Journal of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 63-64, Spring and Summer 2025, pp. 93-109

Adaptive Real-Time Decision-Making in the IoT-Based Supply Chain Considering Gradual Orders

Fatemeh Mohammadi Chinisaz[1], Alireza Hashemi Golpayegani[2×], Saeed Sharifian Khortoomi[3]

[1] M.Sc., Management Science and Technology Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
[2] Assistant Professor, APA Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
[3] Associate Professor, Electrical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 09 September 2024, Revised: 05 February 2025, Accepted: 16 February 2025
Paper type: Research

Abstract

The advent of new technologies and global trade has intensified competition to produce high-quality products at lower costs and shorter timelines. This shift highlights the need for flexible, real-time responsive supply chains to adapt to environmental changes and customer demands. Given the dynamic nature of supply chains and their environments, the Internet of Things (IoT) emerges as an effective technology for gathering and transmitting information from internal and external environments, significantly enhancing supply chain management. A review of existing research reveals that most studies have focused on one or two layers of the supply chain, often neglecting the interconnectedness of these layers. Furthermore, prior research has predominantly considered static supply chain environments, disregarding the influence of internal and external changes and events. This research introduces a real-time decision-making system for supply chain management leveraging IoT technology. The proposed system identifies suitable components for each order across all supply chain layers (distribution, production, supply). It also monitors real-time events and provides optimal responses to mitigate the negative effects of disruptions on the order preparation process. Simulation of the supply chain utilizes Colored Petri nets, comprising a main Petri net and 10 subnets to model the distributed structure and dynamic processes of supply chain layers. Comparative analysis with the "Optimal method" indicates that the proposed solution achieves a 13.8% improvement in average cost indicators and a 70.5% enhancement in average time indicators, based on the MAPE criterion, demonstrating its effectiveness in managing dynamic supply chains.

Keywords- Supply Chain, Supply Chain Management, Supply Chain Events, Internet of Things, Petri Nets.

* Corresponding Author's email: sa.hashemi@aut.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۳ و ۶۴ ، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۹۳ الی ۱۰۹

تصمیم‌گیری برخطِ تطبیق‌پذیر، در زنجیره تأمین مبتنی بر اینترنت اشیا (با فرض سفارش‌های تدریجی)

فاطمه محمدی چینی‌ساز[۱]، سید علیرضا هاشمی گلپایگانی[۲*]، سعید شریفیان خرطومی[۳]

[۱]کارشناس ارشد مهندسی فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت علم و فنآوری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

[۲]استادیار، پژوهشکده فنآوری‌های نو، مرکز پژوهشی آپا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

[۳]دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

ظهور فناوری‌های نوین و جهانی‌شدن تجارت، رقابت برای تولید محصولات باکیفیت، با حداقل هزینه و زمان را افزایش داده‌است. بنابراین نیاز به زنجیره‌های تأمین انعطاف‌پذیر که به‌صورت لحظه‌ای به تغییرات محیط و تقاضای مشتری پاسخ دهند، تشدید شده است. در این راستا، فناوری اینترنت اشیا، راه‌حلی مناسب برای انتقال اطلاعات درونی و بیرونی زنجیره تأمین می‌باشد که نقش مؤثری در مدیریت بهینه زنجیره دارد. مدیریت بهینه زنجیره تأمین، ملزوم نگرشی جامع به کل زنجیره و انتخاب همزمان اجزای انجام‌دهنده سفارش در هر سه لایه اصلی زنجیره است، ولی اکثر مطالعات تنها به تصمیم‌گیری در یک لایه از زنجیره پرداخته و ارتباط متقابل عملکرد لایه‌ها را نادیده گرفته‌اند. همچنین، اکثر تحقیقات، زنجیره تأمین را در محیطی ایستا و بدون توجه به ماهیت پویای آن و رویدادهای درونی و بیرونی زنجیره، مطالعه کرده‌اند. این پژوهش، با هدف توسعه سیستمی بلادرنگ برای مدیریت سفارشات و رویدادهای زنجیره تأمین، از فناوری اینترنت اشیا بهره می‌برد. راه‌حل پیشنهادی با بررسی لحظه‌ای رویدادهای داخلی و خارجی زنجیره، مناسب‌ترین اجزا از تمام لایه‌های (توزیع، تولید، تأمین) را برای انجام هر سفارش انتخاب می‌کند تا اثرات منفی رویدادهای پیش‌بینی‌نشده را به حداقل برساند. مدل زنجیره، با شبکه پتری توسعه‌یافته با رنگ و زمان شبیه‌سازی شده است. این مدل، شامل یک شبکه اصلی و ۱۰ زیرشبکه می‌باشد که انتخاب اجزا برای سفارشات تدریجی و پاسخدهی به رویدادهای لحظه‌ای را در کل لایه‌های زنجیره، پوشش می‌دهد. مقایسه نتایج راه‌حل پیشنهادی با "راه‌حل بهینه" نشان می‌دهد که این روش میانگین شاخص‌های هزینه را ۱۳،۸ درصد و شاخص‌های زمان را ۷۰،۵ درصد بهبود می‌دهد.

کلیدواژگان: زنجیره تأمین، مدیریت زنجیره تأمین، رویدادهای زنجیره تأمین، اینترنت اشیا، شبکه‌های پتری.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: sa.hashemi@aut.ac.ir

۱- مقدمه

مطالعه پیرامون زنجیره تأمین نشان می‌دهد که مهمترین مسئله در مدیریت هر زنجیره تأمین، انتخاب و تخصیص اجزای مناسب از تمام لایه‌های زنجیره (لایه توزیع، تولید، تأمین و لایه‌های حمل‌ونقل) برای انجام هر سفارش ورودی به زنجیره است.[۱], [۲]

امروزه روش سنتی مدیریت زنجیره تأمین[1] با عنوان "روش تولید انبوه برای انبار[2]" جای خود را به روش جدیدی با عنوان "تولید براساس سفارش[3] یا شخصی‌سازی سفارش" داده است. این روش جدید، قابلیت انعطاف بالایی در برابر تغییرات محیط و انتظارات مشتریان دارد.[۲] همچنین پیشرفت‌های پرشتاب فناوری و فشارهای رقابت جهانی، کسب‌وکارها را وادار می‌کند که زنجیره تأمین خود را ساده، چابک، منعطف و پاسخگو بسازند تا هر زنجیره تأمین بتواند تعداد زیادی از رویدادهای پیش‌بینی‌شده و پیش‌بینی-نشده را مدیریت کند.[۳] چالش اصلی در مدیریت رویدادهای زنجیره تأمین از این واقعیت ناشی می‌شود که رویدادهای مختلف زنجیره، در عین حال که توزیع‌شده و پویا هستند، به یکدیگر مرتبط‌اند و عملکرد هم را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند [۴], [۵].

پیشرفت‌های فناوری اطلاعات، تغییرات عمده‌ای در شیوه مدیریت زنجیره تأمین ایجاد کرده است. به عنوان مثال، اینترنت اشیا[4] که یکی از پرکاربردترین دستاورهای فناوری اطلاعات است، مدیریت زنجیره تأمین را به سطوح جدیدی از ارتباطات منتقل می‌کند. بسیاری از مطالعات در زمینه زنجیره تامین و لجستیک، اذعان دارند که به کارگیری اینترنت اشیا در تمام فرآیندهای زنجیره تأمین تاثیر مثبت داشته است.[۶-۱۸] زیرا با جمع‌آوری و پردازش بلادرنگ داده‌ها و حداقل کردن تأخیر بین جمع‌آوری داده و تصمیم‌گیری برای انجام اقدامات لازم، توانسته است به خوبی انعطاف‌پذیری لازم برای پاسخگویی آنی و اقدام لحظه‌ای را در مقابل رویدادهای زنجیره تأمین فراهم سازد.

در همین راستا پرسش اصلی که تحقیق جاری قصد پرداختن به آن را دارد، به شرح زیر است:

چگونه برای هر سفارش ورودی به زنجیره تأمین، بهترین ترکیب از توزیع‌کننده/ ها، تولیدکننده/ ها و تأمین‌کننده/ ها، با توجه به وضعیت لحظه‌ای زنجیره و اجزای آن انتخاب شود تا سفارشات با حداقل هزینه و زمان ممکن انجام شوند؟

بنابرآنچه بیان شد، پژوهش جاری قصد دارد با استفاده از فناوری اینترنت اشیا، به دو موضوع مهم در مدیریت زنجیره تأمین بپردازد: اول تصمیم‌گیری در مورد انتخاب اجزای انجام‌دهنده‌ی هر سفارش در تمام لایه‌های زنجیره، با هدف دستیابی به بهترین مسیر انجام سفارش‌ها از نظر زمان و هزینه، و دوم پاسخ‌دهی بلادرنگ به رویدادهای زنجیره، با هدف حداقل کردن تاثیر منفی این رویدادها در عملکرد زنجیره.

نوآوری اصلی این پژوهش در دریافت و پاسخدهی بلادرنگ به رویدادهای پیش‌بینی‌نشده از محیط داخلی و پیرامونی زنجیره تأمین است، تا اثرات منفی این رویدادها در انجام سفارشات زنجیره را به حداقل برساند.

۱-۱- فرض‌های اولیه

مفروضات اولیه‌ای که در پیاده‌سازی روش پیشنهادی این مطالعه، درنظر گرفته شده‌اند عبارتند از:

- در این تحقیق یک زنجیره تأمین صنعتی با رویکرد تولید براساس سفارش، مورد بررسی قرار می‌گیرد.
- این زنجیره، یک زنجیره تأمین کامل، شامل سه لایه اصلی (توزیع، تولید، تأمین) و سه لایه فرعی حمل‌ونقل است.
- این زنجیره، مبتنی بر سفارش های تدریجی می‌باشد.
- تمرکز زنجیره بر روی تولید یک نوع محصول است که این محصول از سه نوع ماده اولیه با سهم برابر تولید می‌شود.
- اطلاعات بلادرنگ از شرایط زنجیره، اجزای لایه‌ها، محیط و غیره از طریق اینترنت اشیا فراهم می‌شود که شامل:
  ۱. وضعیت لحظه‌ای هر یک از اجزای زنجیره در هر لایه
  ۲. وضعیت و موقعیت سفارش‌ها
  ۳. رویدادهای درونی و پیرامونی زنجیره
- اگر فاصله بین ورود سفارش به زنجیره و ثبت نهایی آن سفارش در زنجیره، بیش از ۱۵ روز طول بکشد، سفارش به دلیل تأخیر زیاد در ثبت، لغو خواهد شد.
- به ازای هر ۱۰ روز تأخیر در تأمین یا تولید یا توزیع سفارش، ۱۰٪ درصد از مبلغ پرداختی به جزئی که مسئول ایجاد تأخیر است، به عنوان جریمه کسر خواهد شد.

[1] Supply chain management
[2] Make to Stock (MTS)
[3] Build to Order (BTO)
[4] Internet of Things (IoT)

۲- مرور کارهای پیشین

بالاموروگان[1] و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۲۱، روشی را برای مدیریت و ردیابی موثر زنجیره تأمین مواد غذایی با استفاده از اینترنت اشیا، ارائه کردند که از مدل شبکه‌های پتری توسعه‌یافته برای ردیابی مواد غذایی با استفاده از داده‌های دوره‌ای استفاده می‌کند. مدل ارائه‌شده با تعداد ۴۹۱۴ نمونه داده‌ی واقعی، برای ارزیابی ۷ مورد از مهمترین ویژگی‌ها از نظر کیفیت، هزینه و زمان مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم شبکه پتری پیشنهادی در مقایسه با روش‌های K-means, SOM برای مدیریت زنجیره تأمین مواد غذایی، کارآمدتر است.

فیروآ[2] و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۲۰، از طریق ادغام چندین تکنیک، یک سیستم با توانایی حل مسئله ایجاد کردند که درواقع یک مدل مدیریت زنجیره تأمین با ساختار چندعاملی می‌باشد که با شبکه‌های پتری رنگی پیاده‌سازی شده است. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که عامل یکپارچه‌ساز به بهبود کلی سیستم تا ۴۲,۴۷ درصد کمک می‌کند و زمانی که دو عامل ادغام می شوند، عملکرد سیستم از بهینه محلی ۸۱,۳۴ درصد به ۹۱,۹۲ درصد می‌رسد که نشان‌دهنده بهبود ۱۰,۵۸ درصدی نتایج است.

دراکاکی[3] و تزیوناس[4] [۱۱] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از فناوری اینترنت اشیا، یک روش مدل‌سازی سلسله‌مراتبی برای شبیه‌سازی مدیریت موجودی در یک زنجیره تأمین چند مرحله‌ای که در معرض عدم دقت موجودی است، ارائه کردند. شبیه‌سازی زنجیره مبتنی بر شبکه‌های پتری رنگی زمان‌بندی‌شده و با استفاده از ابزار CPN Tools انجام شده‌است. مدل شبیه‌سازی شده تحت ۳۰ سناریو مختلف، با تعداد ۷۰۰ داده آزمایشی و در ۷ پیکربندی مختلف، مورد ارزیابی قرارگرفته است. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که اثر شلاقی در زنجیره‌های تأمین دارای RFID در معرض عدم دقت موجودی، در مقایسه با زنجیره‌های تأمین بدون RFID افزایش می‌یابد.

در مقاله [۷] که در سال ۲۰۱۸ ارائه شد، یک وب سایت طراحی شد که در مدیریت زنجیره تأمین به تأمین‌کنندگان و مدیران کمک می‌کند. این سیستم امکان ردیابی جریان محصولات را از طریق فناوری RFID فراهم می‌سازد. در این تحقیق روش ارزیابی تصمیم‌گیری نوتروزفیک[5] با روند سلسله‌مراتبی تحلیلی[6] ادغام شده و از معیارهای مدل SCOR برای ارزیابی عملکرد سیستم پشنهادی استفاده شده است.

وانگ[7] و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۰ یک سیستم اعزام لجستیک هوشمند بر مبنای اینترنت اشیا ارائه کردند که هماهنگی پویا بین مشتریان، وسایل حمل‌ونقل و فن‌آوری ابری را ممکن می‌سازد. این سیستم در سه بخش اصلی و براساس روش شبکه و گراف MAKLINK طراحی شده‌است. الگوریتم به کار گرفته‌شده در این سیستم یک الگوریتم دو سطحی متشکل از الگوریتم Dijkstra و الگوریتم کلونی مورچه است که از عملیات ارسال هوشمند پشتیبانی می‌کند. بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی در یک مورد مطالعاتی با محصول و مشتریان واقعی نشان می‌دهد که این سیستم، کارایی عملیات اعزام را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد و همچنین منجر به افزایش سهم شرکت‌ها در بازار می‌شود.

در پژوهش [۲۲] که در سال ۲۰۱۹ منتشر شد، کاوالکانته[8] و همکاران، با ترکیب شبیه‌سازی و یادگیری ماشین و با استفاده از تصمیم‌گیری داده‌محور، یک روش برای انتخاب تأمین‌کننده انعطاف‌پذیر ارائه کردند. نتایج بدست‌آمده از این تحقیق ارتباط بین انحراف از مشخصات عملکرد زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر و ریسک عملکرد تأمین‌کننده را به طور موثر بیان می‌کند. در این مطالعه، شبیه‌سازی مدل با نرم افزار Anylogic انجام شد و مدل یادگیری ماشین با استفاده از بسته Scikit-Learn پیاده‌سازی شده‌است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین منجر به بهبود قابلیت اطمینان تحویل تأمین‌کنندگان از ۴۴,۰۳ به ۴۶,۱۶ درصد می‌شود.

جلالی و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۱۴ یک سیستم پیشنهاددهنده برای تعیین رویه انجام سفارش در زنجیره تأمین ارائه کردند. این سیستم با استفاده از الگوریتم K-means نشان می‌دهد که کدام‌یک از اجزای زنجیره در لایه‌ی تأمین، تولید و توزیع برای انجام سفارش مناسب‌تر است. از نقاط قوت این پژوهش می‌توان به این مورد اشاره کرد که با در دسترس بودن امتیازهای سفارش‌های قبلی در پایگاه داده سیستم، می‌توان از پیشنهادهای سایر مشتریان، برای انتخاب رویه مناسب استفاده کرد.

به منظور بررسی دقیق‌تر، در جدول ۱ راه‌حل پیشنهادی این تحقیق با ۱۱ مورد از مرتبط‌ترین پژوهش‌های این حوزه، مقایسه شده‌است.

[1] S. Balamurugan
[2] Luis H. Fierroa
[3] Maria Drakaki
[4] Panagiotis Tzionas
[5] Neutrosophic
[6] Analytic hierarchy process (AHP)
[7] Jianxin Wang
[8] Ian M. Cavalcante

جدول ۱. مقایسه مطالعات مرتبط

ردیف	شماره مقاله	نوع مسئله				ویژگیهای زنجیره تامین				رویکرد			ابزار			معیار تصمیمگیری		
		انتخاب تامینکننده	انتخاب تولیدکننده	انتخاب توزیعکننده	انتخاب حملکننده	اجزا با وضعیت متغییر	اعمال رویدادهای درونی	اعمال رویدادهای بیرونی	تغییر مسیر سفارشات	مدل هوشمند	مدل آماری یا ریاضی	مدل چند معیاره	ابزارهای اینترنت اشیا	ابزارهای مدل سازی	زبانهای برنامه نویسی	هزینه	زمان	نظر ذینفع یا مشتری
۱	[۱۹]	*	*	*			*					*		*			*	
۲	[۶]	*	*	*								*		*		*	*	
۳	[۴]	*		*		*				*				*			*	
۴	[۱۱]	*	*		*							*		*	*			*
۵	[۲۵]				*						*		*	*			*	
۶	[۲۱]	*				*		*				*	*	*				*
۷	[۲۶]				*			*		*			*		*	*	*	
۸	[۱۲]		*		*			*				*	*	*	*	*	*	
۹	[۲۸]	*					*					*		*	*			*
۱۰	[۲۹]	*	*	*						*				*	*	*	*	*
۱۱	[۳۱]	*								*				*	*	*		*
۱۲	روش پیشنهادی	*	*	*	*	*	*	*	*			*	*	*	*	*	*	

۳- رویکرد پیشنهادی

در بخش اول بیان شد که این پژوهش قصد دارد با استفاده از فناوری اینترنت اشیا رویکردی برای مدیریت سفارش‌های ورودی و رویدادهای موجود در یک زنجیره تامین کامل، متشکل از سه لایه اصلی (توزیع، تولید، تأمین) و چند لایه فرعی حمل‌ونقل ارائه دهد. شکل ۱ معماری کلی رویکرد پیشنهادی این تحقیق را نشان می‌دهد که دارای سه بخش اصلی می‌باشد. همچنین چگونگی ارتباط این بخش‌ها با یکدیگر نیز، در شکل ۱ قابل مشاهده است.

۱. پایگاه اطلاعات لحظه‌ای: شامل اطلاعات وضعیتی زنجیره و اجزای آن که به وسیله زیرساخت‌های فناوری اینترنت اشیا، به صورت لحظه‌ای از محیط درونی و بیرونی زنجیره جمع‌آوری و مخابره می‌شوند.
۲. سیستم تصمیم‌گیری بلادرنگ: این سیستم، بر مبنای اطلاعات دریافتی از پایگاه اطلاعات لحظه‌ای، دو عملکرد اصلی را انجام می‌دهد:
   ۱) تعیین مسیر سفارش‌های زنجیره
   ۲) مدیریت رویدادهای زنجیره

   شکل ۲ نمودار گردش‌کار این دو عملکرد اصلی را نشان می‌دهد.
۳. لایه‌های اجرایی زنجیره تأمین: مجموعه‌ی کل اجزای زنجیره تأمین در قالب یک ساختار با سه لایه اصلی (توزیع، تولید، تأمین) و چند لایه فرعی (لایه‌های حمل‌ونقل)، که براساس دستورات دریافتی از سیستم تصمیم‌گیری، مراحل آماده‌سازی و تحویل سفارش را انجام می‌دهند.

۳-۱- فرآیند مسیریابی سفارش‌ها

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پس از ورود هر سفارش جدید به زنجیره، ابتدا به توجه به مقدار سفارش و موجودی انبارها در لایه توزیع، سفارش در یکی از دسته‌های سفارش فوری یا سفارش تولیدی قرار می‌گیرد.

پس از دسته‌بندی سفارش، فرآیند انتخاب اجزا برای آن سفارش آغاز می‌شود، این فرآیند از پایین‌ترین لایه (لایه توزیع) آغاز شده و تا رسیدن به بالاترین لایه (لایه تأمین) ادامه می‌یابد. در ادامه این بخش، چگونگی عملکرد سیستم پیشنهادی، برای انتخاب اجزای انجام‌دهنده‌ی سفارش‌های فوری و تولیدی، تشریح خواهد شد.

۳-۱-۱- تعیین مسیر سفارش‌های فوری

سفارش‌هایی که در دسته فوری قرار می‌گیرند، به طور مستقیم از محصولات موجود در انبارهای لایه‌ی توزیع به مشتری ارسال می‌شوند و دو مرحله‌ی تأمین مواد اولیه و تولید محصولات، از مسیر انجام سفارش‌های فوری حذف می‌شود. بنابراین برای تعیین مسیر هر سفارش فوری، کافیست که توزیع‌کننده‌های مناسب برای انجام آن سفارش انتخاب شوند.

شکل ۳ نمودار گردش‌کار فرآیند انتخاب توزیع‌کننده/ ها را، برای سفارش‌های فوری نشان می‌دهد که پارامترهای آن در جدول ۲ شرح داده‌شده‌اند:

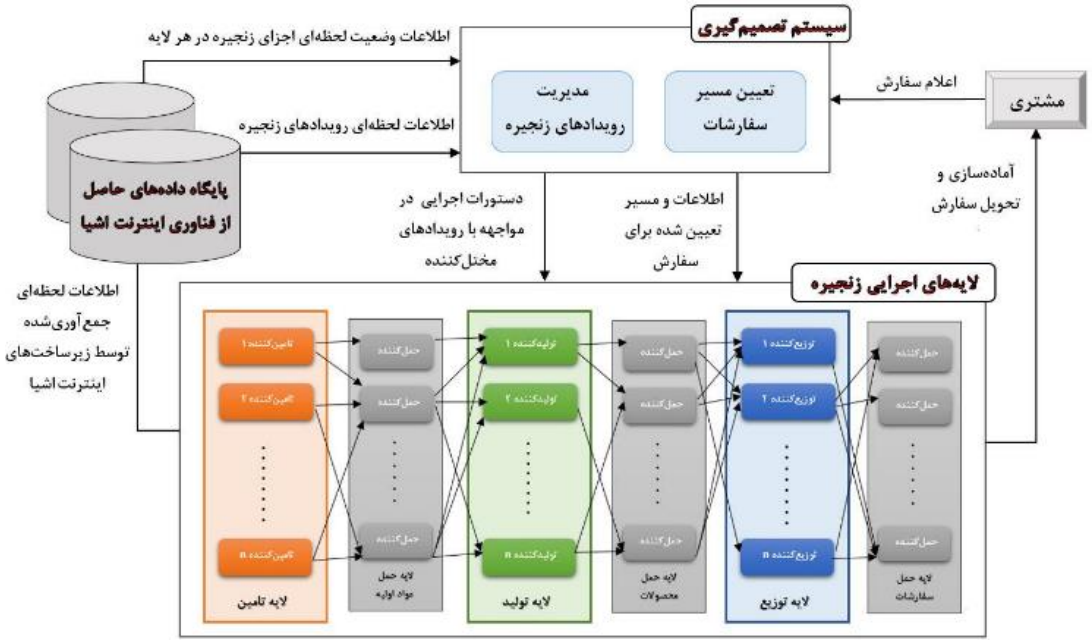
و برای محاسبه $\mathbf{ScoreD_i}$ از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$\boldsymbol{ScoreD_i = P.rateD_i + 2 * S.rateD_i} \quad (۱)$$

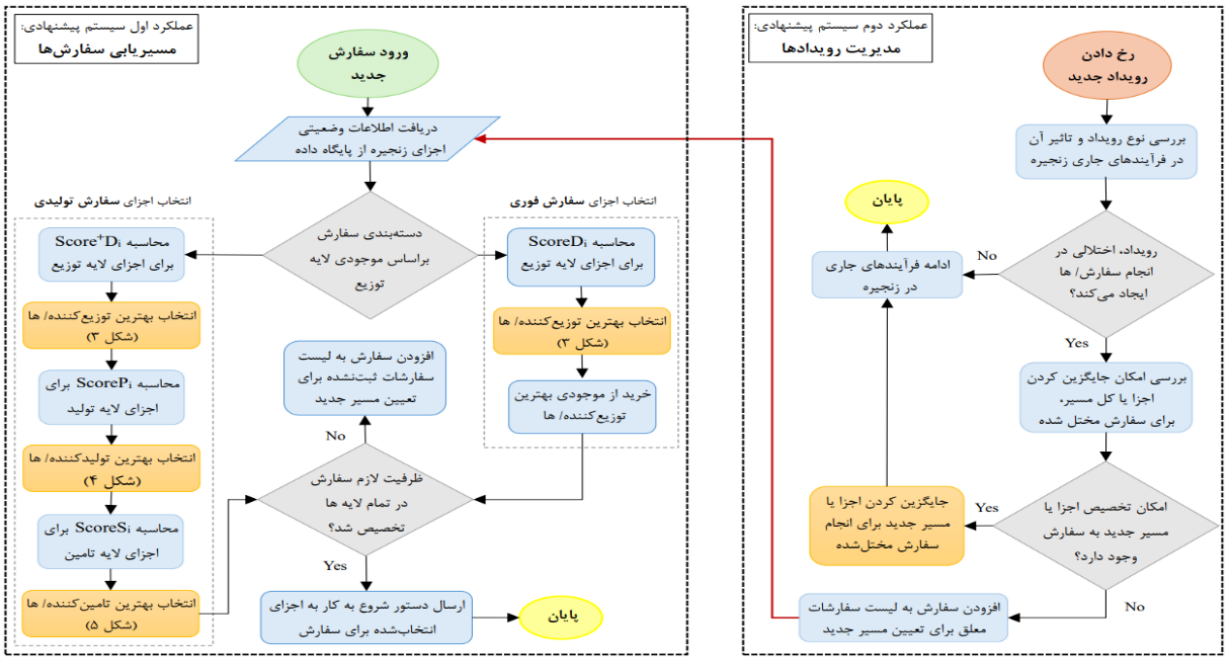
۳-۱-۲- تعیین مسیر سفارش‌های تولیدی

برای آماده‌سازی هر سفارش تولیدی، بایستی از هر لایه‌ی اصلی در زنجیره‌تأمین حداقل یک عضو، به سفارش تخصیص داده شود.

بنابراین تعیین مسیر یک سفارش تولیدی، شامل سه مرحله از انتخاب اجزا می‌باشد: ۱) انتخاب توزیع‌کننده/ ها ۲) انتخاب تولیدکننده/ ها ۳) انتخاب تأمین‌کننده/ ها



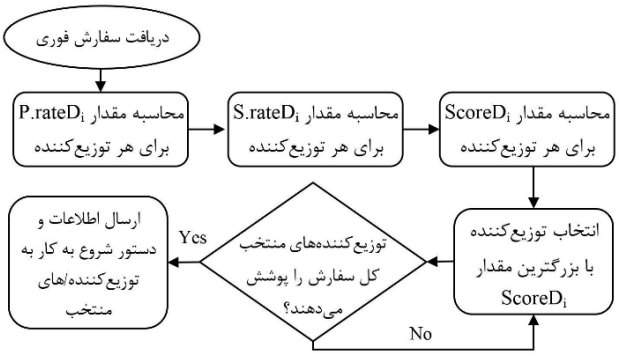
شکل ۱. معماری کلی سیستم پیشنهادی.



شکل ۲. نمودار گردش‌کار دو عملکرد اصلیِ سیستم تصمیم‌گیری در راه‌حل پیشنهادی

جدول ۲. پارامترهای فرآیند انتخاب توزیع‌کننده در سفارش فوری

نماد پارامتر	توضیح پارامتر
$P.rateD_i$	جایگاه توزیع‌کننده در ترتیب نزولی توزیع‌کنندگان براساس قیمت توزیع (Price)
$S.rateD_i$	جایگاه توزیع‌کننده در ترتیب صعودی توزیع‌کنندگان براساس درصد پوشش سفارش با توجه به مقدار موجودی انبار توزیع‌کننده (Stock).



شکل ۳. نمودار گردش‌کار انتخاب توزیع‌کننده/ها در سفارش فوری

انتخاب توزیع‌کننده/ها

در راه‌حل پیشنهادی این تحقیق، مراحل انتخاب توزیع‌کننده/ ها در سفارش‌های تولیدی و فوری دقیقا مطابق هم می‌باشد، با این تفاوت که در مرحله دوم از انتخاب توزیع‌کننده برای سفارش‌های تولیدی، به جای محاسبه $S.rateD_i$ مقدار $F.rateD_i$ برای هر توزیع‌کننده محاسبه شده و فرمول $Score^+D_i$ جایگزین فرمول $ScoreD_i$ می‌گردد. توضیح این پارامترها در جدول ۳ آورده شده‌است.

همچنین برای محاسبه $\mathbf{Score^+D_i}$ از رابطه (۲) استفاده می‌شود:

$$Score^+D_i = P.rateD_i + 2 * F.rateD_i \qquad (۲)$$

انتخاب تولیدکننده/ ها

پس از انتخاب توزیع‌کننده/ ها، نوبت انتخاب اجزا در لایه‌ی تولید است. بدین منظور هر یک از توزیع‌کننده‌های منتخب در مرحله‌ی قبل، به اندازه‌ی سفارشی که متقبل شده‌است، از تولیدکننده/ ها، محصول خریداری می‌کند. شکل ۴ نمودار گردش‌کار فرآیند انتخاب تولیدکننده/ها را برای هر سفارش تولیدی نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای این فرآیند در جدول ۴ قابل مشاهده است. برای محاسبه $ScoreP_i$ نیز از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

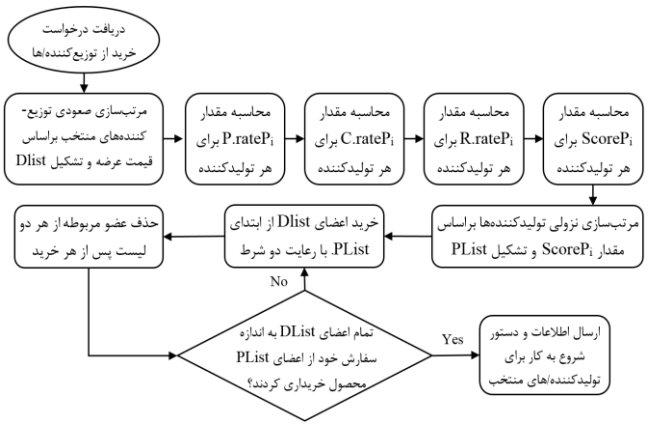
$$ScoreP_i = P.rateP_i + 2 * C.rateP_i + R.rateP_i \qquad (۳)$$

جدول ۳. پارامترهای فرآیند انتخاب توزیع‌کننده در سفارش تولیدی

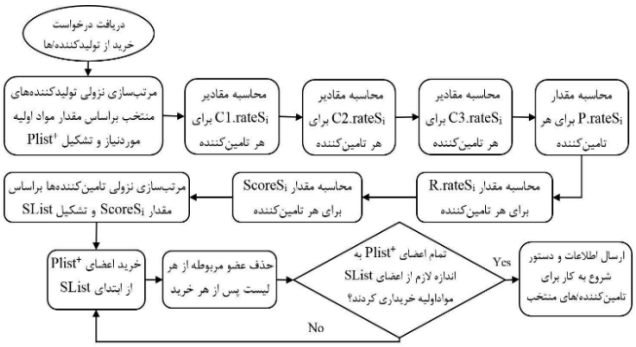
نماد پارامتر	توضیح پارامتر
$P.rateD_i$	جایگاه توزیع‌کننده در ترتیب نزولی توزیع‌کنندگان براساس قیمت توزیع (Price).
$F.rateD_i$	جایگاه توزیع‌کننده در ترتیب صعودی توزیع‌کنندگان براساس درصد پوشش سفارش با توجه به گنجایش انبار توزیع‌کننده و مقدار سفارش‌های رزروشده برای آن توزیع‌کننده (Free Capacity).

جدول ۴. پارامترهای فرآیند انتخاب تولیدکننده در سفارش تولیدی

نماد پارامتر	توضیح پارامتر
$P.rateP_i$	جایگاه تولیدکننده در ترتیب نزولی تولیدکنندگان براساس قیمت تولید (Price)
$C.rateP_i$	جایگاه تولیدکننده در ترتیب صعودی تولیدکنندگان براساس ظرفیت تولید در روز (Capacity)
$R.rateP_i$	جایگاه تولیدکننده در ترتیب نزولی تولیدکنندگان براساس تعداد روزهای کاری لازم برای تولید سفارش‌های رزروشده.
DList	لیست صعودی توزیع‌کنندگان منتخب براساس قیمت عرضه
PList	لیست صعودی تولیدکنندگان براساس مقدار $ScoreP_i$
شروط خرید Dlist از PList:	ظرفیت خالی رزرو در تولیدکننده، بیشتر از مقدار خرید توزیع‌کننده باشد. ظرفیت خالی انبار توزیع‌کننده، بیشتر از حداقل میزان فروش تولیدکننده باشد.



شکل ۴. نمودار گردش‌کار انتخاب تولیدکننده/ ها در سفارش تولیدی



شکل ۵. نمودار گردش‌کار انتخاب تأمین‌کننده/ ها در سفارش تولیدی

انتخاب تأمین‌کننده/ ها

در این مرحله، هر یک از تولیدکننده‌های منتخب مرحله‌ی قبل، به اندازه‌ی لازم برای تولید مقدار محصولی که به توزیع‌کننده/ها فروخته‌اند، از تأمین‌کننده/ها مواد اولیه خریداری می‌کند. با توجه به اینکه تولید هر محصول، به طور همزمان نیازمند سه نوع ماده اولیه می‌باشد، هر تولیدکننده برای تولید یک قلم محصول خود، بایستی سه قلم ماده اولیه خریداری کند. شکل ۵ نمودار گردش‌کار فرآیند انتخاب تأمین‌کننده/ ها را برای هر سفارش تولیدی نشان می‌دهد که لیست پارامترهای آن در جدول ۵ آورده‌شده است:

جدول ۵. پارامترهای فرآیند انتخاب تأمین‌کننده در سفارش تولیدی

نماد پارامتر	توضیح پارامتر
$C_1.rateS_i$	جایگاه تأمین‌کننده در ترتیب صعودی تأمین‌کنندگان براساس ظرفیت تولید در روز، برای ماده اولیه نوع یک (Cap1)
$C_2.rateS_i$	جایگاه تأمین‌کننده در ترتیب صعودی تأمین‌کنندگان براساس ظرفیت تولید در روز، برای ماده اولیه نوع دو (Cap2)
$C_3.rateS_i$	جایگاه تأمین‌کننده در ترتیب صعودی تأمین‌کنندگان براساس ظرفیت تولید در روز، برای ماده اولیه نوع سه (Cap3)
$P.rateS_i$	جایگاه تأمین‌کننده در ترتیب نزولی تأمین‌کنندگان براساس قیمت تأمین (Price)
$R.rateS_i$	جایگاه تأمین‌کننده در ترتیب نزولی تأمین‌کنندگان براساس مقدار سفارش‌های رزروشده

و برای محاسبه $ScoreS_i$ از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$ScoreS_i = C_1.rateS_i + C_2.rateS_i + C_3.rateS_i + P.rateS_i + 2 * R.rateS_i \quad (۴)$$

۳-۱-۳- سفارش‌های ثبت‌نشده به دلیل عدم وجود ظرفیت آزاد در اجزای زنجیره

چنانچه در فرآیند انتخاب و تخصیص اجزای سفارش، در هریک از لایه‌های توزیع، تولید یا تأمین به دلیل عدم وجود ظرفیت آزاد در اجزای آن لایه، امکان تخصیص اجزای لازم برای انجام آن سفارش وجود نداشته باشد، سفارش موردنظر به لیست سفارش‌های ثبت نشده اضافه می‌شود و پس از آزاد شدن ظرفیت اجزای زنجیره، مجددا فرآیند انتخاب و تخصیص اجزا برای آن سفارش تکرار می‌شود. بنابراین ممکن است مسیر انجام یک سفارش، به محض ورود آن سفارش به زنجیره تعیین نشود و بین زمان ورود سفارش به زنجیره و زمان ثبت نهایی آن سفارش در زنجیره فاصله ۰ تا x روزه ایجاد شود. همانطور که در بخش فرضیات مسئله اشاره شد، در صورتیکه فاصله بین ورود سفارش و تخصیص کامل اجزا به آن سفارش (ثبت نهایی آن در زنجیره) بیش از ۱۵ روز باشد ($x>۱۵$) سفارش به دلیل تأخیر زیاد در ثبت، لغو خواهد شد.

در رویکرد پیشنهادی این تحقیق، تخصیص اجزا به سفارش‌هایی که در لیست سفارش‌های ثبت‌نشده قرار دارند، نسبت به سفارش‌هایی که به تازگی وارد زنجیره می‌شوند، اولویت دارد.

۳-۱-۴- محاسبه هزینه تأمین، تولید و توزیع سفارش‌ها

برای هر قلم سفارش تولیدی در زنجیره سه نوع هزینه وجود دارد که نحوه محاسبه هر یک از این هزینه‌ها در ادامه تشریح شده‌است.

هزینه توزیع هر قلم سفارش: هر سفارش ورودی به زنجیره تأمین، می‌تواند به یک یا چند توزیع‌کننده تخصیص داده شود. اگر سفارش فرضی O_k به M عدد توزیع‌کننده تخصیص شده باشد و مقدار محصول خریداری‌شده از هر توزیع‌کننده D_i برای این سفارش با متغییر NO_kD_i و قیمت فروش آن توزیع‌کننده با متغییر PD_i نشان داده شود، در این صورت کل هزینه توزیع این سفارش از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$TotalDistributionCost = \sum_{i=1}^{M} NO_kD_i * PD_i \quad (۵)$$

بنابراین هزینه توزیع هر قلم از سفارش O_k برابر است با:

$$\frac{TotalDistributionCost}{NO_k} = \frac{\sum_{i=1}^{M} NO_kD_i * PD_i}{NO_k} \quad (۶)$$

هزینه تولید هر قلم سفارش: هر سفارش تولیدی در زنجیره تأمین، می‌تواند به یک یا چند تولیدکننده تخصیص داده شود. اگر سفارش فرضی O_k به M عدد تولیدکننده تخصیص شده باشد و مقدار محصول خریداری‌شده از هر تولیدکننده P_i برای این سفارش با متغییر NO_kP_i و قیمت فروش آن تولیدکننده با متغییر PP_i نشان داده شود، در این صورت کل هزینه تولید این سفارش از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$TotalProductionCost = \sum_{i=1}^{M} NO_kP_i * PP_i \quad (۷)$$

بنابراین هزینه تولید هر قلم از سفارش O_k برابر است با:

$$\frac{TotalProductionCost}{NO_k} = \frac{\sum_{i=1}^{M} NO_kP_i * PP_i}{NO_k} \quad (۸)$$

هزینه تأمین هر قلم سفارش: همانطور که پیش‌تر بیان شد در زنجیره تأمین مفروض، برای تولید هر قلم سفارش سه نوع ماده اولیه، با سهم یکسان مصرف می‌شود. همچنین هر تولیدکننده می‌تواند مواد اولیه موردنیازش را از یک تا سه تأمین‌کننده خریداری کند. اگر فرض کنیم در سفارش O_k، تولیدکننده‌ها در مجموع از M تأمین‌کننده، مواد اولیه خریداری کرده باشند و مقدار مواد اولیه خریداری شده از هر تأمین‌کننده S_i برای این سفارش با متغیر NO_kS_i و قیمت فروش آن تأمین‌کننده با متغییر PS_i نشان داده شود. در این صورت کل هزینه تأمین این سفارش با رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$TotalSupplyCost = \sum_{i=1}^{M} NO_kS_i * PS_i \quad (۹)$$

بنابراین هزینه تأمین هر قلم از سفارش O_k برابر است با:

$$\frac{TotalSupplyCost}{NO_k} = \frac{\sum_{i=1}^{M} NO_kS_i * PS_i}{NO_k} \quad (۱۰)$$

۳-۲- مدیریت رویدادهای زنجیره

بیان شد که پژوهش حاضر دو هدف اصلی دارد: اول تعیین بهترین مسیر ممکن برای انجام هر سفارش ورودی به زنجیره (که به تفصیل شرح داده شد) و دوم مدیریت رویدادهای زنجیره.

با توجه به اینکه زنجیره شبیه‌سازی‌شده در این پژوهش، یک زنجیره تأمین پویا با قابلیت دریافت لحظه‌ای رویدادها می‌باشد، امکان تغییر وضعیت اجزا در تمامی لایه‌ها و در هر لحظه از فعالیت زنجیره وجود دارد. چنانچه این رویدادها باعث ایجاد تغییر در وضعیت جزء یا اجزایی که به آن‌ها سفارش تخصیص داده شده‌است شوند، امکان ایجاد اختلال در مسیر انجام سفارش‌ها و عملکرد زنجیره نیز وجود خواهد داشت. بنابراین برای جلوگیری از ایجاد چنین اختلال‌هایی، لازم و ضروریست که در صورت بروز هرگونه

تغییر در وضعیت اجزا، بلافاصله بررسی و اقدامات لازم برای به حداقل رساندن اثرات منفی احتمالی انجام شود.

هرگاه وضعیت یک جزء تخصیص‌داده‌شده به سفارش، بر اثر رویدادی در زنجیره تغییر کند، راه‌حل پیشنهادی این پژوهش، با توجه به نوع رویداد، یکی از سه اقدام زیر را انجام می‌دهد:

رویداد نوع اول: ظرفیت تأمین، تولید یا توزیع در جزء تخصیص داده‌شده به سفارش نسبت به ظرفیت قبلی آن جزء، بیشتر شود.

اقدام: در این‌صورت خللی در مسیر انجام سفارش‌های تخصیص یافته به آن جزء ایجاد نخواهد شد و نیاز به هیچ اقدامی نیست.

رویداد نوع دوم: ظرفیت تأمین، تولید یا توزیع در جزء تخصیص شده به سفارش نسبت به ظرفیت قبلی آن جزء، کمتر شود.

اقدام: در این‌صورت زمان آماده‌سازی سفارش‌های تخصیص‌یافته به این جزء افزایش می‌یابد و در نتیجه زمانبندی اولیه زنجیره برای آماده‌سازی و تحویل سفارش‌ها تغییر خواهد کرد. ولی خللی در مسیر تعیین‌شده برای انجام سفارش‌ها وجود نخواهد داشت. فقط بنابر آنچه در بخش فرض‌های اولیه مطرح شد، جزئی که مسئول ایجاد تأخیر می‌باشد، جریمه خواهد شد.

رویداد نوع سوم: ظرفیت تأمین، تولید یا توزیع در جزء تخصیص شده به سفارش، صفر شود. (از کارافتادن دائمی یا موقتی اجزا).

اقدام: در صورتیکه یکی از اجزای زنجیره تأمین از کار بیافتد، مسیر انجام تمام سفارش‌های تخصیص‌یافته به آن جزء تغییر خواهد کرد. در رویکرد پیشنهادی این تحقیق، به محض از کارافتادن یک جزء در یکی از لایه‌های زنجیره، کلیه سفارش‌های تخصیص‌یافته به آن جزء به حالت تعلیق در می‌آیند، سپس از میان اجزای فعال در لایه‌ی مربوطه، برای هریک از سفارش‌های معلق، یک جزء جایگزین تعیین شده و سفارش از حالت تعلیق خارج می‌شود. چنانچه هیچیک از اجزای لایه‌ی مربوطه، ظرفیت آزاد لازم برای برعهده گرفتن سفارش معلق را نداشته باشند، سفارش تا زمان آزاد شدن ظرفیت اجزا، معلق می‌ماند.

در این تحقیق، تخصیص اجزا به سفارش‌های معلق نسبت به سفارش‌های ثبت‌نشده و سفارش‌های ورودی اولویت بالاتری دارند.

۳-۳- پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی

۳-۳-۱- شبیه‌سازی زنجیره تأمین در قالب شبکه پتری

به طور کلی شبیه‌سازی، ابزاری برای ارزیابی رفتار دینامیکی فرآیندها در طول زمان می‌باشد که برای بررسی عملکرد فرآیندها و منابع در واکنش به تغییرات پارامترهای محیط و خود سازمان انجام می‌شود. هدف اصلی از شبیه‌سازی یک فرآیند تجاری، این است که دریابیم این فرآیند چگونه ممکن است در دنیای واقعی کار کند. مرور تحقیق‌های انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که شبیه‌سازی، امکان تجزیه و تحلیل یک زنجیره تأمین را به خوبی فراهم می‌کند، منجر به مشاهدات دقیق در طول زمان شده و درک بهتر از رفتار یک زنجیره را در برآوردن درخواست‌های مشتریان فراهم می‌سازد. [۵], [۷], [۱۱], [۱۳], [۲۰], [۲۲], [۲۴], [۲۵]

نظر به ویژگی پویایی زنجیره تأمین، شبیه‌سازی جریان فرآیندهای آن می‌تواند به یک کار پیچیده تبدیل شود. به همین دلیل، استفاده از مدل‌های رسمی برای تحلیل کارکرد زنجیره تأمین، امکان تایید و اعتبارسنجی پویایی زنجیره را فراهم می‌کند.

شبکه‌های پتری

شبکه‌های پتری یک ابزار رسمی، تحلیلی و گرافیکی است که از زبان‌های برنامه‌نویسی سطح بالا برای مدل‌سازی سیستم‌های توزیع‌شده و به‌ویژه مفاهیمی مانند: عدم قطعیت، توازی و توالی، رویدادهای همزمان و غیرهمزمان، تضادها و اشتراک منابع، مدل‌سازی فواصل زمانی، همگام‌سازی و ... استفاده می‌کند.

به دلیل دارا بودن نمایش گرافیکی واضح و امکانات تفسیری گسترده، صلاحیت شبکه‌های پتری برای مدل‌سازی سیستم‌های کمی و کیفی، مدل‌سازی سیستم‌های همزمان یا غیرهمزمان، مدل‌سازی پروتکل‌های ارتباطی و سیستم‌های مقاوم به خطا و همچنین ارزیابی عملکرد سیستم‌ها، ثابت شده است. با استناد به مقالات [۱۱], [۱۹], [۲۰], [۲۲], [۲۴], [۳۵-۲۶] شبکه‌های پتری توسعه‌یافته با رنگ و زمان، موفقیت قابل توجهی را در شبیه‌سازی زنجیره‌های تأمین داشته‌اند.

۳-۳-۲- ابزار شبیه‌سازی زنجیره تأمین

امروزه ابزارهای متعددی برای شبیه‌سازی فرآیندهای کسب‌وکار وجود دارند. در مقاله‌های [۲۶], [۲۷] شش مورد از بهترین ابزارهایی که برای شبیه‌سازی فرآیندهای تجاری استفاده می‌شوند (Protos, ARIS, FileNet, FLOWer, Arena, CPN Tools) در سه دسته اصلی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند. براساس نتایج حاصل می‌توان گفت که ابزار CPN Tools [۲۸] از جهت اعتبار رسمی مدل خروجی، ثبت دقیق الگوهای جریان‌کار، نگهداری منابع و داده‌ها، ابعاد گسترده عملکرد، قابلیت تعمیم، میزان تحرکات،

گستردگی سناریوها، میزان و دقت آمار و ارقام و گزارشات خروجی، بهترین نتیجه را در شبیه‌سازی زنجیره‌های تأمین داشته است.[۱۹]

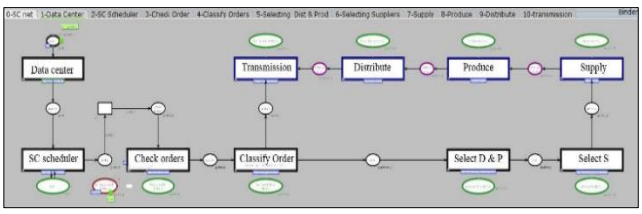
۳-۳-۳- مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره تأمین موردنظر

زنجیره تأمین موردنظر در این پژوهش، در قالب یک مدل ماژولار از شبکه‌های پتری، به صورت یک شبکه اصلی با ۱۰ زیرشبکه یا ماژول شبکه، شبیه‌سازی شده‌است. در جدول ۶ کارکرد هر یک از ماژول‌های موجود در شبکه پتری زنجیره شبیه‌سازی‌شده، به صورت خلاصه ذکر شده‌است.

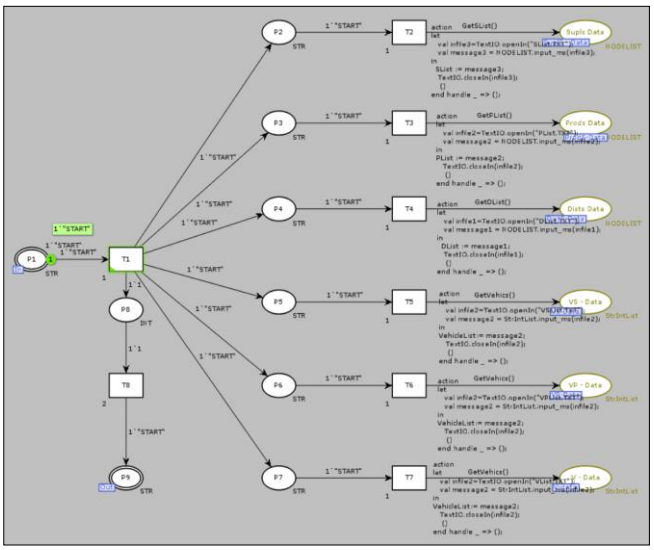
جدول ۶. ماژول‌های موجود در مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره

شماره ماژول	عنوان ماژول	توصیف کارکرد ماژول
ماژول ۱	Data Center	مدیریت اطلاعات وضعیتی اجزای زنجیره
ماژول ۲	SC Scheduler	مدیریت سیستم روزشمار - دریافت سفارش
ماژول ۳	Check Order	بررسی صحت و شناسه‌گذاری سفارش
ماژول ۴	Classify Orders	دسته‌بندی سفارش‌ها (فوری یا تولیدی)
ماژول ۵	Selecting D & P	انتخاب توزیع‌کننده و تولیدکننده
ماژول ۶	Selecting Supplier	انتخاب تأمین‌کننده
ماژول ۷	Supply	تامین مواد اولیه
ماژول ۸	Produce	تولید محصولات
ماژول ۹	Distribute	تجمیع کل محصولات سفارش
ماژول ۱۰	Transmission	تحویل سفارش به مشتری - ثبت اطلاعات

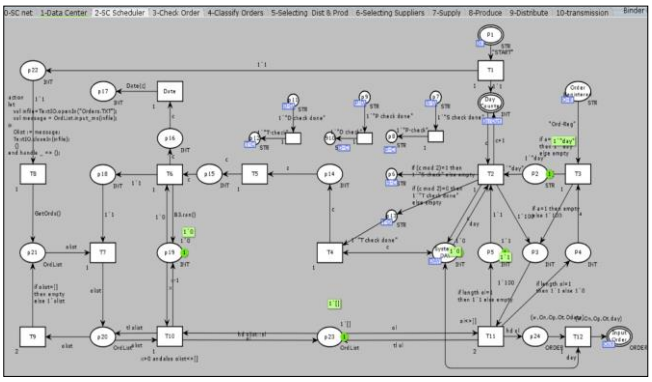
از دیدگاه علم طراحی شبکه، استفاده از این ساختار پیمانه‌ای (ماژولار) در طراحی مدل زنجیره، این امکان را فراهم می‌کند که در صورت نیاز، بخش‌های جدیدی را برای ایجاد کاربردهای مختلف به مدل زنجیره اضافه کنیم یا بخش‌هایی از مدل را به راحتی و بدون ایجاد خلل در کارکرد بخش‌های دیگر حذف کنیم. علاوه براین، با توجه به اینکه ایرادیابی در هر یک از ماژول‌های شبکه به صورت مستقل، انجام می‌شود، کشف و رفع ایرادات شبکه نیز با سرعت بالایی صورت می‌گیرد. در شکل‌های ۶-۱۲ نمای کلی شبکه اصلی و چند مورد از ماژول‌های شبکه پتری قابل مشاهده است (به منظور رعایت اختصار نوشتار، شکل شش زیرشبکه از ده زیرشبکه مدل به عنوان نمونه، در اینجا آورده شده‌است).



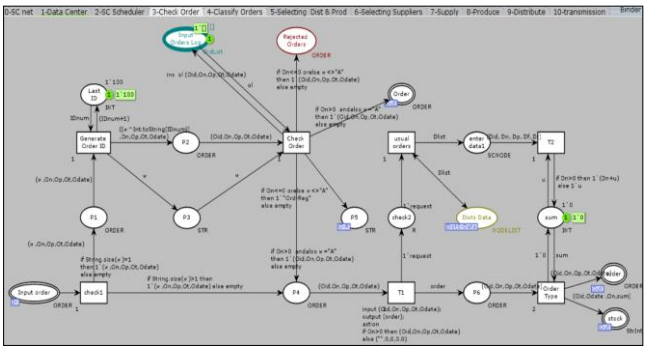
شکل ۶. شبکه اصلی شبیه‌سازی‌شده از زنجیره در محیط CPN Tool



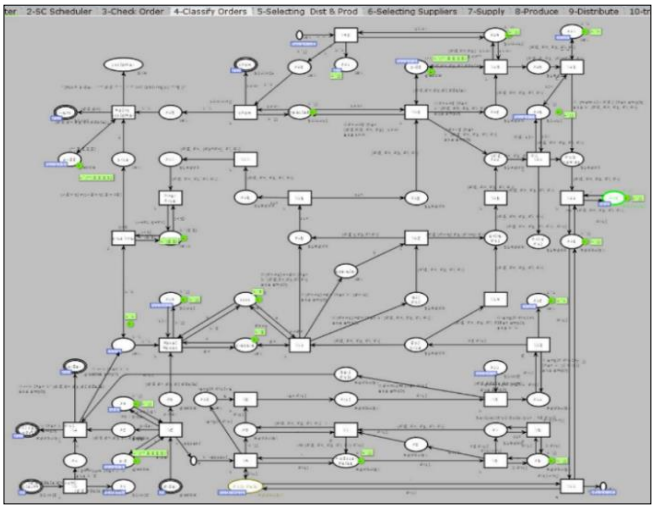
شکل ۷. ماژول شماره ۱ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره



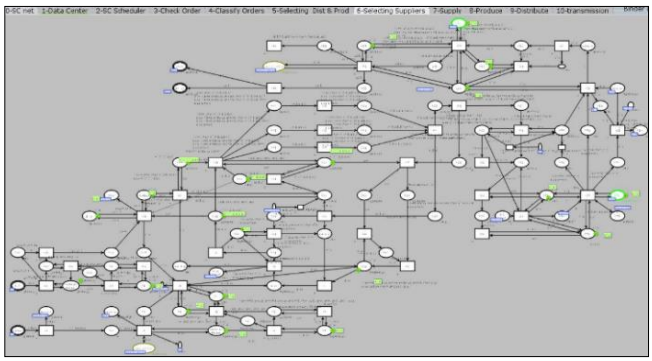
شکل ۸. ماژول شماره ۲ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره



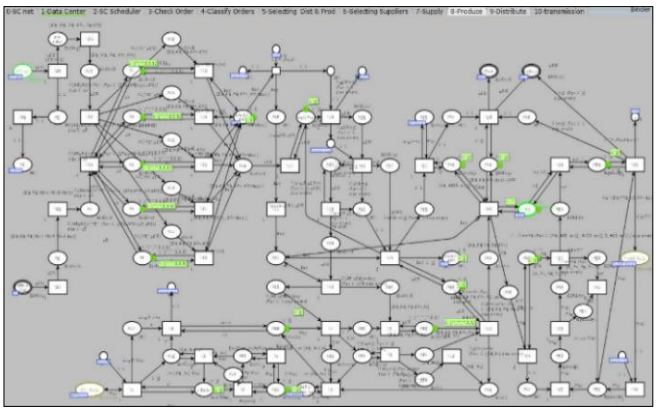
شکل ۹. ماژول شماره ۳ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره



شکل ۱۰. ماژول شماره ۴ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره



شکل ۱۱. ماژول شماره ۶ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره



شکل ۱۲. ماژول شماره ۸ شبکه پتری شبیه‌سازی‌شده از زنجیره

۳-۴- ارزیابی و آزمایش

در این تحقیق برای بررسی عملکرد مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره موردنظر، روش طراحی آزمایش[1] (DOE) با استفاده از دو ابزار Matlab و Statgraphics بکار گرفته شده. [۳۱], [۳۶] با استفاده از روش طراحی آزمایش و با تغییر مقادیر ۲۵ مورد از مهمترین پارامترهای موجود در مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره، تعداد ۱۵ سناریو مختلف طراحی شدند. این پارامترها و بازه‌ی تغییرات آن‌ها برای طراحی سناریوهای مختلف، در جدول ۷ آورده شده‌است.

پس از طراحی سناریوها، به منظور ارزیابی عملکرد راه‌حل پیشنهادی، هر سناریو دوبار مورد آزمایش قرار گرفت، یک بار با راه‌حل پیشنهادی این تحقیق و یک بار هم با راه‌حل مشابهی، با عنوان "روش بهینه[2]" و در نهایت، نتایج حاصل از آزمایش‌های این دو راه‌حل با یکدیگر مقایسه شدند. برای پیاده‌سازی روش بهینه از مقاله [۳۷] استفاده شده است. این مقاله صرفا بر روی انتخاب اجزا در یک لایه از زنجیره تأمین تمرکز دارد ولی به منظور مقایسه نتایج در پژوهش حاضر، این روش به تمام لایه‌های زنجیره تعمیم داده شده است. بدین‌صورت که در هر یک از لایه‌های توزیع، تولید و تأمین اجزای انجام‌دهنده سفارش به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که هزینه در آن لایه به حداقل برسد.

جدول ۷. بازه تغییرات پارامترهای مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره

ردیف	پارامتر	محدوده مقداردهی
۱	تعداد توزیع‌کننده‌ها	۲ تا ۶ عدد
۲	ظرفیت انبار هر توزیع‌کننده	۵۰ تا ۲۵۰ قلم
۳	موجودی اولیه هر توزیع‌کننده	۰ تا ۱۰۰ قلم
۴	قیمت توزیع هر قلم محصول در هر توزیع‌کننده	۱۰۰ تا ۱۵۰
۵	تعداد حمل‌کننده‌های لایه توزیع	تعداد توزیع‌کننده‌ها
۶	ظرفیت حمل‌کننده‌های لایه توزیع	۱۰۰ تا ۳۰۰ قلم
۷	تعداد تولیدکننده‌ها	۲ تا ۵ عدد
۸	ظرفیت تولید در روز هر تولیدکننده	۴۰ تا ۸۰ قلم
۹	حداکثر مقدار رزرو هر تولیدکننده	۲۰۰ تا ۴۰۰ قلم
۱۰	قیمت تولید هر قلم محصول در هر تولیدکننده	۵۰ تا ۱۰۰
۱۱	تعداد حمل‌کننده‌های لایه تولید	تعداد تولیدکننده‌ها
۱۲	ظرفیت حمل‌کننده‌های لایه تولید	۱۰۰ تا ۴۰۰ قلم
۱۳	تعداد تأمین‌کننده‌ها	بین ۲ تا ۷ عدد
۱۴	ظرفیت تأمین روزانه هر تأمین‌کننده برای ماده ۱	۰ تا ۲۰۰ قلم ماده
۱۵	ظرفیت تأمین روزانه هر تأمین‌کننده برای ماده ۲	۰ تا ۲۰۰ قلم ماده
۱۶	ظرفیت تأمین روزانه هر تأمین‌کننده برای ماده ۳	۰ تا ۲۰۰ قلم ماده
۱۷	قیمت تأمین هر قلم ماده در هر تأمین‌کننده	بین ۱ تا ۵
۱۸	تعداد حمل‌کننده‌های لایه تأمین	تعداد تأمین‌کننده‌ها
۱۹	ظرفیت حمل‌کننده‌های لایه تأمین	۲۰۰ تا ۵۰۰ قلم
۲۰	تعداد رویدادهای بلادرنگ لایه توزیع	۰ تا ۵ رویداد
۲۱	تعداد رویدادهای بلادرنگ لایه تولید	۰ تا ۵ رویداد
۲۲	تعداد رویدادهای بلادرنگ لایه تأمین	۰ تا ۵ رویداد
۲۳	تعداد رویدادهای بلادرنگ حمل‌کننده‌ها	۰ تا ۵ رویداد
۲۴	تعداد محصول در هر سفارش مشتری	۱ تا ۱۰۰ قلم
۲۵	تعداد سفارش‌های ورودی به زنجیره	۱۵ تا ۶۰ سفارش

[1] Design of experiment

[2] Optimal method

پس از طراحی سناریوهای مختلف، راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهینه بر روی هر یک از سناریوها آزمایش شدند و ۳ شاخص هزینه و ۳ شاخص زمان به عنوان شاخص‌های خروجی هر یک از آزمایش‌ها محاسبه شدند. این شاخص‌های خروجی عبارت‌اند از:

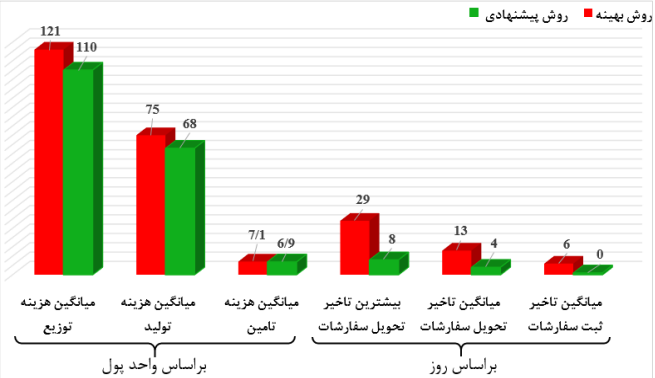
شاخص‌های زمانی

۱. میانگین تأخیر ثبت سفارش‌های ورودی(MRD[1])
۲. میانگین تأخیر تحویل سفارش‌های ثبت‌شده (MDD[2])
۳. بیشترین فاصله ورود و تحویل سفارش (MD[3])

شاخص‌های هزینه

۱. میانگین هزینه توزیع (MDC[4])
۲. میانگین هزینه تولید (MPC[5])
۳. میانگین هزینه تأمین (MSC[6])

به عنوان نمونه، مقادیر شاخص‌های خروجی حاصل از آزمایش سناریو اول، با روش پیشنهادی و روش بهینه در شکل ۱۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۳. نمودار مقایسه شاخص‌های خروجی حاصل از روش پیشنهادی و روش بهینه در آزمایش سناریو اول

همانطور که در شکل فوق قابل مشاهده است، مثلا در آزمایش سناریو اول میانگین تأخیر تحویل سفارشات، با راه‌حل پیشنهادی برابر ۴ روز است در حالیکه با راه‌حل بهینه برابر ۱۳ روز می‌باشد. همچنین جدول ۸ مقادیر شش شاخص خروجی حاصل از آزمایشات راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهینه را در ۱۵ سناریو مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۸. مقادیر شاخص های خروجی حاصل از آزمایشات سناریوها

سناریو	روش	MRD	MDD	MD	MDC	MPC	MSC
۱	بهینه	۶	۱۳	۲۹	۱۲۱	۷۵	۷,۱
	پیشنهادی	۰	۴	۸	۱۱۰	۶۸	۶,۹
۲	بهینه	۷	۱۴	۴۹	۱۵۲	۷۳	۸,۴
	پیشنهادی	۰	۹	۳۳	۱۲۱	۷۰	۹
۳	بهینه	۴	۱۰	۲۵	۹۹	۵۰	۱۰,۲
	پیشنهادی	۰	۴	۷	۹۸	۴۶	۹,۹
۴	بهینه	۱	۷	۲۳	۱۲۳	۶۳	۷,۵
	پیشنهادی	۰	۳	۷	۱۰۶	۶۱	۴,۵
۵	بهینه	۵	۹	۲۱	۹۶	۷۱	۱۱,۱
	پیشنهادی	۰	۳	۶	۹۱	۵۷	۱۰,۲
۶	بهینه	۵	۹	۱۶	۱۳۵	۸۰	۶,۶
	پیشنهادی	۰	۳	۵	۱۳۰	۵۵	۶,۷
۷	بهینه	۹	۲۷	۴۴	۱۵۰	۸۶	۶,۹
	پیشنهادی	۰	۱۳	۳۶	۱۲۷	۷۱	۷,۵
۸	بهینه	۱	۵	۱۷	۱۱۲	۶۴	۵,۱
	پیشنهادی	۰	۳	۵	۱۰۵	۵۹	۳
۹	بهینه	۲	۷	۳۰	۱۲۰	۸۰	۶,۹
	پیشنهادی	۰	۳	۶	۱۰۸	۶۹	۳,۹
۱۰	بهینه	۱۱	۹	۲۲	۱۱۱	۷۱	۷,۵
	پیشنهادی	۰	۴	۷	۹۸	۶۸	۷,۲
۱۱	بهینه	۳	۵	۱۳	۱۲۲	۷۵	۵,۷
	پیشنهادی	۰	۳	۶	۱۱۰	۵۸	۵,۴
۱۲	بهینه	۱۲	۳۲	۵۲	۱۶۸	۸۷	۹,۳
	پیشنهادی	۲	۱۶	۴۳	۱۳۵	۸۱	۱۰,۸
۱۳	بهینه	۴	۷	۲۱	۱۱۲	۷۰	۶,۳
	پیشنهادی	۰	۳	۶	۹۵	۵۹	۳,۹
۱۴	بهینه	۰,۵	۴	۱۲	۱۱۸	۶۱	۳,۶
	پیشنهادی	۰	۱,۵	۵	۱۱۱	۵۵	۳
۱۵	بهینه	۱	۶	۲۱	۱۲۸	۷۶	۸,۴
	پیشنهادی	۰	۳	۸	۱۰۷	۶۲	۶,۹

[1] Mean registration delay
[2] Mean delivery delay
[3] Max delay
[4] Mean distribution cost
[5] Mean Production cost
[6] Mean supply cost

۴- بررسی نتایج

۴-۱- بررسی نتایج مقایسه عملکرد راه‌حل بهینه و راه‌حل پیشنهادی از نظر شاخص‌های خروجی

نتایج موجود در جدول ۴ نشان می‌دهند که راه‌حل پیشنهادی هم از نظر شاخص‌های هزینه هم از نظر شاخص‌های زمانی، عملکرد بهتری را نسبت به راه‌حل بهینه ارائه می‌دهد. به منظور ارزیابی دقیق‌تر نتایج، با استفاده از معیار MAPE[1] (میانگین درصد خطای مطلق) میزان بهبود نتایج راه‌حل پیشنهادی نسبت به راه‌حل بهینه، در هریک از شش شاخص خروجی محاسبه شده و مقادیر آن‌ها در جدول ۹ آورده شده‌است.

جدول ۹. مقادیر بهبود شاخص‌های خروجی، در راه‌حل پیشنهادی نسبت به راه‌حل بهینه با توجه به معیار MAPE

شاخص خروجی	MAPE
میانگین هزینه توزیع	۱۰,۹
میانگین هزینه تولید	۱۲,۸
میانگین هزینه تأمین	۱۷,۷
میانگین تأخیر در ثبت	۹۸,۸
میانگین تأخیر در تحویل	۵۳,۸
بیشترین تأخیر در تحویل	۵۹,۱

بنابراین، با استناد به مقادیر موجود در جدول ۹، می‌توان گفت که براساس معیار MAPE، عملکرد راه‌حل پیشنهادی به طور میانگین، از نظر شاخص‌های هزینه حدود ۱۳,۸ درصد و از نظر شاخص‌های زمانی حدود ۷۰,۵ درصد نسبت به راه‌حل بهینه، بهبود داشته است. با توجه به اینکه وجه تمایز اصلی این تحقیق با تحقیقات گذشته از جمله راه‌حل بهینه، ارائه یک رویکرد موثر و بلادرنگ در تقلیل اثرات منفی رویدادهای مختل‌کننده سفارش‌های زنجیره می‌باشد که در کنار یک رویکرد مسیریابی چندمعیاره برای سفارش‌های زنجیره ارائه شده‌است، نتایج حاصله از دو جهت قابل توجیه هستند:

۱. همانطور که بیان شد، راه‌حل بهینه در تخصیص اجزا به سفارش‌ها، تنها قیمت اجزا را مدنظر قرار می‌دهد. در صورتیکه ویژگی‌هایی مانند ظرفیت رزرو شده و توان کارکرد روزانه اجزای انتخابی برای هر سفارش، مستقیما در سرعت و زمان انجام سفارش توسط آن جزء موثر است. به همین دلیل راه‌حل پیشنهادی این پژوهش، با درنظر گرفتن همزمان چندین معیار در انتخاب اجزا، از جمله: هزینه تأمین، تولید یا توزیع، توان عملیاتی روزانه اجزا، حجم سفارش‌های رزروشده برای اجزا و ...، توانسته است در عین عدم افزایش چشم‌گیری در پیچیدگی محاسباتی، نتایج بهتری را نسبت به راه‌حل بهینه بدست آورد.

۲. همچنین راه‌حل بهینه در مواجهه با رویدادهای مختل‌کننده، هیچگونه اقدام اصلاح‌کننده‌ای را در جهت کاهش اثرات مخرب این رویدادها، انجام نمی‌دهد و در صورتیکه فرآیند آماده‌سازی یک سفارش بر اثر یکی از این رویدادها مختل شود، راه‌حل بهینه، کل فرآیند تخصیص اجزا و آماده‌سازی سفارش مورد نظر را مجددا از ابتدا تکرار می‌کند. روشن است که چنین رویکردی، منجر به اتلاف زمان زیادی می‌شود و در نتیجه باعث افزایش تأخیر و هزینه در انجام سفارش‌های زنجیره خواهد شد. در صورتیکه راه‌حل پیشنهادی این تحقیق، رویکرد کاملا متفاوت و کارآمدی را در مواجهه با رویدادهای مختل‌کننده سفارش‌ها، اجرا می‌کند که در بخش قبل به تفصیل بیان شد.

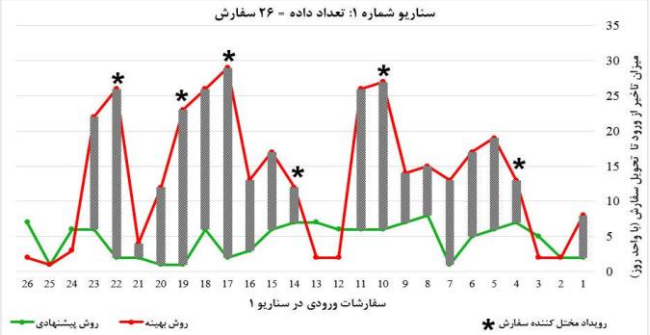
۴-۲- بررسی نتایج مقایسه عملکرد راه‌حل بهینه و راه‌حل پیشنهادی در مواجه با رویدادهای مخرب

نمودارهای موجود در شکل‌های ۱۴-۱۶ میزان تأخیر از ورود تا تحویل سفارش‌ها را در آزمایش سناریوهای اول، دوم و سوم، با دو راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهنیه، نشان می‌دهند. به منظور بررسی تاثیر رویدادهای مخرب در میزان تأخیر تحویل سفارش‌ها، تمام سفارش‌هایی که در فرآیند آماده‌سازی آن‌ها، رویداد مخربی رخ داده‌است، با علامت (*) مشخص شده‌اند. نتایج مشابه این نمودارها از تمام ۱۵ سناریو بدست آمده است و نتایج سناریوهای ۱-۳ به عنوان نمونه در اینجا ذکر شده‌اند.

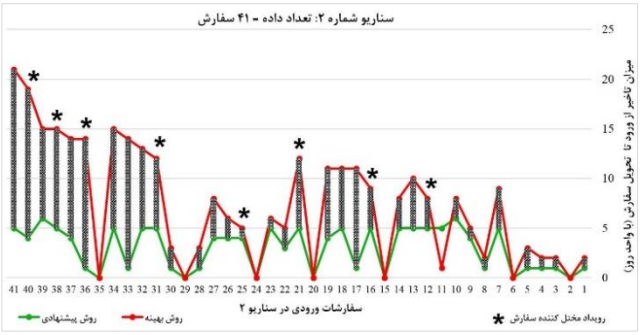
همانطور که در نمودارها مشهود است، در راه‌حل بهینه، هنگام بروز رویداد/های مخرب در فرآیند آماده‌سازی یک سفارش، میزان تأخیر تحویل آن سفارش و چند سفارش بعد از آن، نسبت به سفارش‌های قبلی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. درحالی‌که در راه‌حل پیشنهادی، وقوع رویداد/های مخرب در فرآیند آماده‌سازی یک سفارش، افزایش جزئی در میزان تأخیر تحویل آن سفارش و سفارش‌های بعدی، ایجاد می‌کند. به بیان دیگر، نمودارهای مربوط به راه‌حل پیشنهادی روند نسبتا یکنواختی را در تمامی سفارش‌ها دارند، چه در سفارش‌هایی که مشکلی در مسیر آماده‌سازی آنها وجود نداشته و چه در سفارش‌هایی که با رویداد مختل‌کننده‌ای مواجه شده‌اند. از مشاهده این روند می‌توان نتیجه گرفت که رویکرد راه‌حل پیشنهادی، در مواجهه با رویدادهای مخرب به میزان قابل توجهی موثر هستند و تا حد زیادی اثرات منفی این رویدادها را کاهش داده‌است. در صورتیکه در نمودارهای مربوط به راه‌حل بهینه،

[1] Mean absolute percentage error

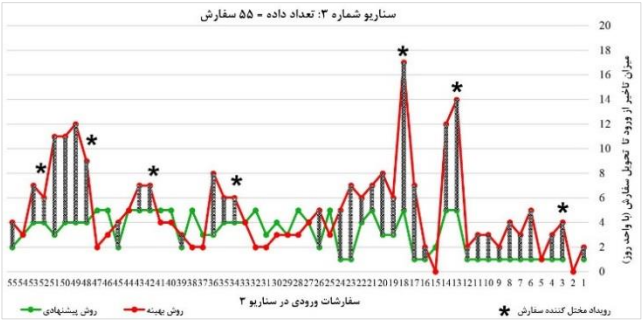
این رویدادها تاثیر زیادی در افزایش تأخیر تحویل سفارش‌ها دارند.



شکل ۱۴. نمودار مقایسه تاثیر رویدادها در تأخیر۱ تحویل سفارش‌های سناریو شماره ۱

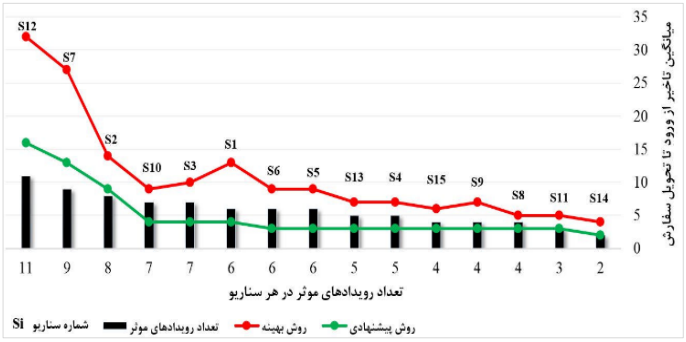


شکل ۱۵. نمودار مقایسه تاثیر رویدادها در تأخیر تحویل سفارش‌های سناریو شماره ۲



شکل ۱۶. نمودار مقایسه تاثیر رویدادها در تأخیر تحویل سفارش‌های سناریو شماره ۳

به منظور مقایسه دقیق‌تر عملکرد راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهینه، در شکل ۱۷ نمودار تغییر شاخص "میانگین تأخیر تحویل سفارش‌ها" با افزایش "تعداد رویدادهای مخرب" با توجه به نتایج حاصل از آزمایش کل سناریوها، رسم شده است.



شکل ۱۷. نمودار مقایسه تغییرات میانگین تأخیر تحویل سفارش‌ها، با افزایش تعداد رویدادهای مخرب

همانطور که از تغییرات نمودار فوق مشهود است، با افزایش تعداد رویدادهای مخرب، میانگین تأخیر تحویل سفارش‌ها، هم در راه‌حل بهینه هم در راه‌حل پیشنهادی، روندی صعودی داشته و افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که در راه‌حل بهینه با افزایش تعداد رویدادهای مخرب، تأخیر تحویل سفارش‌ها نسب به راه‌حل پیشنهادی، مقدار بسیار بیشتری افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در راه‌حل بهینه، میزان تأخیر تحویل، در سناریو ۱۴ (با ۲ رویداد مخرب)، برابر با ۴ روز و در سناریو ۱۲ (با ۱۱ رویداد مخرب) برابر با ۳۲ روز می‌باشد، یعنی با افزایش تعداد رویدادهای مخرب از تعداد ۲ به ۱۱ ، شاخص میانگین تأخیر تحویل سفارش‌ها در راه‌حل بهینه، ۲۸ روز و در راه‌حل پیشنهادی، فقط ۱۴ روز افزایش می‌یابد. یعنی در راه‌حل پیشنهادی میزان افزایش تأخیر به اندازه نصف راه‌حل بهینه بوده است.

علت حصول این نتایج را می‌توان در تفاوت عملکرد دو راه‌حل در مواجهه با رویدادهای مخرب جستجو کرد. همانطور که بیان شد، عملکرد راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهینه در مواجهه با رویدادهای بلادرنگ نوع سوم که منجر به از کار افتادن جزء یا اجزای تخصیص‌یافته به یک سفارش، در حین فرآیند آماده‌سازی آن سفارش می‌شوند، به صورت زیر می‌باشد:

راه‌حل بهینه:

۱. اطلاع از وقوع رویداد پس از بروز تاثیرات مخرب آن در عملکرد زنجیره (در فاصله یک تا چند روزه از وقوع رویداد)
۲. متوقف‌شدن فرآیند آماده‌سازی سفارش
۳. لغو رزرو اجزای تخصیص‌یافته به سفارش از هر سه لایه
۴. افزودن سفارش، به لیست سفارشاهای ثبت‌نشده
۵. انتظار برای آزادشدن ظرفیت لازم در هر سه لایه از زنجیره
۶. اجرای مجدد مراحل مسیریابی و تخصیص اجزا به سفارش با الگوریتم بهینه
۷. شروع مجدد مراحل آماده‌سازی سفارش از ابتدا

راه‌حل پیشنهادی:

۱. اطلاع از وقوع رویداد به صورت بلادرنگ در همان لحظه‌ی رخداد، به وسیله فناوری اینترنت اشیا
۲. تعلیق سفارش‌های متاثر از رویداد
۳. قراردادن سفارش‌های معلق در اولویت اول تخصیص اجزا
۴. انتظار برای آزادشدن ظرفیت در لایه‌ی موردنظر (لایه‌ی مربوط به جزء یا اجزای از کارافتاده در اثر رویداد)
۵. تخصیص جزء جایگزین به جای جزء از کار افتاده
۶. ادامه روند آماده‌سازی سفارش از لایه‌ای که اختلال در آن لایه رخ داده بود

با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها، ملاحظه می‌شود که رویکرد پیشنهادی این تحقیق، در مواجهه با رویدادهای مخرب بسیار موثرتر از رویکرد راه‌حل بهینه است. زیرا راه‌حل پیشنهادی، با به کارگیری و استفاده از فناوری اینترنت اشیا در جمع‌آوری و انتقال بلادرنگ داده‌ها، رویدادهای مخرب را دقیقا به محض وقوع، شناسایی کرده و در سریع‌ترین زمان ممکن اقدامات لازم را جهت کاهش اثرات منفی این رویدادها انجام می‌دهد. این در حالی است که در راه حل بهینه، رویدادهای مخرب نه تنها در زمان وقوع و ورود به زنجیره شناسایی نمی‌شوند بلکه پس از اینکه در فرآیندهای جاری زنجیره اختلال ایجاد کردند، شناسایی خواهند شد. در واقع امکان دارد یک رویداد مخرب چندین روز پس از وقوعش شناسایی شود که همین تأخیر در شناسایی رویدادهای مخرب، اثرات منفی آن‌ها را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. علاوه براین در راه‌حل بهینه، با از کار افتادن یک جزء از اجزای تخصیص‌یافته به سفارش، کل فرآیند انجام‌شده برای مسیریابی و آماده‌سازی آن سفارش مجددا از ابتدا تکرار می‌شود و این امر باعث اتلاف زمان و منابع به کارگرفته‌شده برای آن سفارش (منابعی که قبل از بروز اختلال در اجزای آن سفارش، برای آماده‌سازی آن به کار گرفته شده‌اند) خواهد شد. ولی راه‌حل پیشنهادی، با اولویت قراردادن سفارش‌های مختل‌شده (معلق) در تخصیص اجزا، فرآیند آماده‌سازی سفارش‌های مختل‌شده را از همان لایه‌ای که اختلال در آن رخ داده‌بود ادامه می‌دهد، بنابراین در راه‌حل پیشنهادی از اتلاف زمان و منابع صرف‌شده برای سفارش جلوگیری می‌شود.

۵- جمع‌بندی

بیان شد که با توجه به پویایی ذاتی زنجیره تأمین و محیط آن، لازمه مدیریت بهینه در راه‌حل تولید براساس سفارش، منعطف بودن زنجیره تأمین است. بدین معنی که زنجیره تأمین قابلیت دریافت رویدادهایی را که در محیط درونی و پیرامونی آن رخ می‌دهند، به صورت آنی و لحظه‌ای داشته باشد و همچنین بتواند به صورت بلادرنگ در رابطه با این رویدادها تصمیم‌گیری کرده و پاسخ مناسب ارائه دهد. لذا با توجه به هدف اصلی مدیریت زنجیره تأمین، که تصمیم‌گیری برای انتخاب مسیر انجام سفارش‌ها و تعیین اجزای انجام‌دهنده آن‌هاست، این مطالعه به ارائه یک سیستم تصمیم‌گیری بلادرنگ در مدیریت زنجیره تأمین با راه‌حل تولید براساس سفارش می‌پردازد، و برای دریافت و انتقال اطلاعات محیط درونی و بیرونی زنجیره، از فناوری اینترنت اشیا بهره می‌برد که کاملا منطبق بر ماهیت پویای زنجیره تأمین است. به منظور شبیه‌سازی زنجیره تأمین موردنظر، از شبکه‌های پتری توسعه‌یافته با رنگ و زمان استفاده شده‌است که امکان ایجاد یک مدل گرافیکی از زنجیره تأمین را فراهم می‌کند. مدل طراحی‌شده از زنجیره، دارای ۳ لایه‌ی اصلی شامل: لایه‌ی تأمین، لایه‌ی تولید، لایه‌ی توزیع و سه لایه‌ی فرعی حمل‌ونقل می‌باشد، که در قالب یک شبکه‌ی پتری ماژولار با ۱۰ زیر شبکه پیاده‌سازی شده‌اند.

عملکرد مدل شبیه‌سازی‌شده از زنجیره بدین صورت است که انتخاب اجزا برای هر سفارش ورودی، در هریک از لایه‌ها، با استفاده از یک تصمیم‌گیری چندمعیاره براساس معیارهای ۱-ظرفیت تأمین یا تولید یا توزیع روزانه ۲-قیمت و ۳-ظرفیت آزاد اجزای آن لایه انجام می‌شود. پس از انتخاب و تخصیص اجزا و مشخص شدن مسیر آماده‌سازی هر سفارش، سفارش موردنظر وارد فرآیند آماده-سازی شده و در نهایت توسط لایه‌ی حمل‌ونقل به مشتری تحویل داده می‌شود. همچنین در طول فعالیت مدل زنجیره تأمین، علاوه بر ورود سفارش‌ها، اطلاعات رویدادهای محیطی زنجیره نیز به صورت لحظه‌ای مخابره می‌شوند. در این مطالعه سه نوع از رویدادهای زنجیره تأمین، مدلسازی شده‌اند که نوع سوم آن‌ها رویدادهای مختل‌کننده می‌باشند. بروز هر رویداد مختل‌کننده، منجر به از کارافتادن یک یا چند جزء از اجزای فعال زنجیره می‌شود که در نتیجه، باعث ایجاد خلل در فرآیند آماده‌سازی سفارش‌های تخصیص‌یافته به آن جزء خواهدشد. در این وضعیت، راه‌حل پیشنهادی این تحقیق، به کمک فناوری اینترنت اشیا، در سریع‌ترین زمان ممکن با یک رویکرد موثر اقدام به جایگزین کردن جزء یا اجزای از کارافتاده می‌کند تا اثرات منفی این رویدادهای مختل‌کننده را تا حد امکان کاهش دهد.

در نهایت به منظور ارزیابی راه‌حل پیشنهادی، تعداد ۱۵ سناریو با استفاده از روش DOE طراحی شدند و هر سناریو یکبار با راه‌حل پیشنهادی این پژوهش و یکبار با روش یک مقاله مشابه (روش بهینه) مورد آزمایش قرار گرفت و میزان بهبود نتایج در راه‌حل

پیشنهادی با استفاده از معیار MAPE محاسبه شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در تمامی سناریوها، راه‌حل پیشنهادی، تأخیر زمانی کمتری در ثبت و تحویل سفارش‌ها داشته است، همچنین در راه‌حل پیشنهادی، هزینه توزیع و تولید سفارش‌ها در تمامی سناریوها و هزینه تأمین سفارش‌ها در اکثر سناریوها، نسبت به راه‌حل بهینه کمتر است. حصول این نتیجه به این دلیل است که در راه‌حل پیشنهادی این مطالعه، برخلاف راه‌حل بهنیه که تنها براساس معیار هزینه تصمیم‌گیری می‌کند، تصمیم‌گیری به صورت چندمعیاره انجام می‌شود. همچنین راه‌حل پیشنهادی در برخورد با رویداهای مختل‌کننده، اقدامات بلادرنگی را برای جایگزینی اجزا و از سرگیری فرآیند انجام سفارش‌های مختل‌شده اجرا می‌کند. در صورتیکه راه‌حل بهنیه هیچگونه اقدامات تصحیح‌کننده‌ای در مقابل این رویدادها انجام نمی‌دهد.

۵-۱- کارهای آتی

به منظور توسعه‌ی این تحقیق، پیشنهادات زیر ارائه می‌شوند:

- به منظور دستیابی بیشتر، به پویایی محیط واقعی می‌توان انواع بیشتری از رویدادهای احتمالی (علاوه بر رویدادهای موجود در این مطالعه) را از محیط درونی و پیرامونی زنجیره شناسایی و در مدل زنجیره شبیه‌سازی کرد.
- می‌توان یک سیستم امتیازدهی طراحی کرد که عملکرد هر یک از اجزای زنجیره را از نظر هزینه و زمان انجام سفارش ارزیابی کرده و با ایجاد یک محیط رقابتی بین اجزای زنجیره، اجزایی که دارای امتیاز کمتری هستند از زنجیره حذف و اجزای جدید جایگزین آن‌ها شوند. در این صورت بهره‌وری و کارایی زنجیره همواره بهبود می‌یابد.
- برای سرعت بخشیدن به آزمایش‌ها و ایجاد امکان آزمایشِ تعداد بالایی از سفارش‌های ورودی با راه‌حل پیشنهادی، می‌توان کدهای دستوری مدل ارائه‌شده را با پلتفرم‌های برنامه‌نویسی مانند زبان پایتون نیز پیاده‌سازی کرد.
- در زنجیره تأمین مدل‌شده در این تحقیق، فرض بر این است که تنها یک نوع محصول و صرفا از سه نوع ماده اولیه، تأمین و تولید می‌شود. به منظور شبیه‌سازی زنجیره‌های پیچیده‌تر، می‌توان تعداد محصولات تولیدی زنجیره، همچنین تعداد مواد اولیه‌ی لازم برای تولید محصولات را افزایش داد.
- می‌توان یک سیستم برای شخصی‌سازی سفارش نیز به مدل زنجیره افزود. بدین صورت که مشتری در هنگام سفارش‌دهی، قیمت و زمان مورد نظر خود را برای سفارشش اعلام کند و زنجیره نزدیکترین مسیر ممکن را به شرایط مورد نظر مشتری برای آن سفارش انتخاب کند.
- نظر به اینکه عملکرد بخش حمل‌ونقل در بین لایه‌های مختلف زنجیره تأمین، نقش بسیاری مهمی در بهروه‌وری نهایی زنجیره دارد، می‌توان با ترکیب مدل ارائه‌شده با یکی از مدل‌های شبیه‌سازی دقیق لجستیک، بخش حمل‌ونقل بین لایه‌های زنجیره تأمین را که به صورت جزئی در این تحقیق به آن‌ها پرداخته شده‌است، تا حد زیادی بهبود بخشید.

مراجع

[1] Lambert, D.M. and M.C. Cooper, "*Issues in supply chain management.* Industrial marketing management," 29(1): p. 65-83, 2000.

[2] Christopher, M. and M. Holweg, *"Supply Chain 2.0": Managing supply chains in the era of turbulence."* International journal of physical distribution & logistics management, 41(1): p. 63-82, 2011.

[3] S. Chopra, *Supply chain management: strategy, planning, and operation*, 7th ed. Pearson, 2019.

[4] Liu, R., A. Kumar, and W. Van Der Aalst, "*A formal modeling approach for supply chain event management."* Decision Support Systems, 43(3): p. 761-778, 2007.

[5] Xu, L., et al., *Towards autonomous supply chains: Definition, characteristics, conceptual framework, and autonomy levels.* Journal of Industrial Information Integration, 2024. 42: p. 100698.

[6] Ben-Daya, M., E. Hassini, and Z. Bahroun, "*Internet of things and supply chain management." a literature review.* International journal of production research, 57(15-16): p. 4719-4742, 2019.

[7] Abdel-Basset, M., G. Manogaran, and M. Mohamed, "*Internet of Things (IoT) and its impact on supply chain: A framework for building smart, secure and efficient systems."* Future generation computer systems, 86(9): p. 614-628, 2018.

[8] Mims, C, "*Here's the one thing someone needs to invent before the internet of things can take off."* Backbone Magazine, February–March, p. 12-13, 2013.

[9] Gubbi, J., et al., "*Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions."* Future generation computer systems, 29(7): p. 1645-1660, 2013.

[10] Ellis, S., H.D. Morris, and J. Santagate, "*IoT-enabled analytic applications revolutionize supply chain planning and execution."* International Data Corporation (IDC) White Paper, 13: p. 259697, 2015.

[11] Drakaki, M. and P. Tzionas, "*Investigating the impact of inventory inaccuracy on the bullwhip effect in RFID-enabled supply chains using colored petri nets."* Journal of Modelling in Management, 14(2): p. 360-384, 2019.

[12] Wang, J., et al., "*An intelligent logistics service system for enhancing dispatching operations in an IoT environment."* Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 135: p. 101886, 2020.

[13] Al-Rakhami, M.S. and M. Al-Mashari, "*A blockchain-based trust model for the internet of things supply chain management."* Sensors, 21(5): p. 1759, 2021.

[14] Nachet, B., M. Frendi, and A. Adla, *Physical Internet Enabled Traceability Systems for Sustainable Supply Chain Management.* Journal of Information and Organizational Sciences, 2024. 48(1): p. 99–116.

[15] Kayvanfar, V., et al., *A review of decision support systems in the internet of things and supply chain and logistics using web content mining.* Supply Chain Analytics, 2024: p. 100063.

[16] Serpanos, D., *Industrial internet of things: Trends and challenges.* Computer, 2024. 57(1): p. 124–128.

[17] Ehteshami, M., et al., *Identifying and ranking factors affecting the digital transformation strategy in Iran's road freight transportation industry focusing on the Internet of Things and data analytics.* Journal of Information and Communication Technology, 2024. 16(59): p. 33–46.

[18] Monfared, N.T., A. Shayan, and a.r. ghotri, *The effect of Internet of Things (IOT) implementation on the Rail Freight Industry; A futures study approach.* Journal of Information and Communication Technology, 2023. 15(55): p. 191–207.

[19] Balamurugan, S., A. Ayyasamy, and K.S. Joseph, "*Enhanced petri nets for traceability of food management using internet of things."* Peer-to-Peer Networking and Applications, 14. p. 30-43, 2021.

[20] Fierro, L.H., R.E. Cano, and J.I. García, "*Modelling of a multi-agent supply chain management system using Colored Petri Nets."* Procedia Manufacturing, 42: p. 288-295, 2020.

[21] Van der Aalst, W., "*Putting high-level Petri nets to work in industry.* Computers in industry," 25(1): p. 45-54, 1994.

[22] Cavalcante, I.M., et al., "*A supervised machine learning approach to data-driven simulation of resilient supplier selection in digital manufacturing."* International Journal of Information Management, 49: p. 86-97, 2019.

[23] Jalali, S., S.A.H. Golpayegani, and H. Ghavamipoor. "*Designing a model of decision making in layers of supply, manufacturing, and distribution of the supply chain: A recommender-based system*." in *8th International Conference on e-Commerce in Developing Countries: With Focus on e-Trust*. IEEE, 2014.

[24] Mazzuto, G., M. Bevilacqua, and F.E. Ciarapica, "*Supply chain modelling and managing, using timed coloured Petri nets: a case study."* International Journal of Production Research, 50(16): p. 4718-4733, 2012.

[25] Li, Z., et al. "*Supplier selection decision-making in supply chain risk scenario using agent based simulation*." in *2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. IEEE, 2015.

[26] Jensen, K., "*Seventh Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools,"* Aarhus, Denmark, October 24-26, 2006(579). DAIMI Report Series, 2006.

[27] Santana-Robles, F., et al., "*Modeling and simulation of textile supply chain through colored Petri nets."* Intelligent Information Management, 4(5A): p. 261, 2012.

[28] Tools, C., *A tool for editing, simulating, and analyzing Colored Petri nets.*: http://www.cpntools.org/ 20. 2018.

[29] Ballman, K., "*Coloured petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use," volume 3.* The American Mathematical Monthly, 105(5): p. 493, 1998.

[30] Jensen, K. and L.M. Kristensen, "*Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems."* Aarhus, Denmark: Springer-Verlag, 2009.

[31] DOE with MATLAB 1. Available from: https://icme.hpc.msstate.edu/mediawiki/index.php/DOE_with_MATLAB_1.html.

[32] Saif, O.M., et al., Analyzing Supply Chain Structures with Petri Nets: A Composition-Based Approach, in Future Directions in Energy Engineering: Challenges, Opportunities, and Sustainability. 2024, Springer. p. 133–140.

[33] Cao, E.-Z., et al., *Hybrid Modeling and Fuzzy Control Via Petri Nets for Supply Chain Networks Under Disruptions.* IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2025.

[34] Skorupski, J., et al., *Petri nets-based method for operational risk analysis in supply chains based on timeliness and recovery time.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2024. 238(3): p. 523–539.

[35] Kaiyandra, D.R., F. Farizal, and N. Rakoto, *Colored Petri Nets for Modeling and Simulation of a Green Supply Chain System.* IFAC-PapersOnLine, 2024. 58(1): p. 306–311.

[36] Statgraphics Technologies, I. 2023 [cited 2023; Available from: www.statgraphics.com.

[37] GHEYDAR, K.J., S. GHODSIPOUR, and G.S. FATEMI, "*Supply chain optimization policy for a supplier selection problem: a mathematical programming approach.*" 2010.