Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2423-6950
Vol. 13, Issue 1, No. 28, Spring 2022
http://dx.doi.org/10.22108/jpom.2022.129445.1385

(Research Paper)

A model for the optimization of information process performance in the IoT-based virtual supply chain

Hanieh Shambayati
Dept. of Industrial Management, Faculty of Economic, Management and Administrative Sciences, Semnan University, Iran, h.shambayati@semnan.ac.ir
Mohsen Shafiei Nikabadi *
Dept. of Industrial Management, Faculty of Economic, Management and Administrative Sciences, Semnan University, Iran, shafiei@semnan.ac.ir
Seyed Mohammad Ali Khatami Firouzabadi
Dept. of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting ,Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran, a.khatami@atu.ac.ir
Mohammad Rahmanimanesh
Dept. of Computer Engineering, Electrical & Computer Engineering Faculty, Semnan University, Iran, rahmanimanesh@semnan.ac.ir
Sara Saberi
Foisie School of Business, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA, ssaberi@wpi.edu

Purpose: Today, the manufacturing industry, with the expansion of the physical constraints of trade worldwide, has adopted modern information technologies to optimize the business process and achieve integration with geographically dispersed supply chain partners. Traditional supply chain models focus on optimizing physical flows. However, it is equally important to ensure that physical units can process appropriate information. This paper aims to propose a model for the optimization of information process performance in the IoT-based virtual supply chain.

Design/methodology/approach: In this study, information processing performance in the closed-loop virtual supply chain has been optimized to maximize profit and information processing speed by considering costs of virtual, information security, and energy consumption. The final programming model has been optimized using meta-heuristic algorithms, the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), and the Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA-II).

* Corresponding author
2423-6950 / © 2022
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Findings – The results indicated that there is an inverse relationship between virtual supply chain profit and information processing speed (delay). The results of model solving using NSGA-II and SPEA-II algorithms underlined the virtual supply chain profit of 9.93×10^6 and 4.23×10^6, and the data processing speed of 337.48 and 94.07, respectively. Thus, the NSGA-II algorithm contributes more to the supply chain profitability.
Research limitations/implications - The proposed model can be used in manufacturing industries equipped with IoT. Unavailability of practical examples and insufficient data are the two main limitations of the study.

Practical implications:- The proposed model improves the production process and helps managers to plan better for their supply chain management and make timely decisions by sharing information across the supply chain and being aware of the flows of products and associated parts.
Social implications - The Internet of Things in the virtual supply chain provides an opportunity to manage logistics systems and results in efficient online delivery with minimal cost. The information flow integrates all links and participants in the virtual supply chain. It enables each member to obtain the accurate information needed for logistics capability, reduces resource wastage, and improves customer satisfaction.

Originality/value: One of the innovative aspects of this research is the use of IoT in the virtual supply chain for the integration and transparency of information in the supply chain, considering the importance of information in the virtual supply chain and examining the impact of IoT usage on closed-loop virtual supply costs and target functions. In addition to considering the physical flow costs of the closed-loop, including production costs, separation costs, repair, disposal, recycling, etc., in the cost objective function, virtual flow costs included IoT usage costs and information security costs. Energy consumption was also included in the objective function. Also, due to the virtualization of the supply chain and the significant role of information, optimization of information processing speed was considered in modeling the supply chain performance, which is another innovative aspect of research.

Keywords: Virtual supply chain, Optimization, Information process performance, Security, Energy consumption, Process speed

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۳، شماره ۱، پیاپی ۲۸، بهار ۱۴۰۱
دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۷ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳ ص ۱-۲۴
http://dx.doi.org/10.22108/jpom.2022.129445.1385

(مقالهٔ پژوهشی)

مدلی جهت بهینه‌سازی عملکرد پردازش اطلاعات در زنجیرهٔ تأمین مجازی مبتنی بر اینترنت اشیا

هانیه شامبیاتی[۱]، محسن شفیعی نیک‌آبادی[*۲]، سید محمدعلی خاتمی فیروزآبادی[۳]، محمد رحمانی‌منش[۴]، سارا صابری[۵]

۱- دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اداری، دانشگاه سمنان، ایران، h.shambayati@semnan.ac.ir
۲- دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اداری، دانشگاه سمنان، ایران، shafiei@semnan.ac.ir
۳- استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران، a.khatami@atu.ac.ir
۴- استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده برق و مهندسی کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، rahmanimanesh@semnan.ac.ir
۵- استادیار دانشکده بازرگانی رابرت فوزی، موسسه پلی تکنیک وورستر، آمریکا،ssaberi@wpi.edu

چکیده: امروزه، صنعت تولید با گسترش محدودیت‌های فیزیکی تجارت در سطح جهان، فناوری‌های مدرن اطلاعاتی را به‌منظور بهینه‌سازی روند تجارت و دستیابی به ادغام با شرکای زنجیرهٔ تأمین در پیش گرفته است که ازنظر جغرافیایی پراکنده‌اند. مدل‌های سنتی زنجیرهٔ تأمین، توجه اصلی را به بهینه‌سازی جریان‌های فیزیکی می‌دهد؛ با وجود این، اطمینان از اینکه واحدهای فیزیکی قابلیت پردازش اطلاعات مناسب را دارد نیز به همان اندازه مهم است. به این منظور در این پژوهش، بهینه‌سازی عملکرد پردازش اطلاعات در زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته، با هدف حداکثرسازی سود و سرعت پردازش اطلاعات، با در نظر گرفتن هزینه‌های مجازی، امنیت اطلاعات و مصرف انرژی بررسی شده است. مدل برنامه‌ریزی خطی نهایی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نسخهٔ دوم الگوریتم ژنتیک، با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و نسخهٔ دوم، مبتنی بر قوت پارتو (SPEA-II) بهینه‌سازی شده است. نتایج حل مدل با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II، سود زنجیرهٔ تأمین مجازی را به‌ترتیب $۹/۹۳\times۱۰^{۶}$ و $۴/۲۳\times۱۰^{۶}$ و سرعت پردازش اطلاعات را به‌ترتیب ۳۳۷/۴۸ و ۹۴/۰۷ واحد نشان داد. به این ترتیب، الگوریتمNSGA-II در سودسازی زنجیرهٔ تأمین عملکرد بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: زنجیرهٔ تأمین مجازی، بهینه‌سازی، عملکرد پردازش اطلاعات، امنیت، مصرف انرژی، سرعت پردازش

* نویسنده مسئول

2423-6950 / © 2022
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

۱- مقدمه

افزایش رقابت جهانی، سازمان‌ها را به درک این موضوع مجبور کرده است که برای بقا، باید زنجیرهٔ تأمین[۱] خود را بهتر مدیریت کنند (اسمیت و دیلون[۲]، ۲۰۱۹). مدیریت زنجیرهٔ تأمین، اسکلت اساسی هر صنعت است (دوتا[۳] و همکاران، ۲۰۲۰) و به صنایع تولیدی برای ایجاد یک برنامهٔ کم‌هزینه خدمت می‌کند که بهره‌وری و موفقیت شرکت ها را تضمین می‌کند (بهونیا[۴] و همکاران، ۲۰۲۱). سیستم‌های زنجیرهٔ تأمین سنتی، توانایی برآورده‌کردن نیازها و تقاضاهای رو به رشد آینده را ندارد (دوتا و همکاران، ۲۰۲۰). جاری‌سازی روزافزون و استقرار فناوری جدید، مبتنی بر فناوری اطلاعات در صنایع مختلف و به‌ویژه تجارت الکترونیک، مجازی‌سازی زنجیره‌های تأمین را به دنبال دارد و خواستار ذهنیت جدیدی در مدیریت زمینه‌های متنوع تجاری جدید است (اسمیت و دیلون، ۲۰۱۹). در عصر ارتباطات پیشرفته و فناوری اطلاعات، همکاری مجازی و موقت در زنجیره‌های تأمین برای دریافت مزایای متقابل، مانند چابکی با به‌اشتراک‌گذاری منابع و اطلاعات، یک استراتژی مهم برای سازمان‌هایی است که به‌دنبال افزایش رقابت و بهینه‌سازی فرآیندها و استفاده از منابع‌اند (سامدانسودول[۵] و همکاران، ۲۰۱۷). زنجیرهٔ تأمین مجازی، شرکای تجاری را با تکنولوژی اطلاعات به همدیگر مرتبط می‌کند و تبادل داده‌های الکترونیکی اعم از فروش، خرید، جابه‌جایی محصولات، خدمات و پول را امکان‌پذیر می‌کند (پورحمیدی و مهاجرانی، ۱۳۸۶). زنجیره‌های تأمین مجازی به دو زیرساخت مجزای فیزیکی (برخورد با جریان و ذخیرهٔ کالا) و اطلاعات (رسیدگی به اطلاعات مرتبط با آن کالاها) تقسیم می‌شود. اشتراک به‌موقع اطلاعات در بین اعضای زنجیرهٔ تأمین، باعث کاهش اتلاف و افزایش کارایی در کل زنجیره می‌شود. اتوماسیون سرویس‌های اطلاعاتی، اعضای زنجیرهٔ تأمین را به درک، پیش‌بینی و واکنش به‌موقع نسبت‌به تغییر وضعیت بازار و تسریع در انتقال اطلاعات مهم بین اعضا تجهیز می‌کند که برای بهبود قابلیت کنترل، انعطاف‌پذیری، عملکرد و قابلیت‌های وقایع غیرعادی تأمین ضروری است (لیو و سان[۶]، ۲۰۱۱). فناوری اطلاعات، مؤثرترین حامل اطلاعات در دنیای مدرن است و تبادل سریع اطلاعات، به توسعهٔ زنجیرهٔ تأمین مجازی منجر شده است (کولینسکا[۷] و کولینسکا، ۲۰۱۹).

این پژوهش، زنجیرهٔ تأمین مجازی، ضرورت و مزایای اجرای آن را معرفی می‌کند و مجازی‌سازی را ازنظر اشیای مجازی بررسی می‌کند که مربوط‌به مفهوم اینترنت اشیا[۸] است. IoT به‌عنوان الگویی جدید ساخته شده است که از اشیای مختلف فیزیکی تشکیل می‌شود و اشیا را به‌منظور ایجاد سرویس‌های هوشمند جدید، خدمات با ارزش‌افزوده و برنامه‌های زمان واقعی به هم متصل می‌کند. اینترنت اشیا اجازه می‌دهد تا چندین فناوری با توانایی‌های مختلف، مانند سنجش، محاسبه، نظارت، مدیریت، ذخیره‌سازی و اتصال با هم ادغام شوند (پراسانت و جایاچیترا[۹]، ۲۰۲۰). IoT از بسیاری جهات، بر کل SC اثر می‌گذارد. در مرحلهٔ اول، قابلیت اطمینان SC را با فعال‌کردن دید شی و تبادل اطلاعات در زمان واقعی توسعه می‌دهد. در مرحلهٔ دوم، پاسخگویی SC را افزایش و هزینه‌های آن را کاهش می‌دهد و بهینه‌سازی زمان واقعی را برای عملکردها و فعالیت‌های فرآیند تجاری تسهیل می کند و با ردیابی منابع در زمان واقعی، مدیریت دارایی‌های SC را بهبود می‌بخشد و در آخر اینکه، چابکی SC را با سرعت‌بخشیدن به فرآیندهای جریان اطلاعات افزایش می‌دهد (دوکات و پارک[۱۰]، ۲۰۱۶).

با توجه به اینکه یکی از نگرانی‌های تولیدکنندگان، توسعه‌دهندگان، ارائه‌دهندگان خدمات و کاربران نهایی، امنیت و حفظ حریم خصوصی است و نظر به اینکه IoT نه‌تنها با مقادیر عظیمی از داده‌های حساس سروکار دارد،

این قدرت را دارد که با توانایی‌های کنترل خود بر محیط فیزیکی و مجازی نیز اثر بگذارد و باید امنیت شبکه و سیستم و محافظت از حریم شخصی کاربران، اولویت اصلی در نظر گرفته شود (پارک و شین[۱۱]، ۲۰۱۶). با استفادهٔ گسترده از اینترنت اشیا، وضعیت انرژی بیشتر اهمیت می‌یابد که سیستم برنامه‌ریزی اینترنت اشیا با آن روبه‌رو می‌شود. در برنامه‌ریزی تجهیزات تحت محیط اینترنت اشیا، نحوهٔ ایجاد یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی دقیق تجهیزات، با توجه به از دست دادن انرژی، یک کانون تحقیقاتی در صنعت است (دینگ و وو[۱۲]، ۲۰۱۹). در کارخانه‌های هوشمند در حال ظهور، IoT به‌طور گسترده‌ای برای احساس اطلاعات مختلف محیطی استفاده می‌شود و اطلاعات سنجیده‌شده برای تصمیم‌گیری به کنترل‌کننده ارسال می‌شود، سپس تصمیم براساسِ اطلاعات جمع‌آوری‌شده برای محرک‌ها ارسال می‌شود. برای بسیاری از این برنامه‌ها، کاهش تأخیر، از مهم‌ترین الزامات فنی است. واضح است که سنجش و کنترل زمان، برای کارایی و ایمنی بسیار مهم است و باید به‌موقع و به‌طور مطمئن، پردازش انجام شود. برای پشتیبانی از انتقال انرژی دوطرفه در شبکه‌های هوشمند ناهمگن، سیستم‌های ارتباطی اساسی باید ازنظر تأخیر، عملکرد بالایی داشته باشد (ما[۱۳] و همکاران، ۲۰۱۹).

۱- ۱- پیشینهٔ تحقیق

نیشی[۱۴] و همکاران (۲۰۲۰)، یک روش پیکربندی کلی برای سیستم چندعاملی زنجیرهٔ تأمین مجازی با استفاده از کاتالوگ‌های الکترونیکی سازمانی پیشنهاد کردند. وانگ[۱۵] و همکاران (۲۰۲۰) یک سیستم لجستیک هوشمند، مبتنی بر اینترنت اشیا ارائه کردند که هماهنگی پویا بین مشتریان، ربات‌های سفارش‌دهنده، فناوری ابری و افزایش رضایت مشتری را فراهم می‌کند. مدل بهینه‌سازی ریاضی وانگ و همکاران، زمان انتظار مشتری و هزینهٔ حمل‌ونقل را در فرآیند ارسال به حداقل می‌رساند. ماتسودا[۱۶] و همکاران (۲۰۲۰)، روش جدیدی را برای ساخت یک زنجیرهٔ تأمین مجازی، به‌عنوان یک سیستم چندعاملی ارائه کردند که با اتصال عوامل نرم‌افزاری ایجاد می‌شود که به‌طور خودکار، از هر مدل سازمانی مؤلفهٔ انتخابی در کاتالوگ الکترونیکی تولید می‌شود.

هه[۱۷] و همکاران (۲۰۲۰) چالش‌ها و فرصت‌های نظری و عملی ناشی از اینترنت اشیا را در زنجیرهٔ تأمین مطالعه کردند. آنها با استفاده از داده‌های کلان به‌دست‌آمده از محصولات متصل هوشمند[۱۸] (SCP)، اصل عملکرد اینترنت اشیا و پیامدهای آن را برای تجزیه‌وتحلیل داده‌های بزرگ بر عملکرد عملیاتی زنجیرهٔ تأمین، به‌ویژه با توجه به پویایی هماهنگی عملیاتی و بهینه‌سازی برای زنجیره‌های تأمین بررسی کردند. جنیفر[۱۹] (۲۰۲۰)، توسعهٔ یک سیستم جدید پردازش اطلاعات را در بستر اینترنت اشیا، ازطریق یک سیستم نظارت بر مراقبت‌های بهداشتی بررسی کرد. او استفادهٔ مؤثر از داده‌های بزرگ در محیط اینترنت اشیا را ازطریق معماری پیشنهادی، برای دستیابی به حداقل تأخیر در یک محیط زمان واقعی، تجزیه‌وتحلیل کرد.

یاداو و میسرا[۲۰] (۲۰۱۹) چگونگی اثر بلاکچین را در هنگامی بررسی کردند که با زنجیرهٔ تأمین مجازی یکپارچه شده است و اثر آن را بر کارایی‌های مختلف عملیاتی، ازجمله کاهش هزینه و مبارزه با محصولات تقلبی در زنجیرهٔ تأمین مواد غذایی بررسی کردند. ماتسودا[۲۱] و همکاران (۲۰۱۹)، مجازی‌سازی زنجیرهٔ تأمین را با ساختن یک سیستم فیزیکی سایبر، برای یک زنجیرهٔ تأمین هوشمند بررسی کردند. در این مقاله، پیشنهاد می‌شود یک مدل سازمانی به‌عنوان یک مدل اطلاعاتی، مدل‌سازی شود که یکپارچه‌سازی یک مدل داده و یک مدل ریاضی برای

توصیف رفتار خود است. اسمیت و دیلون (۲۰۱۹) دربارهٔ استفاده از فناوری بلاکچین، به‌عنوان مکانیسمی برای تسهیل اعتماد بین عوامل مختلف زنجیرهٔ تأمین، با بررسی سه موضوع مهم اعتبار، قابلیت ردیابی، شفافیت، در مدیریت ریسک زنجیرهٔ تأمین مجازی بحث کردند.

یان[۲۲] (۲۰۱۷)، بهینه‌سازی افزایش درآمد زنجیرهٔ تأمین کالاهای فاسدشدنی را با به‌کارگیری اینترنت اشیا بررسی کرد. یان، دو مدل درآمد را برای محاسبهٔ درآمد زنجیرهٔ تأمین کالاهای فاسدشدنی، قبل و بعد از استفاده از IoT در نظر گرفت تا آثارIoT را در این زنجیرهٔ تأمین بررسی کند. ونکاوسکاس[۲۳] و همکاران (۲۰۱۶)، چارچوبی را برای مدل‌سازی مسائل امنیت–انرژی–محیط، به‌عنوان ویژگی‌های اصلی برای تعیین کیفیت خدمات، برای برنامه‌های مبتنی بر اینترنت اشیا معرفی کردند. وردو[۲۴] و همکاران (۲۰۱۶)، نقش مجازی‌سازی را در چارچوب مدیریت زنجیرهٔ تأمین مواد غذایی، ازنظر اینترنت اشیا بررسی کردند و یک معماری سیستم اطلاعاتی برای اجرای این طرح به‌صورت تئوری پیشنهاد کردند. فنگ[۲۵] و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل سه‌مرحله‌ای یکپارچه براساسِ فناوری IoT، برای بهینه‌سازی تهیهٔ مواد اولیه، تولید و بازیافت محصول، قیمت‌گذاری و استراتژی کسب سود برای تأمین تقاضای محصول در هر مرحله از چرخهٔ عمر محصول ارائه کردند. لی[۲۶] و همکاران (۲۰۱۴)، کیفیت خدمات اینترنت اشیا را یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه، با در نظر گرفتن سه ویژگی کیفیت خدمات وب (زمان اجرا، قابلیت اطمینان، هزینهٔ اجرا) به‌عنوان معیارهای ارزیابی کیفیت خدمات وب، با توجه به کاربرد دامنهٔ IoT بررسی کردند. لانگ[۲۷] (۲۰۱۴)، شبکه‌های زنجیرهٔ تأمین مجازی را با ترکیبی از تست محاسباتی و فناوری عملیاتی بررسی کرد. لانگ ازنظر روش‌شناختی، به‌جای جنبهٔ کاربردی، چارچوب تست محاسباتی توزیع‌شدهٔ مبتنی بر عامل را براساسِ سه جنبهٔ مواد، اطلاعات و زمان با راهکارهای اجرایی، برای گسترش شبکه‌های زنجیرهٔ تأمین مجازی ارائه کرد.

شفیعی نیک‌آبادی و همکاران (۱۳۹۳)، اثر مدیریت امنیت اطلاعات را بر یکپارچگی زنجیرهٔ تأمین شرکت‌های کوچک و متوسط بررسی کردند. تقوا و همکاران (۱۳۸۹)، نقش نظام‌های مدیریت امنیت اطلاعات را در بهبود عملکرد زنجیرهٔ تأمین در صنعت خودرو بررسی کردند. آنها از فن کارت امتیازی متوازن در سه سطح راهبردی، فنی و عملیاتی برای بررسی عملکرد استفاده کردند. رحمان‌سرشت و افسر (۱۳۸۷)، اثر تسهیم اطلاعات را بر استراتژی‌های رقابتی و عملکرد زنجیرهٔ تأمین فولاد، با استفاده از مدل‌یابی معادلات ساختاری تجزیه‌وتحلیل کردند. برای نشان‌دادن تفاوت این تحقیق با دیگر مقالات، طبقه‌بندی مهم‌ترین پژوهش‌های مرتبط در جدول ۱ بیان شده است.

بیشتر مطالعات انجام‌شده در این حوزه توصیفی بوده و مزایا و ویژگی‌های مهم و مؤثر در زنجیرهٔ تأمین مجازی را به‌صورت توصیفی شرح داده‌اند. درواقع در هیچ‌یک از مطالعات بررسی‌شده، بهینه‌سازی زنجیرهٔ تأمین مجازی با تمرکز بر بهینه‌سازی عملکرد پردازش اطلاعاتی مشاهده نشده است. با توجه به نقش مهم اطلاعات در زنجیره‌های تأمین مجازی، یکی از نوآوری‌های این پژوهش، بهینه‌سازی زنجیرهٔ تأمین مجازی با تمرکز بر عملکرد پردازش اطلاعات است. در نظر گرفتن هزینهٔ تجهیزات اینترنت اشیا، هزینهٔ مصرف انرژی، هزینهٔ امنیت اطلاعات و سرعت پردازش اطلاعات در محیط اینترنت اشیا، نوآوری دیگر این پژوهش است. همچنین مدل بهینه‌سازی عملکرد پردازش اطلاعات، با در نظر گرفتن توابع سود و سرعت پردازش، با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نسخهٔ دوم، مبتنی بر قوت پارتو[۲۸] و نسخهٔ دوم الگوریتم ژنتیک، با مرتب‌سازی نامغلوب[۲۹] حل و نتایج این دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

جدول ۱- خلاصهٔ تحقیقات زنجیرهٔ تأمین مجازی

Table 1 - Summary of Virtual Supply Chain Research

رفرنس	فرضیات								
	زنجیرهٔ تأمین ساده	زنجیرهٔ تأمین مجازی	زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته	اینترنت اشیا	چندمحصولی	چنددوره‌ای	تسهیلات تکنولوژی	امنیت اطلاعات	روش
مانتو[۳۰] و همکاران (۲۰۰۴)	√	√							توصیفی
گوناسکران و نگایی (۲۰۰۷)	√	√							توصیفی
وردو و همکاران (۲۰۱۳)	√	√							توصیفی
لانگ[۳۱] (۲۰۱۴)	√	√							توصیفی
فنگ و همکاران (۲۰۱۵)	√		√	√		√			بهینه‌سازی- PSO
یان (۲۰۱۷)	√			√	√		√		بهینه‌سازی-CCA
شمسوزوها و هلو (۲۰۱۷)	√	√							توصیفی
کولینسکا و کولینسکا (۲۰۱۹)	√	√							توصیفی
یاداو و میسرا (۲۰۱۹)	√								توصیفی
برونو[۳۲] (۲۰۲۰)	√	√							توصیفی
نیشی و همکاران (۲۰۲۰)	√	√					√		توصیفی
ماتسودا و همکاران (۲۰۲۰)	√	√							توصیفی
پژوهش حاضر		√	√	√	√	√	√	√	بهینه‌سازی- NSGAII SPEA-II

۲- مبانی نظری

۲-۱- زنجیرهٔ تأمین مجازی

زنجیرهٔ تأمین مجازی، همکاری در یک زنجیرهٔ تأمین ازطریق اینترنت، توسط یک شبکهٔ پویا از سازمان‌های همکار است که فعالیت‌های عادی آنها در درجهٔ اول مبتنی بر اینترنت است. هدف این سازمان‌های همکار این است که از فرصت تجاری برای ارائهٔ کالای منحصربه‌فرد، به‌موقع بهره‌برداری کنند (اسکات و مولا[۳۳]، ۲۰۰۹). حالات تجاری امروز، ازجمله تنوع بیشتر محصول، چرخهٔ عمر کوتاه‌تر محصول و سطح تقاضای پیش‌بینی‌نشده، فشار مضاعفی را بر شرکت‌های تولیدی در سطح جهان وارد می‌کنند. برای کنارآمدن با چنین وضعیتی، شرکت‌های توزیع‌شدهٔ جغرافیایی، برای کار مشترک در یک فضای تجاری مجازی مورد نیازند (شمسوزوها و هلو[۳۴]، ۲۰۱۷).

زنجیرهٔ تأمین مجازی، شامل ابزاری برای مدیریت جریان اطلاعات مربوطبه برنامه‌ریزی، تأمین منابع، ساخت و تحویل فعالیت‌هاست که با فعالیت‌های جمع‌آوری اطلاعات، پردازش اطلاعات و اشتراک اطلاعات برای شبکه‌ای از شرکت‌ها پشتیبانی می‌شود (هلو، شمسوزوها و ساندو[۳۵]، ۲۰۱۶). به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات در یک زنجیرهٔ تأمین مجازی، اطلاعات کلی را غنی می‌کند تا نتایج حاصل از کلیهٔ فعالیت‌های برنامه‌ریزی را بهبود بخشد. ادغام سیستم‌های اطلاعاتی و فناوری اینترنت، به ایجاد زنجیرهٔ تأمین مجازی کمک می‌کند (اسکات و مولا، ۲۰۰۹).

ویژگی‌های زنجیرهٔ تأمین مجازی عبارتند از: موقتی‌بودن، مشتری‌مداری، پراکندگی جغرافیایی، استفادهٔ فشرده از فناوری‌های اطلاعات، ساختار سازمانی شبکه، استفاده از شایستگی‌های اصلی مشارکت‌کنندگان (کولیسکا و کولیسکا[۳۶]، ۲۰۱۹). امروزه با پیشرفت در فناوری اطلاعات و ارتباطات، به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات بیشتر تصورشدنی است. به‌علاوه، اشتراک اطلاعات در زنجیره‌های تأمین، با معرفی همکاری جهانی و هماهنگی طولانی‌مدت کارآمدتر شده است که به بهبود مزیت‌های رقابتی شرکت‌ها منجر می‌شود (لطفی[۳۷] و همکاران، ۲۰۱۳).

شرکای موجود در زنجیره‌های تأمین مجازی ممکن است از فرصتی به بازار دیگر متفاوت باشند و نهایت انعطاف را در انتخاب و استقرار پیوندها فراهم کنند. هیچ عضوی دائمی، در زنجیره‌های تأمین مجازی وجود ندارد. زنجیرهٔ تأمین مجازی ساختار سازمانی است که جریان کارآمد و مؤثر کالاهای فیزیکی و اطلاعات را به‌صورت یکپارچه تسهیل می‌کند و به‌دلیل انعطاف‌پذیری آن در اتخاذ سریع و انطباق با تغییرات محیط کسب‌وکار، از زنجیرهٔ تأمین سنتی متمایز است (دا کروز کاریا[۳۸] و همکاران، ۲۰۱۶). سیستم ردیابی سنتی تا حد زیادی به سیستم‌های مبتنی بر کاغذ یا رایانه‌ای داخلی متکی است. ثبت کاغذی، زمان‌بر و با خطا همراه است (رضایی و بابازاده، ۱۳۹۹). مجازی‌سازی، امکان ردیابی و نظارت محصولات و تاریخچهٔ محصولات را فراهم می‌کند. شرکت‌ها با مجازی‌سازی فرآیند خود، به کارآیی عملیاتی دست می‌یابند (یاداو و میسرا، ۲۰۱۹). یکی از کلیدهای موفقیت‌آمیز زنجیرهٔ تأمین مجازی، تبادل به‌موقع و دقیق اطلاعات با برنامه‌های نرم‌افزاری است و با توجه به اینکه زنجیرهٔ تأمین مجازی به یک سیستم ارتباطی مؤثر متکی است، به توسعهٔ یک سیستم اطلاعاتی مناسب با استفاده از فناوری‌های مختلف اطلاعاتی نیاز است (گوناسکران و نگایی[۳۹]، ۲۰۰۷). اینترنت اشیا، یکی از جدیدترین تحولات و انقلاب جدید فناوری اطلاعات است که تغییر پارادایمی را در چندین زمینه، ازجمله مدیریت زنجیرهٔ تأمین فراهم می‌کند (بن دایا، حاسینی و بهرون[۴۰]، ۲۰۱۷).

۲-۲- اینترنت اشیا

اصطلاحIoT را کوین اشتون در سال ۱۹۹۹ ابداع کرده است. IoT مجموعه‌ای از اشیای فیزیکی و مجازی است که ازطریق شبکه‌ای برای ارتباط و سنجش یا تعامل با محیط داخلی و خارجی به یکدیگر متصل می‌شوند و به‌صورت دیجیتالی برای سنجش، نظارت و تعامل در داخل یک شرکت و در میان دیگر شرکت‌ها به هم متصل شده‌اند (عبدالباسط، منوگران و محمد[۴۱]، ۲۰۱۸). اینترنت اشیا، به امکان برقراری ارتباط تمام اشیا با یکدیگر و با انسان‌ها، به‌همراه شناسایی و کشف آنها در یک شبکهٔ یکپارچه با شناسهٔ مشخص اطلاق می‌شود و امکان برقراری ارتباط هرکسی، در هر زمان و مکان را به هر چیزی در هر زمان و مکان فراهم می‌آورد (هاشمی و ستوده، ۱۳۹۹).

فناوری اینترنت اشیا، محیطی را کاملاً تغییر می‌دهند که زنجیره‌های تأمین در آن کار می‌کنند. داده‌ها و اطلاعات بسیار در زمان واقعی، سریع‌تر در زنجیرهٔ تأمین گسترش می‌یابد و همچنین، کارایی کشف و استفاده از منابع نیز بسیار بهبود می‌یابد (او، ژو و گو[۴۲] ، ۲۰۲۰). جریان محصولات در هر سطح زنجیرهٔ تأمین ردیابی می‌شود و کلیهٔ اطلاعات مربوط‌به قطعات و محصولات وارد سیستم و برای مدیران، بارگذاری می‌شود (عبدالباسط و همکاران، ۲۰۱۸). اینترنت اشیا، زمان‌بندی فرآیند تولید را بهینه می‌کند و ادغام عمیق فرآیند فیزیکی تولید و سیستم اطلاعات را فراهم می‌کند و باعث تسریع در تحول و به‌روزرسانی، کاهش هزینه‌های تولید، کاهش مصرف انرژی و ارتقای

صنعت تولید برای جهانی‌شدن و معتبرشدن می‌شود (هوانگ، ۲۰۲۰). به‌کارگیری IoT بر زنجیرهٔ تأمین مجازی، مدیریت موجودی را تقویت می‌کند و فناوری‌های جدید برچسب‌های شناسایی فرکانس رادیویی[۴۳]، فرایند ضبط انواع اطلاعات ازقبیل تاریخ تولید و انقضا و مدت ضمانت را امکان‌پذیر می‌کند، به مدیریت مؤثر زنجیرهٔ تأمین مجازی می‌انجامد و باعث به حداکثر رساندن شفافیت تدارکات (لجستیک) می‌شود. تمام اطلاعات حمل‌ونقل با استفاده از اشیای هوشمند، در دسترس کل زنجیرهٔ تأمین خواهد بود. این امر احتمال نظارت و صرفه‌جویی در کالاها را افزایش می‌دهد، همچنین هزینهٔ بازگشت را به حداقل می‌رساند و اثر زیادی در رضایت مشتری دارد (عبدالباسط و همکاران، ۲۰۱۸). با به‌کارگیری IoT، محصولات معیوب در فرآیند تولید، ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل شناسایی می‌شود. علاوه بر این، RFID به شرکت‌ها اجازه می‌دهد تا محصولات را ردیابی کند و به‌راحتی فراخوانی محصولات را انجام می‌دهد، بنابراین هزینه‌های فراخوان را نیز کاهش می‌دهد (یان، ۲۰۱۷).

۳-۲- عملکرد پردازش اطلاعات

در حالی که اطلاعات در سراسر زنجیرهٔ تأمین جمع‌آوری، پخش و به اشتراک گذاشته می‌شود، کیفیت اطلاعات نیز باید محفوظ باشد. اشتراک اطلاعات به معنای توزیع اطلاعات مهم و اختصاصی برای شرکای زنجیرهٔ تأمین است (مارنگی، تریولاس و رکلیت[۴۴]، ۲۰۱۵). با بهبود کارایی پردازش اطلاعات، رقابت افزایش و هزینه‌ها کاهش می‌یابد. اگرچه نقش اصلی زنجیره‌های تأمین به‌عنوان سیستم‌های پردازش مواد و حرکت محصولات است، پردازش اطلاعات برای موفقیت آنها حیاتی است. واقعیت این است که ده‌هاهزار محصول/رکورد دیجیتالی در اینترنت اشیا، به‌طور مداوم به‌روز می‌شوند و هر روز رکوردهای جدیدی تولید می‌کنند. نحوهٔ مدیریت این داده‌ها، نحوهٔ طبقه‌بندی صحیح اطلاعات ثبت‌شده، صنعت IoT را با چالش‌های جدیدی روبه‌رو خواهد کرد (شین[۴۵] و همکاران، ۲۰۱۴). فاکتورهای مختلفی مانند انرژی، پهنای باند و در دسترس بودن وجود دارد که در ارزیابی خدمات اینترنت اشیا استفاده می‌شود (شاوشوای[۴۶] و همکاران، ۲۰۱۱). کیفیت خدمات سرویس‌های وب، ویژگی‌های عملکردی و غیرعملکردی را تشکیل می‌دهد. خواص عملکردی را ازنظر توان عملیاتی، تأخیر و زمان پاسخ می‌سنجند. خواص غیرعملکردی موضوعات مختلفی، ازجمله یکپارچگی، قابلیت اطمینان، در دسترس بودن و امنیت سرویس‌های وب را بررسی می‌کند (وانگ[۴۷]، ۲۰۰۹).

با مدیریت هزینه‌های زنجیرهٔ تأمین، اهداف عملکردی در بسیاری از سازمان‌ها تأمین می‌شود. علاوه بر هزینه‌ها، مسائل دیگری نیز باید در نظر گرفته شود. از موانع اصلی که سازمان‌ها در ارتقای قابلیت‌های اشتراک اطلاعات با آن روبه‌رواند، حریم خصوصی اطلاعات، قابلیت اطمینان، هزینه و پیچیدگی فناوری، دقت و استفادهٔ مؤثر از اطلاعات است (مارنگی و همکاران، ۲۰۱۵). از دیدگاه ونکاوسکاس و همکاران (۲۰۱۶)، امنیت و انرژی ویژگی‌های جامعی‌اند که در جنبه‌های کلی کیفیت خدمات در سطح ارتباطات و کاربرد بسیار اثرگذارند. از دیدگاه لی و همکاران (۲۰۱۴) زمان اجرا، هزینهٔ اجرا و قابلیت اطمینان معیارهای ارزیابی کیفیت سرویس IoT تعریف می‌شود. مینگ و یانگ[۴۸] (۲۰۱۲) پنج معیار عملکرد، قیمت، در دسترس بودن و قابلیت اطمینان را در تهیهٔ سرویس کیفیت خدمات در نظر گرفته بودند. سیستم‌های اینترنت اشیا حجم گسترده‌ای از داده‌ها را تولید می‌کند که برای تبدیل این داده‌ها به اطلاعات یا خدمات معنادار به اتصال و انرژی شبکه، پردازش و ذخیرهٔ منابع نیاز دارد (لوکشینا[۴۹] و

همکاران، ۲۰۱۹). نظر به اینکه دستگاه‌های حسگر ازنظر انرژی، حافظه، قابلیت پردازش و میزان داده محدودیت‌های مختلفی دارد، استفادهٔ کارآمد و بهینه از این منابع کمیاب، اجباری است.

با گسترش استفاده از IoT در این زنجیره‌های تأمین، خطر افشای اطلاعات افزایش می‌یابد. اگر IoT نتواند راه‌حل مناسبی برای موضوعات امنیتی داشته باشد، توسعهٔ آن را محدود خواهد کرد. بنابراین، بیش از همهٔ مسائل IoT، مسئلهٔ امنیت اهمیت ویژه‌ای دارد (جینگ[۵۰] و همکاران، ۲۰۱۴). با گسترش سریع اتصالات شبکه، سیستم‌های بیشتری توسط حملات نفوذی تهدید می‌شود. داده‌های بزرگ، حجم وسیعی از اطلاعات با دارایی با سرعت زیاد است که برای غنی‌سازی فرایند تصمیم‌گیری به‌صورت خودکار به یک سیستم پردازش اطلاعات کارآمد نیاز دارد (جنیفر، ۲۰۲۰). با پیشرفت‌های عمده در فن‌آوری‌های اطلاعات و ارتباطات، به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات در زمان واقعی، به یک چالش مهم تبدیل می‌شود و اثر درخور توجهی بر عملکرد کلی زنجیره‌های تأمین دارد. در محیط اینترنت اشیا تأخیر، باعث ایجاد مشکلات در برنامه‌های حیاتی در سطوح مختلف می‌شود.

۳- شرح مدل و مسئلهٔ تحقیق

شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته که در این مقاله بحث می‌شود، یک شبکهٔ پویا و چندمحصولی شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و مشتری در جریان مستقیم و مرکز جمع‌آوری، بازیافت و انهدام در جریان معکوس است. ساختار کلی این شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شبکه در جریان مستقیم، محصولات جدید تولیدشده ازطریق جریان مستقیم از مراکز توزیع به مشتریان می‌رسد و چنانچه محصولی در این مسیر آسیب ببیند، ازطریق جریان بازتولید مجدد تعمیر و در مرکز تولید برای ارسال در دورهٔ بعد ذخیره می‌شود.

شکل ۱- زنجیره تأمین مجازی مورد مطالعه

Fig. 1 - The virtual supply chain under study

در شبکهٔ معکوس، محصولات قابل استفادهٔ مجدد به مرکز بازیافت ارسال می‌شود تا به‌عنوان محصولات بازیافتی و با دمونتاژ و جداسازی مواد اولیهٔ قابل استفاده به مرکز تولید ارسال شود. در این زنجیره از سیستم IoT برای شناسایی و فراخوانی محصولات معیوب در مرکز تولید و ردیابی محصولات تا زمان برگشت محصولات به مرکز جمع‌آوری استفاده می‌شود. یک افق تصمیم‌گیری شامل دوره‌های متعدد در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است.

۱-۳- مفروضات و ابعاد مدل در زنجیرهٔ تأمین

این مسئله با توجه به مفروضات زیر بررسی می‌شود.

هیچ تفاوتی بین محصولات جدید و یا بازیافت‌شده وجود ندارد و قیمت آنها یکسان است.

محصولات جدید را پس از دوره‌های معینی بعد از ورود به بازار برمی‌گردانند.

فقط هزینه‌های مجازی در این زنجیره در نظر گرفته شده است.

شاخص‌ها

محصول	P	تولیدکننده	m	تأمین‌کننده	S
مرکز انهدام	Z	مرکز جمع‌آوری	X	مشتری	n
		مرکز بازیافت	B	دورهٔ زمانی	t

۲-۳- هزینه‌های مجازی زنجیرهٔ تأمین

با توجه به کاربرد IoT برای مجازی‌سازی زنجیرهٔ تأمین، در این قسمت هزینه‌های مجازی‌سازی زنجیرهٔ تأمین بررسی می‌شود. ابتدا پارامترها و متغیرهای تصمیم استفاده‌شده در مدل مجازی، معرفی و سپس هزینه‌های مجازی فرموله می‌شود.

پارامترها

درصد محصولات p معیوب	μ_p	هزینهٔ ثابت تسهیلات Iot در مرکز i	FC_{iIot}		
هزینهٔ فراخوانی محصول p بخش تولید	C_{rempt}	هزینهٔ خرید تگ‌های RFID در دورهٔ t	C_{tagt}		
هزینهٔ بازیافت برچسب‌های RFID	CB_{tagt}	میزان بازیافت برچسب‌های RFID	δ		
میزان محصولات برگشتی از مشتریان در دورهٔ t	r_t	تقاضای محصول P در دورهٔ t	d_{pt}		
درصد محصولات باز تولید شده	DR	قیمت فروش محصول p در دورهٔ t	pr_{pt}		

متغیرهای تصمیم

مقدار محصول p تولیدشده در دورهٔ t Q_{pmt} مقدار محصول بازگشتی p Y_{pnxt}

متغیر باینری برابر ۱ اگر در مرکز i تسهیلات IoT به کار گرفته شود، در غیر این صورت برابر صفر X_{iIot} مقدار محصول p حمل‌شده از مرکز i به مرکز j در دورهٔ t Q_{pijt}

۱-۲-۳- هزینهٔ فراخوانی بخش تولید (Rec)

تولیدکننده باید محصولات معیوب را در مرکز تولید فراخوانی کند. در همین حال، با فراخوانی محصولات معیوب، هزینه‌های فرصت خاصی از دست می‌رود. RFID ردیابی محصولات و افزایش شفافیت زنجیرهٔ تأمین را ممکن و درنتیجه روند فراخوان را تسهیل می‌کند و هزینهٔ فراخوان را نیز کاهش می‌دهد.

$$Rec_t = \sum_m \sum_p Q_{pmt} \times \mu_{pt} \times c_{rempt} \qquad \forall\ t \qquad (۱)$$

$$\sum\nolimits_m Q_{pmt} \le \sum_n d_{pnt} \qquad \forall\ p,t \qquad (۲)$$

محدودیت ۲ تضمین می‌کند میزان محصول تولیدشده، کمتر مساوی تقاضای مشتریان باشد.

۲-۲-۳- هزینهٔ ثابت تسهیلات Iot (FCI)

با به‌کارگیری IoT، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان، مراکز جمع‌آوری مسئولیت هزینه‌های ثابت تسهیلات IoT را بر عهده دارند.

$$FCI_t = \sum_m (X_{mtIot} \times FC_{mtIot}) + \sum_d (X_{dtIot} \times FC_{dtIot}) + \sum\nolimits_x (X_{xtIot} \times FC_{xtIot}) \qquad \forall\ t \qquad (۳)$$

محدودیت (۴) تضمین ماهیت دودویی متغیرهای تصمیم‌گیری است.

$$X_{mIot}, X_{dIot}, X_{xIot} \in \{0.1\} \qquad \forall\ d,m,x,t \qquad (۴)$$

۳-۲-۳- هزینهٔ برچسب‌های RFID (*TC*)

تولیدکننده وظیفه دارد برچسب‌های RFID را بر بسته‌های محصولات قرار دهد تا بتوان محصولات را در جریان زنجیرهٔ تأمین مجازی ردیابی کرد. این برچسب‌ها بازیافت‌شدنی است. هزینه‌های خرید و نگهداری این برچسب‌ها باید با توجه به میزان محصول تولیدی و محصول برگشتی در هزینه‌های زنجیرهٔ تأمین مجازی در نظر گرفته شود. با توجه به محصولات برگشتی به مرکز جمع‌آوری و با در نظر گرفتن δ به‌عنوان میزان بازیافت برچسب‌های RFID، هزینهٔ بازیافت این تگ‌ها نیز محاسبه می‌شود.

$$TC_t = C_{tagt} \times \left(\sum_m \sum_p Q_{pmdt} - \sum_n Y_{pnx(t-L)} \times \delta \right) + \sum_n Y_{pnxt} \times \delta \times CB_{tagt} \qquad \forall\ p,t \qquad (۵)$$

$$\sum_n Y_{pnxt} = \left[r_t \times \sum_n \sum_d Q_{pdn(t-L)} \right] \qquad \forall\ p,t \qquad (۶)$$

$$\sum_m Q_{pmdt} \times (1 - DR) = \sum_n Q_{pdnt} \qquad \forall\ p,d,t \qquad (۷)$$

معادلهٔ (۶) میزان محصولات برگشتی از مشتریان را با توجه به میزان محصولات برگشتی بیان می‌کند و معادلهٔ (۷) میزان محصول فروخته‌شده را به مشتریان در هر دوره نشان می‌دهد.

۳-۳- مصرف انرژی (EC)

منظور از مصرف انرژی، مصرف انرژی در هر مورد تولید شده است، به‌طوری که این مورد، یک محصول فیزیکی یا یک واحد پولی تعریف می‌شود.

پارامترها

e_t^{tr} هزینهٔ هر واحد مصرف انرژی برای ثبت، پردازش و ارسال داده‌ها به‌وسیلهٔ IoT در زمان t

P_{IoT}^{i} هزینهٔ ثابت مصرف انرژی در سطح i

Dx_t درصد محصولات بازیافت‌شدنی در دورهٔ t

DBZ_p درصد انهدام محصول p در مرکز بازیافت

E_{ut} حداکثر میزان مجاز مصرف انرژی در زمان t

q_{rp} تعداد قطعات r مورد نیاز محصول p

متغیرهای تصمیم

f_t^{tr} داده‌های پردازش‌شده به‌وسیلهٔ IoT در زمان t

Q_{rst} مقدار مواد خام r سفارش داده‌شده از تأمین‌کننده s در دورهٔ t

Q_{rBt} مقدار مواد خام بازیافت‌شده از محصولات بازگشتی p در مرکز B در دورهٔ t

به‌دلیل اتلاف غیرضروری انرژی الکتریکی در زنجیرهٔ تأمین مجازی، نیاز بهینه‌سازی انرژی، اهمیت حیاتی پیدا کرده است. در این مدل دو هزینهٔ ثابت و متغیر برای مصرف انرژی در نظر گرفته شده است. هزینهٔ متغیر وابسته به میزان مصرف انرژی ثبت و پردازش داده‌های مربوط‌به قطعات و محصولات در جریان زنجیرهٔ تأمین مجازی است و هزینهٔ ثابت مصرف انرژی در طول زنجیرهٔ تأمین مجازی، با توجه به به‌کارگیری اینترنت اشیا در هر سطح زنجیرهٔ تأمین مجازی است.

$$EC_t = (e_t^{tr} \times f_t^{tr}) + \sum_m (X_{mtIot} \times p_{IoT}^{m}) + \sum_d (X_{dtIot} \times p_{IoT}^{d}) + \sum_x (X_{xtIot} \times p_{IoT}^{x}) + \sum_B (X_{BtIot} \times p_{IoT}^{B}) \qquad \forall t \qquad (۸)$$

معادلهٔ (۹) اطلاعات مربوط‌به مواد و محصولات در هر سطح و هر دوره را نشان می‌دهد که با سیستم IoT ثبت و پردازش می‌شود.

$$f_t^{tr} = (Q_{rst} + Q_{rBt} + Q_{pmt} + Q_{pmt} \times \mu + Q_{pmdt} + Q_{pmdt} \times DR + Q_{pdnt} + Y_{pnxt} + Q_{pxBt} + Q_{pxBt} \times DBZ_p + Q_{pxzt}) \quad (۹)$$

معادلات ۱۰، ۱۱ و ۱۲ میزان محصولات در سطوح مختلف زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته را نشان می‌دهد. معادلهٔ ۱۳ و ۱۴ میزان قطعات و مواد خام خریداری‌شده و بازیافت‌شده را در جریان معکوس نشان می‌دهد. محدودیت ۱۵ تضمین می‌کند طول عمر دستگاه‌های باتری، کل مصرف انرژی در ثبت و پردازش اطلاعات باید از حداکثر میزان مجاز مصرف انرژی کمتر باشد.

$$\sum_d Q_{pmdt} = Q_{pmt} \times (1 - \mu) \quad \forall\ p, m, t \quad (۱۰)$$

$$\sum_B Q_{pxbt} = \sum_n Y_{pnxt} \times Dx_t \quad \forall\ p, x, t \quad (۱۱)$$

$$\sum_Z Q_{pxzt} = \sum_x Y_{pnxt} \times (1 - Dx_t) \quad \forall\ p, x, t \quad (۱۲)$$

$$\sum_p \sum_x \left(q_{rp} \times Q_{pxBt} \times (1 - DBZ_p)\right) = \sum_B Q_{rBt} \quad \forall\ r, t \quad (۱۳)$$

$$Q_{rst} = \sum_m \sum_p q_{rp} \times Q_{pmt} \quad \forall\ r, t \quad (۱۴)$$

$$\sum_t (EC_t) \leq E_{ut} \quad (۱۵)$$

۴-۳- امنیت اطلاعات IoT (CS)

سیاست امنیت اطلاعات، سندی برای اطمینان از دارایی اطلاعات و ایمن‌سازی اطلاعات فناوری با روشی خاص برای حمایت از اهداف سازمان است. در این راستا، هزینهٔ امنیت IoT در زنجیره‌های تأمین مجازی بسیار مهم و حیاتی است.

پارامترها

B حداکثر بودجهٔ امنیت کل زنجیرهٔ تأمین

Csh_t هزینهٔ خسارت ایجادشده در دورهٔ t

متغیرهای تصمیم

P_t احتمال تهدید در دورهٔ t

V_t سرمایه‌گذاری امنیت در دورهٔ t

فرض می‌شود ظرف مدت یک سال، تهدیدهای احتمالی و احتمال خسارت برای یک شرکت وجود دارد. نصب سیستم امنیتی دارای ارزش کل سرمایه‌گذاری V_t برای انواع تهدیدات در زمان t باشد. CS_t هزینهٔ خسارت

ایجادشده توسط تهدیدات، در زمان معینی باشد. هزینهٔ کل امنیت در زمان t، با استفاده از معادلهٔ ۱۶ محاسبه می‌شود.

$$CS_t = (Csh_t \times P_t + V_t) \qquad \forall\ t \qquad (۱۶)$$

محدودیت ۱۷ بیان می‌کند کل هزینهٔ امنیت نباید از بودجهٔ امنیت زنجیرهٔ تأمین بیشتر باشد. محدودیت‌های (۱۸) تا (۲۰) سناریوهای مختلف سرمایه‌گذاری را برای مقابله با تهدیدات نشان می‌دهد که بر این اساس با افزایش میزان سرمایه‌گذاری، احتمال وقوع تهدید کاهش می‌یابد.

$$\sum_t CS_t \leq B \qquad (۱۷)$$

$$V_t = 2000 \qquad 0.6 \leq P_t \leq 0.8 \qquad \forall\ t \qquad (۱۸)$$

$$V_t = 4000 \qquad 0.4 \leq P_t \leq 0.6 \qquad \forall\ t \qquad (۱۹)$$

$$V_t = 6000 \qquad 0.1 \leq P_t \leq 0.4 \qquad \forall\ t \qquad (۲۰)$$

مدل بهینه‌سازی عملکرد پردازش اطلاعات با توجه به هزینه، سطح امنیتی، میزان مصرف انرژی و سرعت پردازش تحلیل می‌شود. به این منظور، مدل بهینه‌سازی عملکرد پردازش اطلاعات ارائه‌شده با توجه به هزینه‌های ذکرشده، به‌دنبال حداکثرسازی سود زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته و حداقل‌سازی تأخیر پردازش اطلاعات در این زنجیره است.

۵-۳- سود زنجیرهٔ تأمین مجازی

هدف نهایی زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته، حداکثرسازی سود است. به این منظور، درآمد کل از حاصل ضرب تعداد محصولات ارسال‌شده به مشتریان در قیمت واحد هر محصول محاسبه و از هزینه‌های زنجیرهٔ تأمین مجازی کم می‌شود.

$$Profit = \left(Q_{pdnt} \times pr_{pt}\right) - (Rec_t + FCI_t + TC_t + EC_t + CS_t) \qquad \forall\ t \qquad (۲۱)$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۶-۳- زمان تأخیر (سرعت پردازش)

مجازی‌سازی باعث تولید حجم عظیمی از داده می‌شود که برای ذخیره‌سازی و دسترسی، به زمان پردازش زیادی نیاز دارد. همان‌طور که دستگاه‌های متصل به‌تدریج و به‌طور مداوم افزایش می‌یابد، به ایجاد داده‌های بزرگ در اینترنت اشیا منجر می‌شود که تأخیر شبکه را افزایش می‌دهد. هدف این تابع، هدف حداقل‌سازی تأخیر حاصل از پردازش اطلاعات است که به این ترتیب، سرعت پردازش اطلاعات افزایش می‌یابد.

پارامترها

h_t^{tr} میانگین تأخیر پردازش داده‌ها در زمان t

H_t حداکثر تأخیر مجاز در زمان t

تابع هدف

$$\delta_t = \sum_t (h_t^{tr} \times f_t^{tr}) \qquad \forall\ t \qquad (۲۲)$$

$$\delta_t \le H_t \qquad \forall\ t \qquad (۲۳)$$

محدودیت ۲۳ تضمین می‌کند، تأخیر حاصل از پردازش داده‌ها نباید از حداکثر میزان مجاز تأخیر در زنجیرهٔ تأمین مجازی بیشتر باشد.

۴- روش‌شناسی پژوهش

۴-۱- نسخهٔ دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)

الگوریتم NSGA-II ارائه‌شدهٔ دب و همکاران، الگوریتمی شناخته‌شده برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از یک رویکرد نامغلوب است (آصفی و همکاران، ۲۰۱۴). این الگوریتم در تلاش برای رفع نواقص نسخهٔ اولیه این الگوریتم معرفی شد که در آن نه‌تنها کیفیت راه‌حل‌ها، تطبیق‌پذیری راه‌حل‌های بهینهٔ پارتو نیز درخور توجه قرار گرفت (میرقادری و مدیری[۵۱]، ۲۰۲۱). ابتدا با تولید برخی از جمعیت‌های تصادفی مقدماتی آغاز می‌شود سپس جبهه‌های پارتو درحین جست‌وجو شکل می‌گیرد، اصلاح راه‌حل‌ها انجام می‌شود و راه‌حل‌ها به‌تدریج بهتر می‌شود. در هر نسل، تشکیل جبهه‌های متوالی پارتو از راه‌حل‌های همسو در جمعیت تولیدشده ادامه می‌یابد تا جایی که هیچ راه‌حل باقی‌مانده‌ای وجود نداشته باشد و هر جبهه در جمعیت، کاملاً به یک مجموعهٔ نامغلوب تبدیل شود. پس از مرتب‌سازی جواب‌ها بر اساس غلبه، به‌منظور ایجاد نظم در مجموعهٔ جواب‌های بهینه، باید آنها را براساس فاصلهٔ ازدحامی مرتب کرد. فاصلهٔ ازدحامی نشان می‌دهد یک عضو جبهه به اعضای دیگر در همسایگی خود چقدر نزدیک است (آصفی و همکاران، ۲۰۱۴). مزیت روشNSGA-II در استفاده از فاصلهٔ ازدحام برای حفظ تنوع پاسخ‌های واقع بر جبههٔ پارتوست. هرچه این فاصله بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهندهٔ گستردگی بیشتر فضای جواب است (جنتیان و همکاران، ۱۳۹۸).

۴-۲- الگوریتم فراابتکاری نسخهٔ دوم مبتنی بر قوت پارتو (SPEA-II)

نسخهٔ دوم الگوریتم SPEA-II، از یک آرشیو خارجی برای ذخیرهٔ پاسخ‌های نامغلوبی استفاده می‌کند که درطی جست‌وجوی الگوریتم یافت می‌شود. الگوریتمSPEA-II نیز همانند الگوریتم NSGA-II از عملگرهای جهش و ترکیب برای جست‌وجو در بین پاسخ‌ها استفاده می‌کند. در الگوریتم SPEA-II از معیار برازندگی برای مقایسهٔ بین پاسخ‌های نامغلوب استفاده می‌شود. در این الگوریتم مقدار قوت پاسخ i که به‌صورت s(i) نشان داده می‌شود برابر با تعداد پاسخ‌هایی است که با پاسخ i مغلوب می‌شود، سپس برای هر پاسخ مقدار برازندگی خام تعیین می‌شود (زیتلر و همکاران، ۲۰۰۱).

اینکه پاسخی برازندگی خام صفر داشته باشد، معادل این است که در الگوریتم NSGA-II رتبهٔ اول را داشته باشد. در ضمن به‌جای معیار فاصلهٔ ازدحامی در الگوریتم NSGA-II، از معیار فاصلهٔ هر پاسخ نسبت‌به پاسخ‌های کناری استفاده می‌شود.

۵- مثال عددی و یافته‌های پژوهش

در این بخش، یک مثال عددی برای نشان‌دادن عملکرد مدل خطی ارائه‌شده و اثبات اعتبار و کاربرد آن ارائه شده است. به دلیل کمبود داده در این مدل‌ها، مدل بر اساس دانش متخصصان و داده‌های موجود در مقالات با ارائهٔ یک مثال عددی حل شده است. نظر به اینکه مسائل بهینه‌سازی زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بسته از دسته مسائل Hard-NP است (میرقادری و مدیری، ۲۰۲۱؛ امین‌پور و همکاران، ۱۳۹۹؛ صاحب‌جام‌نیا[۵۲] و همکاران، ۲۰۱۸ ؛ سلیمانی[۵۳] و همکاران، ۲۰۱۳ ؛ فنگ و همکاران، ۲۰۱۵) و به‌دلیل پیچیده‌بودن مدل، زمان محاسباتی روش‌های حل دقیق به‌شدت بالاست و در اغلب موارد، ناتوان در حل این نوع مسائل است. از فاکتورهایی که باعث پیچیدگی مدل می‌شود، تعداد زیاد محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم و همچنین صفر و یک بودن بعضی از متغیرهاست. همچنین در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه، با بهینه‌کردن تابع هدف، الگوریتم به پایان می‌رسد؛ اما در مسائل چندهدفه، بهینه‌سازی هم‌زمان چند تابع هدف کار سخت و زمان بری است و چند هدفه بودن مدل و تضاد بین جنس اهداف، بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. به این منظور، یکی از پرکاربردترین ابزارهای حل این مدل‌ها، یعنی الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه NSGA-II و SPEA-II برای حل مدل ارائه شده در این پژوهش استفاده شده است. فرض می‌شود تولیدکننده پنج محصول را که هریک، از قطعات متفاوت تشکیل می‌شود برای ۱۲ دورهٔ زمانی تولید می‌کند. تقاضا برای محصولات مطابق جدول ۲ است. تولیدکننده علاقه‌مند است بداند چه میزان از محصولات و قطعات در هر سطح از شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته در هر دوره وجود دارد.

جدول ۲- تقاضای محصولات در دوره‌های زمانی بررسی‌شده

Table 2 - Product demand in the time periods examined

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
P_1	۸۳	۱۲۱	۱۸۱	۳۱۵	۳۴۰	۳۷۳	۳۶۶	۴۰۱	۳۷۴	۴۱۴	۳۲۹	۱۲۹
P_2	۳۸	۹۳	۱۶۷	۳۴۵	۳۶۹	۴۰۷	۳۷۳	۳۹۵	۳۹۵	۴۱۳	۲۸۰	۳۶۱
P_3	۶۸	۱۵۱	۳۰۴	۲۹۹	۴۰۹	۳۸۷	۴۰۲	۳۸۶	۳۸۳	۴۰۴	۳۸۴	۶۷
P_4	۹۵	۹۲	۳۰۷	۲۵۴	۳۲۲	۴۰۰	۳۶۶	۳۹۱	۳۷۶	۳۹۴	۲۹۷	۱۲۷
P_5	۸۶	۱۹۹	۲۷۸	۲۱۴	۳۶۴	۳۹۳	۳۷۳	۴۰۵	۴۱۴	۳۹۰	۳۰۰	۱۹۷

لیست تعداد قطعات مورد نیاز هر محصول در جدول ۳ نمایش داده شده است . میزان برگشت محصولات، هزینهٔ خسارت ایجادشده در صورت حمله و درصد محصولات بازیافت‌شدنی مطابق جدول۴ است.

جدول ۳- لیست قطعات مورد نیاز هر محصول (q_{rp})

Table 3 - List of parts required for each product

	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۳	محصول ۴	محصول ۵
قطعه ۱	۲	۳	۲	۳	۰
قطعه ۲	۱	۲	۰	۳	۱
قطعه ۳	۳	۰	۱	۲	۰
قطعه ۴	۰	۴	۳	۴	۳
قطعه ۵	۱	۵	۰	۲	۱

جدول ۴- پارامترهای وابسته به دوره

Table 4 - Times dependent parameters

دوره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
r_t	۰	۰	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۸۵	۰/۹	۰/۸۵	۰/۸	۰/۷۵	۰/۷	۰/۶
Csh_t	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰
DX_t	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰

جدول ۵، قیمت فروش محصولت مختلف را در دوره‌های مختلف نمایش می‌دهد و در جدول ۶، هزینهٔ فراخوانی محصولات در بخش تولید، درصد انهدام محصولات و درصد تولید محصول معیوب نشان داده شده است.

جدول ۵- قیمت فروش محصولات

Table 5 - Sales price of products

	دوره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
Pr_t	P_1	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۱۰۰	۱۱۰۰	۱۱۰۰	۱۰۵۰	۱۰۵۰	۱۰۵۰	۸۰۰	۷۰۰
	P_2	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۳۸۰	۱۳۸۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۲۶۰	۱۲۶۰	۱۲۶۰	۹۶۰	۹۶۰
	P_3	۱۸۰۰	۱۸۰۰	۱۷۲۰	۱۷۲۰	۱۶۵۰	۱۶۵۰	۱۶۵۰	۱۵۷۰	۱۵۷۰	۱۵۷۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰
	P_4	۱۳۸۰	۱۳۸۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۲۶۰	۱۲۶۰	۱۲۶۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۹۲۰	۸۰۰
	P_5	۱۹۲۰	۱۹۲۰	۱۸۴۰	۱۸۴۰	۱۷۶۰	۱۷۶۰	۱۷۶۰	۱۶۸۰	۱۶۸۰	۱۶۸۰	۱۲۸۰	۱۱۲۰

جدول ۶- پارامترهای وابسته به محصولات مختلف

Table 6 - Parameters related to different products

محصول	۱	۲	۳	۴	۵
C_{rempt}	۶	۵	۶/۵	۶/۵	۵
DBZ_{pt}	٪۱۰	٪۲۰	٪۱۵	٪۱۰	٪۲۰
μ_{pt}	٪۱	٪۲	٪۱/۵	٪۱/۷۵	۱٪/۲

۱-۵- یافته‌ها

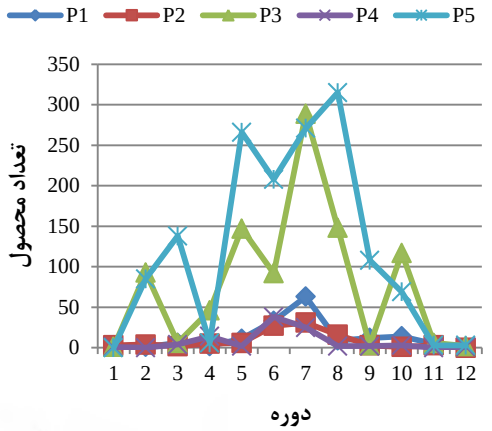
برای بررسی امکان پذیر بودن مدل، ابتدا مدل در اندازهٔ کوچک و در نرم‌افزار گمز، با حل‌کنندهٔ بارون حل شد. با بزرگ‌ترشدن ابعاد مدل در سه حالت بررسی شده، زمان حل با استفاده از نرم‌افزار گمز افزایش یافت. نتایج محاسبات در جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۷- نتایج محاسباتی حل مدل با نرم‌افزار گمز

Table 7 - Computational results of model solving with Gams software

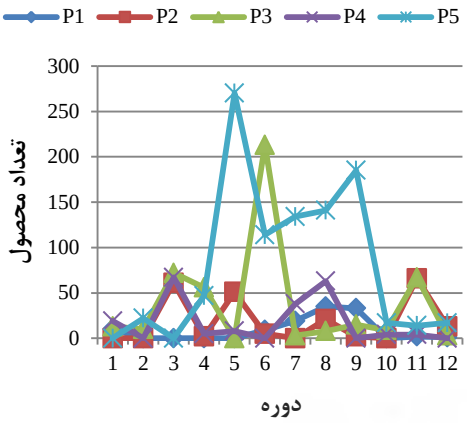
شمارهٔ مسئله	سود کل (ریال)	سرعت پردازش (ثانیه)	زمان حل
۱	$۱/۸۹\times۱۰^{۶}$	۵۹/۶	۹۶
۲	$۴/۹۵\times۱۰^{۶}$	۱۲۰/۵	۱۵۲
۳	$۸/۷۰\times۱۰^{۶}$	۲۹۹	۲۳۱

در ادامه مدل ارائه‌شده در ابعاد اصلی با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II بر کامپیوتر شخصی با پردازندهٔ intel CORE i7 7/2 گیگاهرتز با حافظهٔ ۱۲ گیگ در نرم‌افزار متلب، کدنویسی و اجرا شد. همچنین با توجه به نیاز به ارزیابی روش پیشنهادی، نتایج دو الگوریتم مقایسه شدند. مقادیر محصولات تولیدشده در مرکز تولید برای ۱۲ دورهٔ زمانی بررسی‌شده مطابق شکل‌های ۲ و ۳ است.



شکل ۲- نمودار میزان هر محصول تولیدشدهٔ SPEA-II

Fig. 2 - Graph of the amount of each product produced SPEA-II



شکل ۳- نمودار میزان هر محصول تولیدشدهٔ NSGA-II

Fig. 3 - Graph of the amount of each product produced NSGA-II

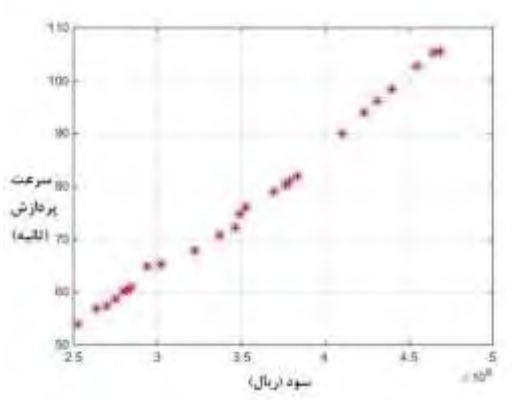
نتایج دو الگوریتم تقریباً یکسان و روند تولید منطبق با تقاضاست. هر دو الگوریتم تولید محصولات ۳ و ۵ بیشتر از دیگر محصولات تعیین شده است که این موضوع به‌دلیل قیمت بالای این دو محصول نسبت‌به دیگر محصولات است؛ همچنین محصول ۱ به‌دلیل قیمت کمتر نسبت‌به دیگر محصولات تولید، کمتر پیشنهاد شده است. میزان سود کل زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته، هزینه‌های انرژی و امنیت و میزان تأخیر پردازش اطلاعات حاصل از هر دو الگوریتم، در جدول ۸ بیان شده است.

جدول ۸- نتایج حل مدل

Table 8 - Model solution results

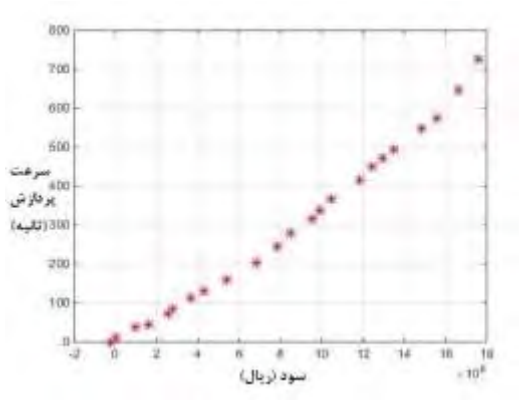
	سود کل (ریال)	سرعت پردازش (ثانیه)	انرژی (ریال)	امنیت (ریال)	هزینه‌های مجازی (ریال)
NSGA-II	۹/۹۳×۱۰^۶	۳۳۷/۴۸	۷۱۷	۶۹۵۸۷	۱۵۰۳۵۵
SPEA-II	۴/۲۳×۱۰^۶	۹۴/۰۷	۶۶۹	۶۷۳۳۴	۱۵۰۴۵۴

نمودار پارتو الگوریتم‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. فاصلهٔ بین دو جواب پارتوی متوالی در NSGA-II کمتر است. با توجه به شکل ۵، NSGA-II قادر به یافتن تعداد جواب‌های پارتوی بیشتری است و دامنهٔ مرز پارتوی تشکیل‌شده توسط این الگوریتم بیشتر و نظم و کیفیت این الگوریتم بهتر است.



شکل ۴- نمودار پارتو SPEA-II

Fig. 4 - Pareto diagram SPEA-II



شکل ۵- نمودار پارتو NSGA-II

Fig. 5 - Pareto diagram NSGA-II

۶- بحث

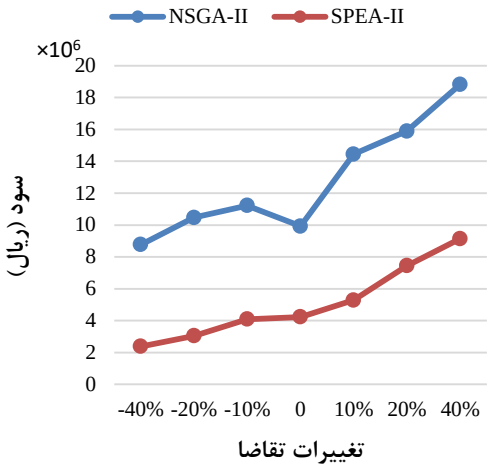
نتایج نمودار پارتو نشان می‌دهد دو تابع سود و سرعت پردازش، ارتباط مستقیم با یکدیگر دارند و با افزایش سود، زمان تأخیر پردازش افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش، وابستگی هر دو تابع هدف به میزان تولید محصولات و همچنین صرفه‌جویی ناشی از بازیافت مواد اولیه است. به این ترتیب با افزایش فروش محصولات، سود زنجیرهٔ تأمین مجازی نیز افزایش می‌یابد و ازطرفی به‌دلیل افزایش تولید محصولات، زمان پردازش داده‌ها در سیستم IoT نیز افزایش می‌یابد که این به معنی افزایش تأخیر در پردازش اطلاعات است. الگوریتم SPEA-II عملکرد بهتری نسبت‌به عملکرد الگوریتم NSGA-II دارد و سود بیشتری برای زنجیرهٔ تأمین مجازی ایجاد می‌کند که این به‌دلیل میزان تولید بیشتر محصولات است. همچنین الگوریتم NSGA-II میزان تأخیر پردازش اطلاعات بیشتری را نشان می‌دهد که به‌دلیل وابستگی سرعت پردازش به میزان تولید است. با افزایش میزان تولید، زمان پردازش اطلاعات نیز افزایش می‌یابد. در دیگر مقالات توضیح و تشریح زنجیره‌های تأمین مجازی (ماتسودا و همکاران، ۲۰۱۹؛ دا کروز کاریا و همکاران، ۲۰۱۶ و گوناسکران و نگایی، ۲۰۰۷) بیان شده است. در حالی که در این پژوهش، علاوه بر کاربردی‌کردن زنجیرهٔ تأمین مجازی با به‌کارگیری IoT، مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره در چند دوره بررسی شده است. با توجه به پیشرفت تکنولوژی در دنیای رقابتی امروز و همچنین لزوم واکنش سریع به تغییرات تقاضا و بازار و برای باقی‌ماندن در فضای رقابتی، به مدیران صنایع مختلف پیشنهاد می‌شود فعالیت تولیدی خود را به‌سمت مجازی‌سازی و بهره‌مندی از مزایای آن سوق دهند و از این مدل در نمونه‌های دنیای واقعی استفاده کنند. درواقع استفاده از تجهیزات اینترنت اشیا در زنجیرهٔ تأمین و به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات برای همهٔ اعضا، کارایی عملکرد سازمان‌ها را افزایش می‌دهد.

درادامه، رفتار مدل ریاضی در تعیین پاسخ بهینه دربارهٔ تغییرات پارامترهای مسئله بررسی می‌شود.

۶-۱- تحلیل حساسیت

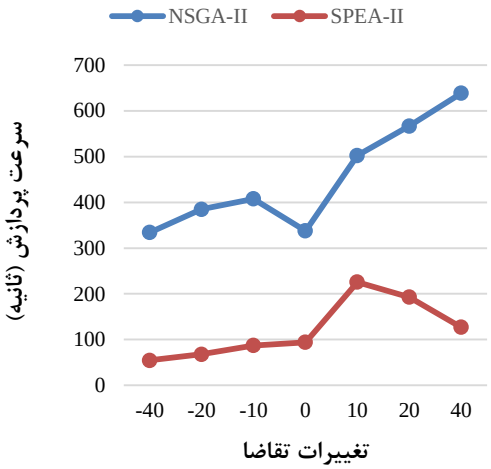
با توجه به تغییرات مداوم در قیمت محصولات و تقاضای مشتریان و به‌منظور تعیین اثر تغییرات این پارامترها در مدل ریاضی ارائه‌شده و بررسی اعتبار خارجی مدل، تجزیه‌وتحلیل حساسیت در این بخش انجام می‌شود. هدف اصلی، ارزیابی آثار تغییرات پارامترهای قیمت محصولات و تقاضای مشتریان بر دو تابع سود کل زنجیرهٔ تأمین

مجازی و سرعت پردازش اطلاعات است. به این منظور، افـزایش و کـاهش ۱۰، ۲۰ و ۴۰درصـدی قیمـت و تقاضـا بررسی شده است.



شکل ۶- نمودار اثر تغییرات تقاضا بر سود زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته

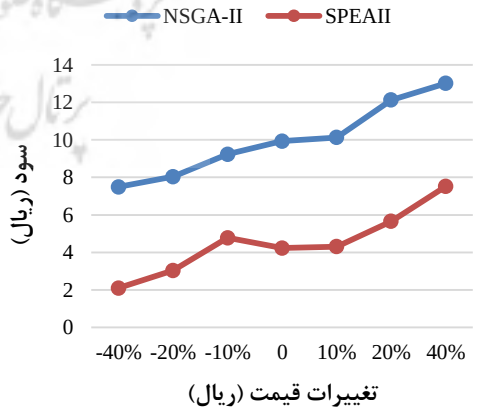
Fig. 6 - Graph of the effect of demand changes on profit of closed-loop virtual supply chain



شکل ۷- نمودار اثر تغییرات تقاضا بر سرعت پردازش اطلاعات زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته

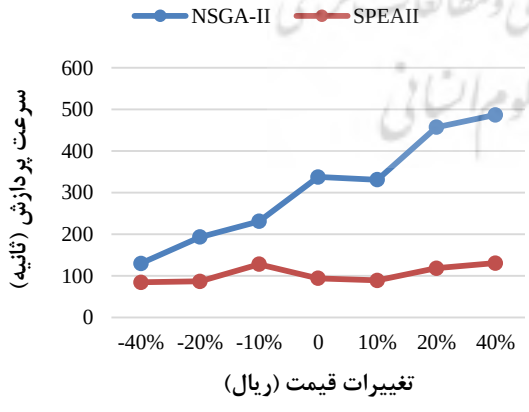
Fig. 7 - Graph of the effect of demand changes on the processing speed of closed-loop virtual supply chain information

مطابق شکل ۶ در هر دو الگوریتم با افزایش میزان تقاضا، سود زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته افزایش می‌یابـد. درواقع تقاضای بیشتر به تولید بیشتر محصولات و افزایش تولید به افزایش سود کـل زنجیـرهٔ تـأمین مجـازی منجـر می‌شود. همچنین زمان پردازش اطلاعات نیز با افزایش میزان تولید افزایش می‌یابـد کـه نشـان‌دهنـدهٔ سـرعت کمتـر پردازش اطلاعات است.



شکل ۸- نمودار اثر تغییرات قیمت محصولات بر سود

Fig. 8 - Graph of the effect of product price changes on profit



شکل ۹- نمودار اثر تغییرات قیمت محصولات بر سرعت پردازش اطلاعات

Fig. 9 - Graph of the effect of product price changes on information processing speed

تغییرات قیمت محصولات نیز اثر مستقیم بر سود زنجیرهٔ تـأمین مجـازی حلقـهٔ بسـته دارد و بـا افـزایش قیمـت فروش محصولات، میزان تولید محصولات و سود زنجیره افـزایش مـی‌یابـد. همچنـین بـا افـزایش تولیـد، سـرعت پردازش اطلاعات نیز بزرگ‌تر می‌شود و این به معنی افزایش زمان تأخیر در زنجیرهٔ تـأمین مجـازی، بـه‌علـت ثبـت داده‌ها در سیستم IoT است. در تمامی حالات، الگوریتم NSGA-II سود بیشتری را شناسایی می‌کند کـه تأییدکننـدهٔ عملکرد بهتر این الگوریتم است.

۷- نتیجه‌گیری

جهانی‌شدن رو به رشد بازار، افـزایش رقابـت جهـانی و ویژگـی‌هـای محصـولات پیچیـده، همگـی بـه کـاربرد فناوری‌ها، روش‌ها و فلسفه‌های جدید تولید منجر می‌شود. با توجه به تغییرات تکنولوژی و پیشرفت دنیای مجـازی و گسترش کاربرد اینترنت، توجه به زنجیرهٔ تأمین مجازی بسیار ضرورت دارد. هدف اصلی این پژوهش، ارائـهٔ یـک مدل مؤثر از سیستم زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته، مبتنی بر خدمات IoT چندمحصولی برای چنـد دوره اسـت و بهینه‌سازی عملکرد پردازش زنجیرهٔ تأمین مجازی حلقهٔ بسته ارائه شده است. به این منظور دو تابع سـود و سـرعت پردازش، با توجه به هزینه‌های مجازی‌سازی در نظر گرفته شده است. یک مثال عددی برای اثبـات کـاربرد و اعتبـار مدل ارائه شده و با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II بررسی و تحلیل شده است. نتایج نشان مـی‌دهـد مدل پیشنهادی، استراتژی‌های مؤثری برای دستیابی به برنامـه‌ریـزی تولیـد، بازتولیـد و توزیـع محصـول و بازیافـت قطعات ارائه می‌دهد و همچنین در این مدل، بـا شناسـایی محصـولات بازیافـت‌شـدنی بـه کمـک IoT، بـه کـاهش هزینه‌های خرید مواد اولیه و قطعات، صرفه‌جویی در هزینه‌ها و افزایش سود زنجیرهٔ تأمین مجازی منجـر مـی‌شـود. دو تابع سود و سرعت پردازش با میزان تولید رابطه مستقیم دارند و با افزایش میزان تولید هر دو افـزایش مـی‌یابنـد. درواقع با افزایش تولید، زمان تأخیر افزایش می‌یابد که این به معنـی کـاهش سـرعت پـردازش اسـت. بـه‌کـارگیری فناوری‌های اطلاعات پیشرفته IoT در صنعت تولید در دنیای واقعی، داده‌های محصولات مختلف و زمان پایان عمـر محصولات را در دسترس مدیران صنایع قرار می‌دهد. مجازی‌سازی زنجیره‌های تأمین با استفاده از IoT نه‌تنهـا بـرای مدیریت بهتر اطلاعات تولید، برای دیگر جنبه‌های سیستم تولید مانند بهبود کارایی نیز بسیار اهمیت دارد.

در زنجیرهٔ تأمین مجازی، در صورت استفادهٔ کارآمد از اشتراک اطلاعات، تولیدکنندگان هزینه‌های زنجیرهٔ تـأمین را کاهش می‌دهند. اشتراک یکپارچهٔ داده‌ها به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد تا استراتژی‌هـای مناسـبی را بـه کار گیرند و به این ترتیب، سودآوری زنجیرهٔ تأمین مجازی افزایش یابـد. اسـتفاده از اینترنـت اشـیا بـه ارتباطـات و ردیابی مواد و محصولات با دقت بالا و بدون مشکل، ازجمله خطای انسانی، کمبـود نیـروی کـار، بودجـهٔ محـدود، آب‌وهوای نامساعد و دیگر عوامل محیطی کمک می‌کند. سازمان‌ها، حجم زیادی از داده‌هـا را در سیسـتم اطلاعـاتی خود جمع‌آوری می‌کنند، داده‌های خام بدون تجزیه‌وتحلیل مناسب معنی چنـدانی نخواهـد داشـت. بـه‌روزرسـانی و تجزیه‌وتحلیل صحیح داده‌ها در زمان واقعی، به مدیران کمک می‌کند تا عملیـات را در یـک زنجیـرهٔ تـأمین مجـازی ردیابی و کنترل کنند و به آنها کمک می‌کند کنترل بهتری بر کل زنجیرهٔ تأمین داشـته باشـند. بـه دیگـر پژوهشـگران پیشنهاد می‌شود بهینه‌سازی را با در نظر گرفتن دیگر ابعاد مجازی‌سازی انجام دهنـد و نبـود قطعیـت را در پـژوهش

خود در نظر بگیرند. همچنین بررسی دیگر تکنولوژی‌های فناوری اطلاعات، برای مجازی‌سازی زنجیرهٔ تأمین به دیگر محققان پیشنهاد می‌شود.

محدودیت این پژوهش، تأیید روش و مدل ارائه‌شده با استفاده از داده‌های فرضی (مثال عددی) به‌جای داده‌های موردی واقعی است. با این حال، این امر بر ارزش نظری و عملی این پژوهش اثر نمی‌گذارد. علاوه بر این، در فرآیند تحقق زنجیرهٔ تأمین مجازی، مجازی‌سازی همچنان با چالش‌های زیادی مانند آماده‌سازی زیرساخت‌های فناوری اطلاعات شرکت‌ها مواجه است. علاوه بر چالش‌های اجرایی فنی، پیاده‌سازی سازمانی موضوعی مهم است. مجازی‌سازی اثر زیادی بر سازمان زنجیرهٔ تأمین دارد و انتظار می‌رود که به مدل‌های کسب‌وکار جدید مانند سازمان‌دهندگان مجازی تخصصی و تجارت محلی به جهانی توسط شرکت‌های کوچک و متوسط، بدون معامله‌گران به‌عنوان واسطه‌های آفلاین منجر شود.

References

Abdel-Basset, M., Manogaran, G., & Mohamed, M. (2018). Internet of Things (IoT) and its impact on supply chain: A framework for building smart, secure and efficient systems. *Future Generation Computer Systems, 86*, 614-628.

Aminpour, S., Irajpour, A., Yazdani, M., & Mohtashami, A. (2020). The Design of a Multi-directional Network Chain Model Offering a Closed Loop in the Automotive Industry by Providing Energy and Time Efficiency Programs. *Industrial Management Journal*, 12(2), 319-343. (in Persian)

Asefi, H., Jolai, F., Rabiee, M., & Araghi, M. T. (2014). A hybrid NSGA-II and VNS for solving a bi-objective no-wait flexible flowshop scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 75*(5-8), 1017-1033 .

Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahroun, Z. (2017). Internet of things and supply chain management: a literature review. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 4719-4742.

Bhuniya, S., Pareek, S. and Sarkar, B. (2021), A supply chain model with service level constraints and strategies under uncertainty, *Alexandria Engineering Journal*, *60*(6), 6035-6052.

Bruno, G., (2020). A Virtual Supply Chain Architecture to Grant Product Transparency in Agribusiness, in: Supply Chain and Logistics Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. *IGI Global*, 89–107.

Da Cruz Caria, P., Hermans, M., Degen, D., Janssen, S., & Sweerts, L. (2016). *Virtual Supply Chain Management at Cisco: advantages and future developments*.

Ding, X., & Wu, J. (2019). Study on Energy Consumption Optimization Scheduling for Internet of Things. *IEEE Access, 7*, 70574-70583. doi:10.1109/access.2019.2919769

Dutta, P., Choi, T.-M., Somani, S. and Butala, R. (2020). Blockchain technology in supply chain operations: Applications, challenges and research opportunities, T*ransportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 142, 1-33.

Dweekat, A. J., & Park, J. (2016). *Internet of Things-enabled supply chain performance measurement model*. Paper presented at the 2016 International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Application (ICIMSA).

Fang, C., Liu, X., Pardalos, P. M., & Pei, J. (2015). Optimization for a three-stage production system in the Internet of Things: procurement, production and product recovery, and acquisition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 83*(5-8), 689-710.

Gunasekaran, A., & Ngai, E. W. T. (2007). Virtual supply-chain management. *Production Planning & Control, 15*(6), 584-595.

Hashemi, S., & sotoudeh, s. (2020). Provide a framework for enhancing the security of IoT-based smart homes using the IoT-A reference architecture. *Journal of Information and Communication Technology, 35*(10), 27-42. (in Persian)

He, L., Xue, M., & Gu, B. (2020). Internet-of-things enabled supply chain planning and coordination with big data services: Certain theoretic implications. *Journal of Management Science and Engineering, 5*(1), 1-22.

Helo, P., Shamsuzzoha, A., & Sandhu, M. (2016). *Cloud-based Virtual Supply Chain*. Paper presented at the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Detroit, USA.

Huang, X. (2020). Quality of service optimization in wireless transmission of industrial Internet of Things for intelligent manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107*(3), 1007-1016. doi:10.1007/s00170-019-04288-8

Janatyan, N., Zandieh, M., Alem Tabriz, A., & Rabieh, M. (2019). Optimizing Sustainable Pharmaceutical Distribution Network Model with Evolutionary Multi-objective Algorithms (Case Study: Darupakhsh Company). *Journal of Production and Operations Management*,*10(1)*, 133-153. (in Persian)

Jennifer, S. R. (2020). A Novel Information Processing in IoT Based Real Time Health Care Monitoring System. *Journal of Electronics and Informatics, 2*(3), 188-196.

Jing, Q., Vasilakos, A. V., Wan, J., Lu, J., & Qiu, D. (2014). Security of the Internet of Things: perspectives and challenges. *Wireless Networks, 20*(8), 2481-2501.

Kulińska, E., & Kulińska, K. (2019). General data protection regulation and virtual supply chains. *Studia Ekonomiczne, 383*, 31-40 .

Li, Q., Dou, R., Chen, F., & Nan, G. (2014). QoS-oriented Web service composition approach based on multi-population genetic algorithm for Internet of things. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 7(sup2), 26-34.

Liu, X., & Sun, Y. (2011). Information Flow Management of Vendor-Managed Inventory System in Automobile Parts Inbound Logistics Based on Internet of Things. *JSW, 6*(7), 1374-1380 .

Lokshina, I. V., Greguš, M., & Thomas, W. L. (2019). Application of Integrated Building Information Modeling, IoT and Blockchain Technologies in System Design of a Smart Building. *Procedia Computer Science, 160*, 497-502 .

Lotfi, Z., Mukhtar, M., Sahran, S., & Taei Zadeh, A. (2013). *Information sharing in supply chain management*. Paper presented at the The 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics.

Long, Q., (2014). An agent-based distributed computational experiment framework for virtual supply chain network development. *Expert Syst. Appl*. 41, 4094–4112.

Ma, Z., Xiao, M., Xiao, Y., Pang, Z., Poor, H. V., & Vucetic, B. (2019). High-Reliability and Low-Latency Wireless Communication for Internet of Things: Challenges, Fundamentals, and Enabling Technologies. *IEEE Internet of Things Journal, 6*(5), 7946-7970.

Manthou, V., Vlachopoulou, M., Folinas, D., (2004). Virtual e-Chain (VeC) model for supply chain collaboration. *Int. J. Prod. Econ*. 87, 241–250.

Matsuda, M., Nishi, T., Hasegawa, M., & Matsumoto, S. (2019). Virtualization of a supply chain from the manufacturing enterprise view using e-catalogues. *Procedia CIRP, 81*, 932-937.

Matsuda, M., Nishi, T., Hasegawa, M., & Terunuma, T. (2020). Construction of a virtual supply chain using enterprise e-catalogues. *Procedia CIRP*, 93, 688-693.

Ming, Z., & Yan, M. (2012). *A modeling and computational method for QoS in IOT*. Paper presented at the 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering.

Mirghaderi, S. D., & Modiri, M. (2021). Application of meta-heuristic algorithm for multi-objective optimization of sustainable supply chain uncertainty. *66666666 66*(1), 1-23 6

Marinagi, C., Trivellas, P., & Reklitis, P. (2015). Information Quality and Supply Chain Performance: The Mediating Role of Information Sharing. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 175*, 473-479.

Nishi ،T. ،Matsuda ،M. ،Hasegawa ،M. ،Alizadeh ،R. ،Liu ،Z.و ، Terunuma ،T. (2020). Automatic Construction of Virtual Supply Chain as Multi-Agent System Using Enterprise E-Catalogues. *International Journal of Automation Technology* ،14(5) ،713-722.

Park, K. C., & Shin, D.-H. (2016). Security assessment framework for IoT service. *Telecommunication Systems, 64*(1), 193-209.

Pourhamidi, M., & Mohajerani, P. (2007). *A comprehensive review of the integrated virtual supply chain model with an analysis of several case studies*. Paper presented at the First International Conference on Supply Chain Management and Information Systems, Tehran. (in Persian)

Prasanth, A., & Jayachitra, S. (2020). A novel multi-objective optimization strategy for enhancing quality of service in IoT-enabled WSN applications. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 1-16 .

Rezaee, L., & Babazadeh, R. (2020). Investigating the relationships between the influencing indicators of blockchain in the food industry. *Journal of Production and Operations Management, 11*(3), 95-116. (in Persian)

Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018). Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. *Journal of Cleaner Production*, 196, 273-296.

Samdantsoodol, A., Cang, S., Yu, H., Eardley, A., & Buyantsogt, A. (2017). Predicting the relationships between virtual enterprises and agility in supply chains. *Expert Systems with Applications,84*, 58-73.

sarsht, R. H., & Fsar, A. (2009). The Impact of Information Sharing on Competitive Strategies and the Performance of Supply Chain. *Journal of Information Technology Management, 1(1),* 37-48. (in Persian)

Scott, A. H. S., & Mula, J. M. (2009). *Contextual Factors Associated with Information Systems in a Virtual Supply Chain*. Paper presented at the 2009 Fourth International Conference on Cooperation and Promotion of Information Resources in Science and Technology.

Shafiei Nikabadi ,M., Mirshahi, N., & Ataei, N. (2015). *The effect of information security management on the integration of organizational processes in the supply chain of small and medium enterprises*. Paper presented at the The Second National Conference on Applied Research in Management and Accounting, Tehran. (in Persian)

Shamsuzzoha, A., & Helo, P. (2017). Virtual supply chain for networked business: perspective of collaborative bill-of-materials, scheduling and process monitoring for developing innovative product. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 31*(6), 595-610.

Shaoshuai, F., Wenxiao, S., Nan, W., & Yan, L. (2011). MODM-Based Evaluation Model of Service Quality in the Internet of Things. *Procedia Environmental Sciences, 11*, 63-69.

Smith, K. J., & Dhillon, G. (2019). Supply Chain Virtualization: Facilitating Agent Trust Utilizing Blockchain Technology. In *Revisiting Supply Chain Risk* (pp. 299-311).

Soleimani ،H. ،Seyyed-Esfahani ،M.و ، Shirazi ،M. A. (2013). Designing and planning a multi-echelon multi-period multi-product closed-loop supply chain utilizing genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* ،68(1-4) ،917-931.

Taghva, M. R., Jafarian, A., & Shafiei Nikabadi, M. (2012). The Role of Information Security Management Systems in Supply Chain Performance Improvement. *IranDoc, 27*(1), 463-482 .(in Persian)

Venckauskas, A., Stuikys, V., Damasevicius, R., & Jusas, N. (2016). Modelling of Internet of Things units for estimating security-energy-performance relationships for quality of service and environment awareness. *Security and Communication Networks*, 9(16), 3324-3339.

Verdouw, C. N., Beulens, A. J. M., & van der Vorst, J. G. A. J. (2013). Virtualisation of floricultural supply chains: A review from an Internet of Things perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 160-175.

Verdouw, C. N., Wolfert, J., Beulens, A. J. M., & Rialland, A. (2016). Virtualization of food supply chains with the internet of things. *Journal of Food Engineering, 176*, 128-136.

Wang, P. (2009). QoS-aware web services selection with intuitionistic fuzzy set under consumer's vague perception. *Expert Systems with Applications, 36*(3, Part 1), 4460-4466.

Wang ،W. Y. C.و ، Chan ،H. K. (2010). Virtual organization for supply chain integration: Two cases

in the textile and fashion retailing industry. *International Journal of Production Economics* ، 127(2) ،333-342.

Xin, J., Cui, Z., Zhang, S., He, T., Li, C., & Huang, H. (2014). Constructing Topic Models of Internet of Things for Information Processing. *The Scientific World Journal*, *2014*, 1-11.

Yadav, J., & Misra, M. (2019). *An overview of food supply chain virtualization and granular traceability using blockchain technology*.

Yan, R. (2017). Optimization approach for increasing revenue of perishable product supply chain with the Internet of Things. *Industrial Management & Data Systems*, *117*(4), 729-741.

Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. *TIK-report*, *103* .

[1] Supply Chain (SC)
[2] Smith & Dhillon
[3] Dutta
[4] Bhuniya
[5] Samdantsoodol
[6] Liu & Sun
[7] Kulińska
[8] Internet of Things (IoT)
[9] Prasanth & Jayachitra
[10] Dweekat & Park
[11] Park & Shin
[12] Ding & Wu
[13] Ma
[14] Nishi
[15] Wang
[16] Matsuda
[17] He
[18] Smart connected products
[19] Jennifer
[20] Yadav & Misra
[21] Matsuda
[22] Yan
[23] Venckauskas
[24] Verdouw
[25] Fang
[26] Li
[27] Long
[28] Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA-II)
[29] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)
[30] Manthou
[31] Long
[32] Bruno
[33] Scott & Mula
[34] Shamsuzzoha & Helo
[35] Helo, Shamsuzzoha, & Sandhu
[36] Kulińska
[37] Lotfi
[38] da Cruz Caria
[39] Gunasekaran & Ngai
[40] Ben-Daya, Hassini, & Bahroun
[41] Abdel-Basset, Manogaran, & Mohamed
[42] He, Xue, & Gu
[43] Radio Frequency Identification (RFID)
[44] Marinagi, Trivellas, & Reklitis
[45] Xin
[46] Shaoshuai
[47] Wang
[48] Ming & Yan
[49] Lokshinas
[50] Jing
[51] Mirghaderi & Modiri
[52] Sahebjamnia
[53] Soleimani

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی