی‌های کلیدی آزمون t دو نمونه مستقل اعمال گردید. نتایج این تحلیل آماری معناداری بهبودهای مشاهده‌شده را تایید می‌کند. در ادامه، جزئیات عملکرد هر شاخص به‌صورت گرافیکی و آماری در دو سناریو، به تفکیک بررسی و تحلیل می‌شود.
سطح موجودی: همان‌طور که در **شکل ۱۰** دیده می‌شود، موجودی در سناریوی سنتی با نوسانات شدید همراه است، به‌ویژه در سطح تولیدکننده. در حالت مبتنی بر بلاک‌چین، موجودی هر سه سطح پایدارتر و با دامنه نوسان کمتر است.



شکل ۱۰- سطوح موجودی: مقایسه روش سنتی و بلاک‌چین.

Figure 10- Inventory levels: comparison of traditional and blockchain methods.

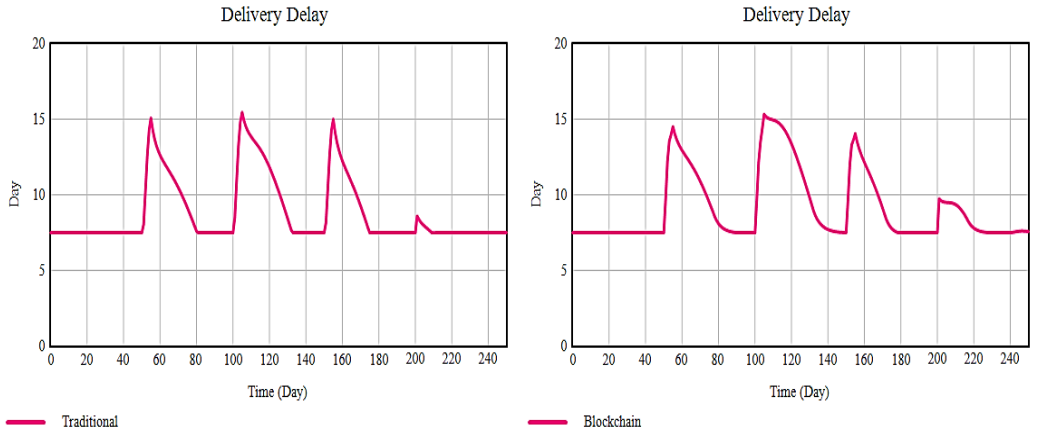
عقب‌ماندگی سفارش بیمارستان: نتایج **شکل ۱۱** نشان می‌دهد که در سناریوی سنتی، تعدیل عقب‌ماندگی با تاخیر انجام می‌شود، درحالی‌که در حالت مبتنی بر بلاک‌چین هم‌ترازی سریع‌تر میان موجودی و تقاضا حاصل می‌گردد. گرچه واکنش سریع‌تر در برخی موارد اوج عقب‌ماندگی را بالاتر می‌برد، اما درمجموع، سیستم پایدارتر عمل می‌کند.



شکل ۱۱- پویایی عقب‌ماندگی سفارش بیمارستان: مقایسه روش سنتی و بلاک‌چین.

Figure 11- Hospital order backlog dynamics: comparison of traditional and blockchain methods.

زمان تحویل: همان‌گونه که در **شکل ۱۲** نشان داده شده است، زمان تحویل در حالت سنتی گاهی به ۱۵–۱۶ روز می‌رسد، درحالی‌که در حالت مبتنی بر بلاک‌چین سریع‌تر به سطح پایه (۸ روز) بازمی‌گردد و نوسانات کمتری دارد. این موضوع بیانگر افزایش چابکی زنجیره درنتیجه اشتراک‌گذاری داده‌های غیرمتمرکز است.



شکل ۱۲- میانگین تاخیر تحویل در میان عامل‌ها: مقایسه روش سنتی و بلاک‌چین.

Figure 12- Average delivery delay across agents: comparison of traditional and blockchain methods.

در بازه‌ی زمانی کمتر از ۲۰۰ روز، رفتار دو سناریوی سنتی و بلاک‌چینی تقریبا مشابه است. این شباهت ناشی از شرایط اولیه‌ی یکسان (موجودی اولیه، نرخ سفارش پایه و سطح تقاضا) و غلبه پویایی‌های فیزیکی زنجیره مانند زمان تولید، حمل‌ونقل و بازپرسازی موجودی‌ها در کوتاه‌مدت است. در این مرحله، ساختار اطلاعاتی سیستم هنوز اثر قابل‌توجهی بر رفتار کلان ندارد. با گذشت زمان و انباشت بازخوردها، *jhedv* پویایی‌های اطلاعاتی نمایان می‌شود و تفاوت میان دو مدل تدریجا افزایش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که سیاست بلاک‌چین اثر آنی ندارد، بلکه به‌صورت تدریجی و از طریق بازخوردهای تجمعی در طول زمان بر عملکرد زنجیره تامین اثرگذار است.

آزمون آماری t

برای تایید استحکام و معناداری آماری بهبودهای مشاهده‌شده، آزمون t دو نمونه مستقل بر روی خروجی‌های کلیدی مدل انجام شد. جهت سنجش معناداری تفاوت میان دو سناریو، هر سناریو در ۳۰ تکرار مستقل اجرا شد و از خروجی هر تکرار سه شاخص کلیدی (عقب‌ماندگی سفارش بیمارستان، میانگین موجودی بیمارستان، میانگین زمان تحویل) استخراج گردید. سپس بر توزیع بین تکراری این شاخص‌ها آزمون t دو نمونه مستقل اعمال شد تا اختلاف میانگین‌ها به‌صورت آماری ارزیابی شود. نتایج این تحلیل در **جدول ۴** ارایه شده است و در ادامه، جزئیات عملکرد هر شاخص بررسی می‌شود.

جدول ۴- نتایج آزمون t (مقایسه عملکردی سناریوها).

Table 4- T-test results (performance comparison of scenarios).

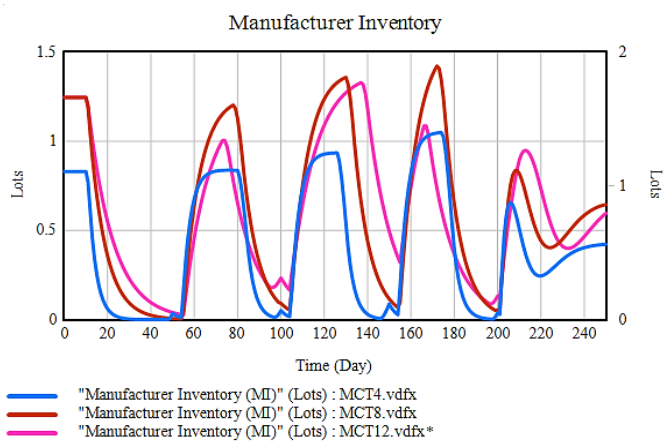
شاخص عملکرد کلیدی (KPI)	سناریو	میانگین	انحراف معیار (S)	آماره t	مقدار p	نتیجه آماری
میانگین عقب‌ماندگی سفارش بیمارستان (واحد)	سنتی	380	79	−3.31	0.002	تفاوت معنادار
	بلاک‌چین	320	60			
میانگین موجودی بیمارستان (واحد)	سنتی	342	79	−0.31	0.655	تفاوت نامعنادار
	بلاک‌چین	338	62			
میانگین زمان تحویل (روز)	سنتی	9.3	1.8	−3.18	0.002	تفاوت معنادار
	بلاک‌چین	7.9	1.6			

نتایج آزمون t دو نمونه مستقل بر خروجی‌های ۳۰ اجرای مدل نشان می‌دهد سناریوی مبتنی بر بلاک‌چین از نظر آماری بهبود معناداری در شاخص‌های پاسخ‌گویی ایجاد می‌کند. میانگین عقب‌ماندگی سفارش بیمارستان حدود ۱۵٫۸% و میانگین زمان تحویل حدود ۱۵٫۱% کاهش یافته است (برای هر دو شاخص $p=0.002$). در مقابل، تفاوت میانگین موجودی بیمارستان از نظر آماری معنادار نیست ($p=0.655$)، هرچند کاهش پراکندگی شاخص‌ها مشاهده می‌شود، انحراف معیار موجودی تقریبا ۲۱٫۵% و انحراف معیار زمان تحویل حدود ۱۰% کاهش یافته است. تبیین این الگو به سازوکار اطلاعاتی بازمی‌گردد. در سناریوی بلاک‌چین، دسترسی هم‌زمان به وضعیت تقاضا و موجودی برای تمام بخش‌های زنجیره تامین، تاخیر اطلاعاتی و خطای برآورد را کاهش می‌دهد و تصمیم‌های سفارش‌دهی را همسو می‌سازد. بدین ترتیب دامنه واکنش‌های بیش‌ازحد کاسته می‌شود، نوسانات درونی سیستم کنترل می‌گردد و پیامد آن کاهش پایدار عقب‌ماندگی و کوتاه‌تر شدن زمان تحویل است؛ حتی اگر سطح میانگین موجودی تغییر معناداری نداشته باشد. این نتایج با روندهای ارایه‌شده در نمودارها هم‌راستا است و نشان می‌دهد ارتقای قابلیت اطمینان، بیش از هر چیز از مسیر کاهش نوسان و بهبود هماهنگی حاصل شده است. نمودارهای زمانی سه شاخص همین روند را تایید و تصویر می‌کنند.

۳-۴- تحلیل حساسیت

برای بررسی اثر پارامترهای کلیدی، سه آزمایش حساسیت انجام شد که در زیر توضیح داده شد.

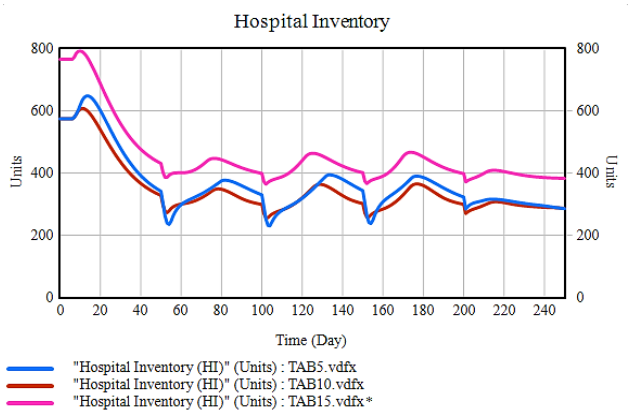
چرخه تولید (*MCT*): همان‌طور که در **شکل ۱۳** دیده می‌شود، کاهش چرخه تولید واکنش‌پذیری را افزایش می‌دهد اما نوسانات موجودی را تشدید می‌کند، درحالی‌که چرخه‌های طولانی‌تر ثبات بیشتری ایجاد می‌کنند ولی ریسک کمبود را بالا می‌برند.



شکل ۱۳- اثر زمان چرخه تولید (MCT) بر پویایی موجودی تولیدکننده.

Figure 13- The effect of manufacturing cycle time (MCT) on the dynamics of manufacturer inventory.

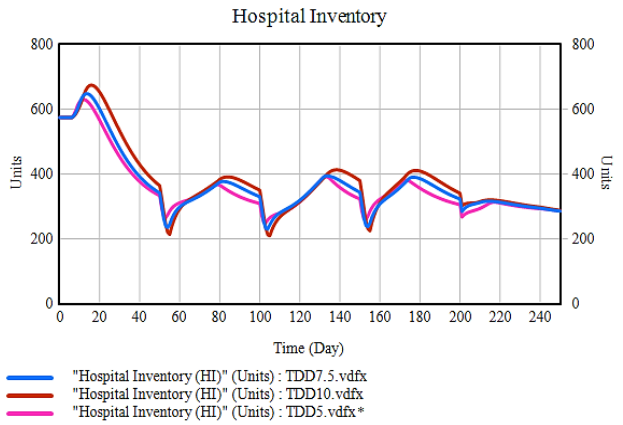
زمان تحویل هدف (*TDD*): **شکل ۱۴** نشان می‌دهد که کاهش زمان تحویل هدف موجب کاهش میانگین موجودی اما افزایش ریسک کمبود می‌شود، درحالی‌که مقادیر بالاتر ثبات بیشتری در موجودی ایجاد می‌کنند اما هزینه نگهداری را بالا می‌برند.



شکل ۱۴- jhedv تاخیر در ادراک تقاضا بر رفتار موجودی بیمارستان.

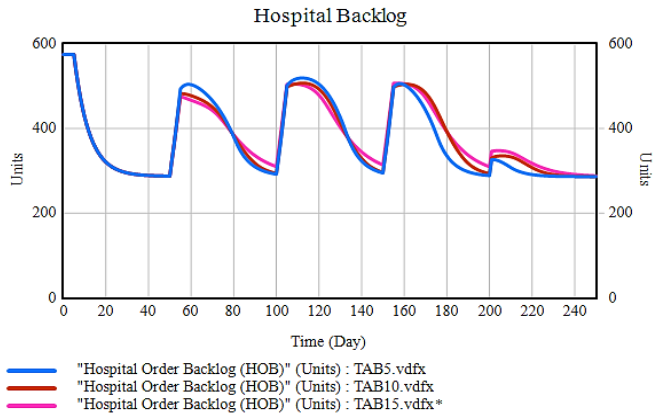
Figure 14- The impact of delay in demand perception on hospital inventory behavior.

زمان تعدیل بکلاگ[1]: مطابق **شکل‌های ۱۵** و **۱۶**، مقادیر پایین‌تر زمان تعدیل بکلاگ پاسخ‌گویی سریع‌تر اما نوسان بیشتر ایجاد می‌کنند؛ در مقابل، مقادیر بالاتر موجب ثبات بیشتر ولی واکنش کندتر می‌شوند.



شکل ۱۵- اثر زمان تعدیل موجودی هدف بر موجودی بیمارستان.

Figure 15- The effect of target inventory adjustment time on hospital inventory.



شکل ۱۶- اثر زمان تعدیل موجودی هدف بر عقب‌ماندگی سفارش بیمارستان.

Figure 16- Effect of target inventory adjustment time on hospital order backlog.

[1] Time to Adjust Backlog (TAB)

جمع‌بندی یافته‌های تحلیل حساسیت

نتایج حساسیت نشان می‌دهد که پارامترهای کلیدی رفتار سیستم را به‌شدت تحت *jhedv* قرار می‌دهند. چرخه تولید کوتاه‌تر و زمان تحویل هدف کمتر، گرچه موجب افزایش چابکی و پاسخ‌گویی می‌شوند، اما نوسان موجودی و ریسک کمبود را تشدید می‌کنند. در مقابل، چرخه‌های طولانی‌تر و زمان‌های بالاتر برای تعدیل بکلاگ یا تحویل، رفتار نرم‌تر و باثبات‌تری ایجاد می‌کنند، هرچند چابکی سیستم کاهش می‌یابد. این یافته‌ها بر لزوم تنظیم دقیق پارامترها برای دستیابی به تعادل میان پایداری عملیاتی و سطح خدمت تاکید دارند.

برای اعتبارسنجی نتایج مدل، علاوه بر تحلیل تغییر پارامترها، رفتار خروجی مدل با یافته‌های پژوهش‌های مشابه در ادبیات تخصصی مقایسه گردید. بررسی پژوهش‌های مرجع ازجمله [1]، [5] نشان می‌دهد که در زنجیره‌های تامین دارویی، حذف تاخیر اطلاعات و افزایش شفافیت منجر به کاهش نوسانات سفارش، بهبود سطح موجودی و کوتاه‌تر شدن زمان تحویل می‌شود. نتایج مدل حاضر نیز روندی مشابه را نشان داد، به‌گونه‌ای که در سناریوی مبتنی بر بلاک‌چین، نوسانات سفارش کاهش یافته و میانگین زمان تحویل به سطح پایین‌تری رسیده است. این هم‌سویی رفتاری بین نتایج شبیه‌سازی حاضر و یافته‌های پژوهش‌های معتبر پیشین، اعتبار رفتاری مدل در مقایسه با ادبیات پژوهش را تایید می‌کند و نشان می‌دهد ساختار علی و پارامترهای مدل به‌درستی روابط پویای زنجیره تامین را بازنمایی کرده‌اند.

۴-۴- بینش‌های مدیریتی و پیامدهای عملی

یافته‌های این پژوهش چندین نکته مدیریتی مهم را آشکار می‌کند. نخست، مقایسه سناریوها نشان داد که اشتراک‌گذاری برخط داده‌ها در سطح زنجیره تامین موجب کاهش تاخیر در تحویل، ثبات بیشتر سطح موجودی و کاهش انباشت سفارش‌های معوق می‌شود. این نتیجه بیانگر آن است که فناوری بلاک‌چین می‌تواند به‌عنوان ابزاری موثر برای ارتقای چابکی و هماهنگی در شبکه‌های چندلایه زنجیره تامین دارویی ایفای نقش کند. دوم، تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر در پارامترهایی چون چرخه تولید، زمان تحویل هدف و زمان تعدیل بکلاگ اثر مستقیم بر عملکرد دارد. برای مثال، کوتاه شدن زمان تعدیل بکلاگ نه‌تنها موجب ثبات موجودی بیمارستان شد، بلکه از انباشت سفارش‌های معوق در سطح توزیع‌کننده و تولیدکننده نیز جلوگیری کرد؛ بنابراین، تمرکز مدیریتی باید علاوه بر به‌کارگیری فناوری، بر انعطاف‌پذیری عملیاتی و سازوکارهای پاسخ‌گویی نیز قرار گیرد. سوم، نتایج تاکید می‌کنند که بهبود در یک بخش از زنجیره می‌تواند پیامدهایی پیش‌بینی‌نشده در سایر بخش‌ها داشته باشد. ازاین‌رو، مدیران باید سیاست‌های پیشنهادی را در مقیاس کل سیستم شبیه‌سازی و ارزیابی کنند تا از گرفتار شدن در بهینه‌سازی محلی پرهیز شود. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی اهمیت برنامه‌ریزی مبتنی بر تاب‌آوری را برجسته می‌سازد. در محیط‌های ناپایدار، مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم می‌توانند ابزاری کارآمد برای بررسی سناریوهای مختلف، شناسایی گلوگاه‌ها و طراحی سیاست‌های پایدار فراهم آورند. بدین ترتیب، ترکیب سرمایه‌گذاری فناورانه با تعدیل سیاست‌های عملیاتی، راهبردی کلیدی برای دستیابی به زنجیره‌های دارویی بیمارستانی تاب‌آور و کارآمد خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با توسعه یک مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای زنجیره تامین دارویی بیمارستانی، دو سناریوی سنتی و مبتنی بر بلاک‌چین را مقایسه کرد. مدل، جریان محصولات را در یک شبکه سه‌سطحی شامل بیمارستان، توزیع‌کننده و تولیدکننده شبیه‌سازی نمود و نشان داد که دسترسی بلادرنگ به داده‌های تقاضا چه *jhedv* بر پویایی‌های سیستم دارد. در برخی مقاطع زمانی، موجودی تولیدکننده در مدل سنتی ممکن است بالاتر از مدل بلاک‌چینی باشد، اما این امر به دلیل پدیده شلاق گاوی[1] و نوسانات شدید در سفارش‌ها رخ می‌دهد. درواقع، سطح بالاتر موجودی در مدل سنتی الزاما نشانه عملکرد بهتر نیست، بلکه حاصل رفتار واکنشی و ناپایدار سیستم در مواجهه با اطلاعات تاخیری است. در مقابل، در مدل مبتنی بر بلاک‌چین، به دلیل اشتراک‌گذاری بلادرنگ داده‌ها، تصمیم‌گیری‌ها هماهنگ‌تر انجام می‌شود و سفارش‌ها با ثبات بیشتری شکل می‌گیرند؛ بنابراین،

[1] Bullwhip effect

نتیجه سیاست بلاک‌چین نه کاهش میانگین موجودی، بلکه کاهش واریانس و افزایش پایداری موجودی‌هاست، ویژگی‌ای که مستقیما به ارتقای قابلیت اطمینان زنجیره منجر می‌شود. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که در سناریوی مبتنی بر بلاک‌چین، شاخص‌های کلیدی عملکرد مانند زمان تحویل، ثبات موجودی و سطح عقب‌ماندگی سفارش به‌طور چشمگیری بهبود می‌یابد. دلیل اصلی این بهبود، اشتراک‌گذاری هم‌زمان داده‌ها در کل زنجیره است که شفافیت، هماهنگی و واکنش‌پذیری را ارتقا می‌دهد. همچنین، مقایسه با معماری سنتی نشان داد که مدل غیرمتمرکز موجودی بالادستی را با الگوهای واقعی مصرف هماهنگ‌تر کرده و امکان تنظیم پیش‌دستانه ظرفیت تولید و تحویل را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، تحلیل حساسیت بر سه پارامتر عملیاتی کلیدی، چرخه تولید، زمان هدف تحویل و زمان تعدیل بکلاگ نشان داد که رفتار سیستم به‌شدت تحت *jhedv* این متغیرها قرار دارد. کاهش چرخه تولید و زمان تحویل موجب واکنش‌پذیری سریع‌تر و کاهش تاخیرها شد، درحالی‌که زمان‌های طولانی‌تر برای تعدیل بکلاگ ثبات بیشتری در موجودی ایجاد کردند. این نتایج اهمیت راهبردهای تصمیم‌گیری تطبیقی را برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که موفقیت چارچوب‌های غیرمتمرکز تنها به دسترسی به داده‌ها وابسته نیست، بلکه به توانایی سطوح مختلف زنجیره در واکنش هماهنگ و سریع نیز بستگی دارد. از منظر مدیریت کیفیت، نتایج این پژوهش همسو با ادبیات موجود است که بر نقش فناوری‌های نوین مانند بلاک‌چین در کاهش تقلب، تقویت اعتماد و بهبود قابلیت اتکا تاکید دارند. استقرار تدریجی این فناوری همراه با آموزش ذی‌نفعان، استانداردسازی و پیاده‌سازی آزمایشی می‌تواند ریسک‌های عملیاتی را کاهش داده و کیفیت خدمت‌رسانی بیمارستان‌ها را ارتقا بخشد.

باوجوداین، پژوهش حاضر محدودیت‌هایی دارد. استفاده از زمان‌های پردازش قطعی، فرض ساختار ثابت شبکه و نادیده گرفتن ابعاد اقتصادی و مقرراتی ازجمله عواملی هستند که می‌توانند تعمیم‌پذیری نتایج را محدود کنند. هزینه‌های بالای ادغام، چالش‌های استانداردسازی داده و الزامات قانونی نیز در عمل می‌توانند موانع مهمی باشند که در این مطالعه بررسی نشده‌اند. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، پژوهش‌های آینده می‌توانند اختلالات تصادفی، جریان‌های ناهمگن محصول و توپولوژی‌های پویا را در مدل لحاظ کنند. همچنین، ترکیب رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها با مدلسازی عامل‌محور می‌تواند درک عمیق‌تری از رفتارهای تعاملی و تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت فراهم آورد. چنین توسعه‌هایی می‌تواند مسیر را برای سیاست‌گذاران و مدیران هموار سازد تا از ظرفیت فناوری‌های صنعت ۴/۰، به‌ویژه بلاک‌چین، در ارتقای کارایی، هماهنگی و تاب‌آوری زنجیره‌های تامین دارویی بیمارستانی بهره‌برداری کنند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از همراهی و حمایت تمامی افرادی که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در تکمیل این پژوهش نقش داشتند، قدردانی می‌کنند.

منابع مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی یا کمک‌هزینه تحقیقاتی از نهادها یا سازمان‌های تامین‌کننده مالی دریافت نکرده است.

تعارض با منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافع در این پژوهش وجود ندارد.

منابع

[1] Kochan, C. G., Nowicki, D. R., Sauser, B., & Randall, W. S. (2018). Impact of cloud-based information sharing on hospital supply chain performance: A system dynamics framework. *International journal of production economics*, *195*, 168–185. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.008

[2] Vanbrabant, L., Verdonck, L., Mertens, S., & Caris, A. (2023). Improving hospital material supply chain performance by integrating decision problems: A literature review and future research directions. *Computers & industrial engineering*, *180*, 109235. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109235

[3] Mesgari, E., & Mehrabi bahar, A. (2024). Methods of establishing quality management in the hospital and medical center system and examining its impact on processes. *22nd international conference on research in management, economics and development*, Tbilisi, Georgia. Civilica. (**In Persin**). https://civilica.com/doc/2136206/

[4] Lim, M. K., Li, Y., Wang, C., & Tseng, M. L. (2021). A literature review of blockchain technology applications in supply chains: A comprehensive analysis of themes, methodologies and industries. *Computers & industrial engineering*, *154*, 107133. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107133

[5] Katsoras, E., & Georgiadis, P. (2022). An integrated system dynamics model for closed loop supply chains under disaster effects: The case of COVID-19. *International journal of production economics*, *253*, 108593. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108593
[6] Azzi, R., Chamoun, R. K., & Sokhn, M. (2019). The power of a blockchain-based supply chain. *Computers & industrial engineering*, *135*, 582–592. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.06.042
[7] Reda, M., Kanga, D. B., Fatima, T., & Azouazi, M. (2020). Blockchain in health supply chain management: State of art challenges and opportunities. *Procedia computer science*, *175*, 706–709. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.07.104
[8] Liu, X., Barenji, A. V., Li, Z., Montreuil, B., & Huang, G. Q. (2021). Blockchain-based smart tracking and tracing platform for drug supply chain. *Computers & industrial engineering*, *161*, 107669. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107669
[9] Ding, B. (2018). Pharma Industry 4.0: Literature review and research opportunities in sustainable pharmaceutical supply chains. *Process safety and environmental protection*, *119*, 115–130. https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.031
[10] Sun, Y., Wang, F., & Zhuo, X. (2024). Blockchain adoption of pharmaceutical firms in a competitive market: Pricing, drug traceability and consumer awareness. *International journal of production economics*, *276*, 109356. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109356
[11] Bahrami, F., Zarei, A., Shafiei Nikabadi, M., & Farokhizadeh, F. (2024). Examining the performance of the drug supply and distribution chain using blockchain technology based on the dynamic system approach. *Modern research in decision making*, *9*(3), 34-70. (In Persian). https://journal.saim.ir/article_721094.html?lang=en
[12] Padma, A., & Ramaiah, M. (2024). Blockchain based solution for secure information sharing in pharma supply chain management. *Heliyon*, *10*(22), e40273. https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)16304-9
[13] Risso, L. A., Ganga, G. M. D., de Santa-Eulalia, L. A., Godinho Filho, M., Chikhi, T., Mosconi, E., & Zhang, K. (2024). A framework for modeling and simulating blockchain-based supply chain traceability systems. *International journal of production economics*, *278*, 109408. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109408
[14] Dutta, P., Choi, T. M., Somani, S., & Butala, R. (2020). Blockchain technology in supply chain operations: Applications, challenges and research opportunities. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *142*, 102067. https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102067
[15] Lohmer, J., Bugert, N., & Lasch, R. (2020). Analysis of resilience strategies and ripple effect in blockchain-coordinated supply chains: An agent-based simulation study. *International journal of production economics*, *228*, 107882. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107882
[16] Seifi, N., Ghoodjani, E., Majd, S. S., Maleki, A., & Khamoushi, S. (2025). Evaluation and prioritization of artificial intelligence integrated block chain factors in healthcare supply chain: A hybrid decision making approach. *Computer and decision making: an international journal*, *2*, 374–405. https://doi.org/10.59543/comdem.v2i.11029
[17] Abbas, K., Afaq, M., Ahmed Khan, T., & Song, W. C. (2020). A blockchain and machine learning-based drug supply chain management and recommendation system for smart pharmaceutical industry. *Electronics*, *9*(5), 852. https://doi.org/10.3390/electronics9050852
[18] Niu, B., Dong, J., & Liu, Y. (2021). Incentive alignment for blockchain adoption in medicine supply chains. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *152*, 102276. https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102276
[19] Esmaeilian, B., Sarkis, J., Lewis, K., & Behdad, S. (2020). Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. *Resources, conservation and recycling*, *163*, 105064. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105064
[20] Weraikat, D., Zanjani, M. K., & Lehoux, N. (2019). Improving sustainability in a two-level pharmaceutical supply chain through Vendor-Managed Inventory system. *Operations research for health care*, *21*, 44–55. https://doi.org/10.1016/j.orhc.2019.04.004
[21] Moons, K., Waeyenbergh, G., & Pintelon, L. (2019). Measuring the logistics performance of internal hospital supply chains--a literature study. *Omega*, *82*, 205–217. https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.01.007
[22] Tucker, E. L., & Daskin, M. S. (2022). Pharmaceutical supply chain reliability and effects on drug shortages. *Computers & industrial engineering*, *169*, 108258. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108258
[23] Abideen, A., & Mohamad, F. B. (2021). Improving the performance of a Malaysian pharmaceutical warehouse supply chain by integrating value stream mapping and discrete event simulation. *Journal of modelling in management*, *16*(1), 70–102. https://doi.org/10.1108/JM2-07-2019-0159
[24] Elarbi, M., Ayadi, O., Masmoudi, M., & Masmoudi, F. (2021, January). Drug-inventory-management-model for a multi-echelon pharmaceutical supply-chain: Case study of the Tunisian pharmaceutical supply-chain. In *Supply Chain Forum: An International Journal* (Vol. 22, No. 1, pp. 44-56). Taylor & Francis. https://doi.org/10.1080/16258312.2020.1824532
[25] Narayana, S. A., Pati, R. K., & Padhi, S. S. (2019). Market dynamics and reverse logistics for sustainability in the Indian Pharmaceuticals industry. *Journal of cleaner production*, *208*, 968–987. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.171
[26] Iacocca, K., Mahar, S., & Wright, P. D. (2022). Strategic horizontal integration for drug cost reduction in the pharmaceutical supply chain. *Omega*, *108*, 102589. https://doi.org/10.1016/j.omega.2021.102589
[27] Sabouhi, F., Pishvaee, M. S., & Jabalameli, M. S. (2018). Resilient supply chain design under operational and disruption risks considering quantity discount: A case study of pharmaceutical supply chain. *Computers & industrial engineering*, *126*, 657–672. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.001
[28] Franco, C. (2020). A simulation model to evaluate pharmaceutical supply chain costs in hospitals: the case of a Colombian hospital. *DARU journal of pharmaceutical sciences*, *28*(1), 1–12. https://doi.org/10.1007/s40199-018-0218-0
[29] Saha, E., & Rathore, P. (2024). A smart inventory management system with medication demand dependencies in a hospital supply chain: A multi-agent reinforcement learning approach. *Computers & industrial engineering*, *191*, 110165. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110165
[30] Nami, N., Pishchulov, G., & Neto, J. Q. F. (2025). Circular economy application in pharmaceutical supply chains in the UK: a holistic evolutionary game approach. *European journal of operational research*, *326*(3), 451–466. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2025.05.009
[31] Kumar, D., Soni, G., Mangla, S. K., Kazancoglu, Y., & Rathore, A. P. S. (2025). A machine learning-based hybrid approach for maximizing supply chain reliability in a pharmaceutical supply chain. *Computers & industrial engineering*, *200*, 110834. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110834
[32] Liu, X., Shah, R., Shandilya, A., Shah, M., & Pandya, A. (2024). A systematic study on integrating blockchain in healthcare for electronic health record management and tracking medical supplies. *Journal of cleaner production*, *447*, 141371. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141371
[33] Iranmanesh, M., Maroufkhani, P., Asadi, S., Ghobakhloo, M., Dwivedi, Y. K., & Tseng, M. L. (2023). Effects of supply chain transparency, alignment, adaptability, and agility on blockchain adoption in supply chain among SMEs. *Computers \& industrial engineering*, *176*, 108931. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108931