



A Simulation-Based Bi-Objective Optimization Model for Supply Chain Inventory Replenishment: A Case Study of the Electric Industry

Behzad Moghimi Shahri*^{ID}
Ali Khatami Firouzabadi**^{ID}
Maghsoud Amiri***^{ID}
Parham Azimi****^{ID}

Extended Abstract

Introduction: The electricity sector plays a crucial role in the country's economy. Therefore, any disruptions in the supply chain of this industry can result in the loss of economic benefits and decrease the competitiveness of industries dependent on this sector. The industry structure analysis of the electricity sector has shown that the lack of proper relationships between entities involved in the supply of goods and equipment leads to disruptions in the electricity supply chain. On the other hand, the specific political and economic conditions of the country, the presence of natural disasters, and high levels of change in the Middle East region have had significant impacts on increasing uncertainty at various levels of the supply chain in this sector. Considering the high uncertainty in the procurement of components in this industry, this study focuses on presenting a set of scenarios for replenishing goods in the supply chain entities of this sector.

Methods: To achieve this, a probabilistic four-echelon model consisting of a supplier, distributor, retailer, and customer was presented to minimize total inventory costs and the ratio of unmet customer demand based on the (R, Q) policy. Furthermore, by searching organizational documents, interviewing industry experts, and utilizing warehouse management software, data for the model was collected. Subsequently, through experimental design, initial solutions were provided for the differential evolutionary algorithm, and based on this algorithm, different values for reorder points and order quantities were determined. By employing simulation methods, the model's objective values were estimated, and the set of solutions was illustrated in a Pareto chart.

Received: Jan. 20, 2024; Revised: Feb. 22, 2024; Accepted: Sep. 10, 2024; Published Online: Sep. 21, 2024.

* Ph.D. student, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabatabai University, Tehran, Iran.

** Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabatabai University, Tehran, Iran.

Corresponding Author: a.khatami@atu.ac.ir

*** Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabatabai University, Tehran, Iran.

**** Associate Professor, Department of Industrial Engineering, School of Industrial and Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran.



Result and Discussion: Research findings have shown that increasing the average inventory levels of retailers' warehouses leads to a decrease in the proportion of unmet customer demand. This occurs when different reorder point values for two retailers have high levels, but considering the probabilistic demand function, the order quantity can vary. On the other hand, reducing ordering and inventory costs leads to an increase in unmet customer demand. In other words, when reorder point values and low order quantities lead to inventory reduction, customer dissatisfaction increases. The Differential Evolution Algorithm used in this study has accelerated the process of finding solutions and improved model efficiency. This algorithm considers values between high and low levels of reorder points and order quantities, presenting multiple objective function values. Utilizing simulation methods to estimate the probabilistic objective functions employed in the model has increased the speed of executing multiple scenarios, aiding in cost reduction and model execution time.


Conclusions: Based on the results of this research, electric equipment with high innovation should have a low reorder point and a high order quantity in the supply chain. This is because the short product lifespan renders the product obsolete along the chain, lacking customer demand and consequently increasing the chain's costs. The computational results of this study indicate that a 105% increase in inventory leads to a 104% increase in customer satisfaction and a 95% decrease in lost sales costs. However, considering the high purchasing costs and large product volume during ordering, a scenario aligned with financial conditions and warehouse capacity should be selected for chain entities.


Keywords: Supply Chain Management; Simulation; Design of Experiments; Differential Evolution Algorithm; (R, Q) Policy.


How to Cite: Moghimi Shahri, Behzad; Khatami Firouzabadi, Ali; Maghsoud, Amiri; Parham, Azimi; (2024). A simulation-based multi-objective optimization model for supply chain inventory replenishment. *Ind. Manag. Persp.*, 14(3), 236-260 (In Persian).



طراحی یک مدل دو هدفه بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای بازپرسازی موجودی زنجیره تأمین: مورد مطالعه صنعت برق

بهزاد مقیمی شهری* 

علی خاتمی فیروزآبادی** 

مقصود امیری*** 

پرهام عظیمی**** 

چکیده گسترده

مقدمه و اهداف: صنعت برق بخش مهمی از اقتصاد کشور را تشکیل می‌دهد. بنابراین، بروز اختلال در زنجیره تأمین این صنعت منجر به از بین رفتن منافع اقتصادی و کاهش توان رقابتی صنایع وابسته به این حوزه می‌شود. تحلیل ساختار صنعت برق نشان داده که عدم وجود روابط صحیح بین نهادهای مرتبط با تأمین کالا و تجهیزات، منجر به ایجاد اختلال در زنجیره تأمین برق می‌شود. از سوی دیگر، شرایط خاص سیاسی و اقتصادی کشور، وجود بلایای طبیعی و سطح بالای تغییرات در منطقه خاورمیانه تأثیرات قابل توجهی بر روی افزایش عدم قطعیت در سطوح مختلف زنجیره تأمین این حوزه گذاشته است. با توجه به عدم قطعیت بالا در تأمین قطعات این صنعت، در این پژوهش به ارائه مجموعه‌ای از سناریوهای بازپرسازی کالا در نهادهای زنجیره تأمین‌کنندگان تجهیزات این حوزه پرداخته شد.

روش‌ها: برای این منظور، یک مدل احتمالی چهار حلقه‌ای شامل تأمین‌کننده، توزیع‌کننده، خرده فروش و مشتری برای حداقل نمودن هزینه کل موجودی و نسبت تقاضای برآورده نشده مشتریان بر اساس سیاست (R, Q) ارائه گردید. همچنین از طریق جستجو در اسناد و مدارک سازمانی، مصاحبه با خبرگان صنعت و استفاده از نرم افزار مدیریت انبار داده‌های مدل جمع‌آوری شد و سپس با استفاده از طراحی آزمایشات مجموعه جواب اولیه برای الگوریتم تکاملی تفاضلی فراهم گردید و بر اساس این الگوریتم فراابتکاری، مقادیر مختلف نقطه سفارش مجدد و مقدار سفارش تعیین و با بکارگیری روش شبیه‌سازی مقادیر اهداف مدل تخمین زده شد و مجموعه راه‌حل‌ها در نمودار پارتو نشان داده شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱.

* دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران.

** استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: a.khatami@atu.ac.ir

*** استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران.

**** دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین، ایران.

یافته‌ها: یافته‌های تحقیق نشان داد که افزایش متوسط سطح موجودی انبارهای خرده‌فروشان منجر به کاهش نسبت تقاضای برآورده نشده مشتریان می‌گردد که این در زمان بالابودن مقادیر نقطه سفارش مجدد دو خرده فروش صورت می‌گیرد؛ ولی با توجه به تابع احتمالی تقاضای مشتریان، مقدار سفارش می‌تواند مقادیر متفاوتی را بگیرد. از طرفی، کاهش هزینه‌های سفارش‌دهی و انبار منجر به افزایش تقاضای برآورده نشده مشتریان می‌شود، به عبارت دیگر، زمانی که مقادیر نقطه سفارش مجدد کالا و مقدار سفارش پایین باشد منجر به کاهش موجودی انبار و افزایش ناراضی مشتریان می‌گردد. الگوریتم تکاملی تفاضلی بکار رفته در این پژوهش منجر به سرعت بخشیدن در یافتن راه‌حل و افزایش کارآمدی مدل شده است. این الگوریتم مقادیر بین سطوح بالا و پایین نقطه سفارش مجدد و مقدار سفارش را در نظر گرفته که مقادیر تابع هدف متعددی را نشان داده است. استفاده از روش شبیه‌سازی برای تخمین توابع اهداف احتمالی بکار رفته در مدل منجر به افزایش سرعت اجرای سناریوهای متعدد گردیده که در کاهش هزینه و زمان اجرای مدل کمک نموده است.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج این پژوهش، آن دسته از تجهیزات الکتریکی دارای سطح نوآوری بالا می‌بایست نقطه سفارش مجدد پایین و مقدار سفارش بالایی در زنجیره تأمین این صنعت داشته باشد؛ زیرا با توجه به طول عمر کوتاه محصول در طول زنجیره منسوخ و مستهلک گردیده و فاقد تقاضای مشتری خواهد شد و در نتیجه باعث افزایش هزینه زنجیره می‌گردد. نتایج محاسباتی این پژوهش نشان داد که افزایش ۱۰۵ درصدی کالاهای موجود در انبار منجر به افزایش ۱۰۴ درصدی سطح رضایت مشتریان و کاهش ۹۵ درصدی هزینه فروش ازدست رفته خواهد شد؛ ولی با توجه به هزینه بالای خرید و حجم زیاد محصول در هنگام سفارش می‌بایست سناریوی متناسب با شرایط مالی و ظرفیت انبار نهادهای زنجیره را انتخاب نمود.

کلیدواژه‌ها: مدیریت زنجیره تأمین؛ شبیه‌سازی؛ طراحی آزمایش‌ها؛ الگوریتم تکاملی تفاضلی؛ سیاست (R,Q).

استناددهی: مقیمی شهری، بهزاد؛ خاتمی فیروزآبادی، علی؛ امیری، مقصود؛ عظیمی، پرهام (۱۴۰۳). طراحی یک مدل دو هدفه بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای بازپرسازی موجودی زنجیره تأمین: مورد مطالعه صنعت برق. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴(۳)، ۲۳۶ – ۲۶۰.



۱. مقدمه

زنجیره تأمین سیستم پیچیده‌ای از نهادهای مختلف شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، خرده‌فروشان و مشتریانی است که می‌تواند سایر زنجیره‌ها را تحت تاثیر قرار دهد و به عبارت دیگر، آن‌ها را در مقابل اختلالات موثر بر روی عملکرد شرکت‌ها آسیب‌پذیر نماید [۲۵]. با توجه به مصرف بالای مشترکین برق در ایران و همچنین بالا بودن قیمت تجهیزات تولید و توزیع آن، بروز اختلال در زنجیره تأمین برق موجب اتلاف زیاد منابع می‌شود و از دیدگاه اقتصادی منجر به کاهش توان رقابتی و افزایش هزینه‌های مشترکین می‌گردد [۱]. در صورت عدم هماهنگی و تصمیم‌گیری نامناسب در سفارش‌دهی تجهیزات در سطوح مختلف زنجیره تأمین، میزان نوسانات در سفارش‌دهی نهادهای بالادستی به‌صورت فزاینده افزایش پیدا می‌کند که منجر به ایجاد اثر شلاقی می‌شود [۳۰]. اثر شلاقی نیز باعث افزایش سطح ضایعات در سطوح مختلف زنجیره تأمین می‌گردد، به‌عنوان مثال، میزان ضایعات تجهیزات الکتریکی در سال ۲۰۱۹ به ۵۳.۶ میلیون تن در سراسر جهان رسید که تنها ۱۷ درصد آن جمع‌آوری و بازیافت شد [۶].

با وجود این که آگاهی روزافزونی از مسائل و چالش‌های زنجیره تأمین صنعت برق حاصل شده است، اما رشد تقاضا، گسترده شدن شبکه تولید و توزیع و عدم قطعیت در پیش‌بینی تقاضای مصرف برق از یک سو و فشار واردشده بر شرکت‌ها از سوی جامعه و دولت‌ها برای در نظر گرفتن ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی در زنجیره تأمین از سوی دیگر منجر به ایجاد چالش در طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین این صنعت شده است [۲۳]. بنابراین، مدیران زنجیره تأمین و تصمیم‌گیرندگان این حوزه به ابزارهایی نیاز دارند تا بتوانند اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی را در زنجیره غیرقطعی محقق نمایند [۳۳].

ماهیت پویا و احتمالی کالاها و تجهیزات صنعت برق به علت تغییرات سریع و گرانی آن منجر به عدم قطعیت بالای داده‌های کالا در زنجیره تأمین این حوزه شده است. عدم قطعیت در داده‌ها به طور کلی به دو شکل نشان داده می‌شود؛ نوع اول با تصادفی بودن مشخص می‌شود که ناشی از ماهیت تصادفی پارامترها است. روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی از کاربردی‌ترین رویکردها در هنگامی است که اطلاعات توزیعی در مورد داده‌های تصادفی وجود دارد. نوع دوم به علت عدم قطعیت شناختی است که با پارامترهای ناشناخته و غیر دقیق ناشی از عدم آگاهی در مورد مقادیر دقیق پارامترها سر و کار دارد و معمولاً روش‌های برنامه‌ریزی احتمالی برای آن‌ها اعمال می‌گردد [۲۴]. بنابراین با توجه به عدم قطعیت تجهیزات در زنجیره تأمین صنعت برق و به منظور بهبود پاسخ‌گویی به مشترکین می‌توان از حالت‌های مختلف سفارش‌دهی و مبتنی بر سناریوهای متعدد برای تحویل محصولات به مشتریان استفاده نمود [۲۹].

از پرکاربردترین روش‌ها برای بررسی نوسانات، مدل‌های شبیه‌سازی در مدیریت زنجیره تأمین است که برای بررسی اختلالات در سناریوهای مختلف، پیش‌بینی، تعیین راه‌حل‌های پیچیده و جریان‌های لجستیکی بکار برده می‌شود [۳۳]. از طرفی، دردنیای واقعی مسائل بزرگ و پیچیده هستند و دارای اهداف متعدد، نامتناسب و متضاد بوده و در یک فضای جستجوی بزرگ قرار گرفته‌اند. این گونه مسائل با استفاده از تکنیک‌های دقیق و یا الگوریتم‌های فرا ابتکاری بررسی می‌شوند.

تکنیک‌های دقیق شامل روش مجموع وزنی، محدودیت E و ... است. این روش‌ها طی مدت طولانی برای حل مسائل پیچیده استفاده می‌شده است؛ اما در بسیاری از مواقع در یافتن پاسخ بهینه به دلیل ماهیت احتمالی اهداف و عدم امکان تخمین توابع هدف ناموفق عمل می‌کردند، در این حالت از الگوریتم‌های فرا ابتکاری همچون شبیه‌سازی تبرید، جستجوی تابو، الگوریتم ژنتیک و دیگر الگوریتم‌ها استفاده می‌شود [۲۱]. در الگوریتم تکاملی تفاضلی همگرایی بالاست و میزان کارایی نسبت به الگوریتم ژنتیک قوی‌تر است و پاسخ‌های بهتری ارائه می‌دهد [۱۰]. این الگوریتم همچنین از نظر تکرارپذیری و تعداد تکرارهای لازم راه‌حل از بهینه‌سازی ازدحام ذرات فراتر می‌رود [۱۱]. در پیشینه تحقیق به بررسی مطالعات صورت گرفته بر روی اختلالات زنجیره تأمین در صنایع مختلف پرداخته شد، نتایج بررسی‌ها نشان داد که پژوهشی در مورد عدم قطعیت تأمین کالا و تجهیزات زنجیره تأمین صنعت برق ایران انجام نشده است. بنابراین در این پژوهش، مدل چهارسطحی شامل یک تأمین‌کننده، یک توزیع‌کننده، چهار خرده‌فروش و مشتریان در شرایط عدم قطعیت برای چند محصول و چند دوره زمانی در نظر گرفته شد. با توجه به این که در این تحقیق از سیاست (R, Q) برای بازپس‌سازی موجودی انبارهای نهادهای زنجیره تأمین استفاده شده است بنابراین، ابتدا با استفاده از روش طراحی آزمایشات جواب‌های اولیه برای الگوریتم فرا ابتکاری فراهم گردید، سپس با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی مقادیر مختلف نقطه سفارش مجدد و مقدار سفارش تعیین شد. سپس با توجه به توابع هدف احتمالی مدل از شبیه‌سازی برای تخمین و برآورد آن استفاده شد. در ادامه این مقاله و در بخش ۲ برخی از پژوهش‌های مربوط به ادبیات معرفی

گردیده است، بخش ۳ به روش تحقیق پرداخته شده است. بخش ۴ به مطالعه موردی اشاره شده و در نهایت، بخش آخر به نتیجه‌گیری و پیشنهادها اختصاص دارد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تاکنون محققین مقالات متعددی در زمینه زنجیره تأمین جهانی و مدیریت موجودی تدوین نموده‌اند که برخی از آن‌ها در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

زنجیره تأمین جهانی. زنجیره تأمین جهانی شامل آن دسته نهادهایی است که در مناطق جغرافیایی سرتاسر دنیا توزیع شده‌اند و برای تبدیل مواد اولیه به محصول نهایی تا تحویل آن به مشتری با یکدیگر همکاری می‌نمایند [۵]. از زمان فراگیری ویروس کرونا ۱۹ در اوایل سال ۲۰۲۰، اختلالات زنجیره تأمین جهانی تحولات شگرفی را در دنیا ایجاد نمود و تاثیر منفی بسزایی بر اقتصاد جهانی گذاشت [۹]. فاصله‌گذاری اجتماعی و محدودیت‌های سفر در انتقال کالاها و خدمات بحران عظیمی را در زنجیره تأمین بوجود آورد، همچنین عدم اطمینان شدید در تقاضا، کمبود نیروی کار و محدودیت‌های قرنطینه، نهادهای زنجیره تأمین را با چالش‌های بی‌سابقه‌ای مواجه نمود [۱۴]. به گونه‌ای که برندهای جهانی خودرو مانند جنرال موتورز، نیسان، رنو، هوندا و پژو و شرکت‌های جهانی مانند تویوتا، اپل، استارباکس، ایکیا یا به طور کامل فعالیت خود را در چین متوقف کرده‌اند و یا بسیار محدود کار می‌کردند [۱۷]. تخصیص سفارش به تأمین‌کنندگان از جمله تصمیمات راهبردی شرکت‌ها به شمار می‌رود که تاب‌آوری صنعت به دلیل پیچیدگی زنجیره تأمین و مقابله با ریسک منجر به افزایش تولید خواهد شد [۱۳].

جنگ نیز از مهم‌ترین عوامل ایجاد اختلال در زنجیره تأمین است که با سایر شوک‌ها متفاوت است؛ زیرا منجر به بی‌ثباتی طولانی مدت در زنجیره تأمین می‌گردد [۲۸]. در اوایل فوریه ۲۰۲۲، حمله روسیه به اوکراین شوک دیگری را بر روی زنجیره تأمین جهانی تحمیل نمود [۹] و باعث شد کشورهای غربی تحریم‌های سنگینی را علیه اقتصاد روسیه اعمال کنند، این جنگ نه تنها بازارهای مالی جهانی را دچار اختلال نمود بلکه افزایش قیمت انرژی جهانی و کمبود آن را در برخی مناطق تشدید کرد [۷]. به صورت کلی، شوک‌های عرضه و تقاضا می‌توانند خرد (محدود به یک شرکت و یا یک منطقه جغرافیایی) یا کلان (در گستره یک صنعت یا اثرگذار بر بازار جهانی) باشند [۴]. با توجه به این که زنجیره‌های تأمین جهانی شبکه‌های پیچیده‌ای هستند که عرضه‌کنندگان محصول را به مشتریان نهایی مرتبط می‌نمایند، بنابراین طیف وسیعی از محصولات در سرتاسر جهان مبادله می‌شود که در صورت عدم نقل و انتقال بهینه اثرات زیست محیطی و اجتماعی زیادی را ایجاد خواهد کرد [۲۲]. تاکنون مطالعات زیادی در مورد تاثیر عدم قطعیت بر عملکرد زنجیره تأمین انجام شده است که در بخش مدیریت موجودی به بررسی برخی از موارد پرداخته شده است.

مدیریت موجودی. مطالعات متعددی در حوزه مدیریت موجودی سیستم‌های تولیدی انجام شده است که در آن به مدل‌سازی و کنترل موجودی پرداخته شده است. مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل آن فرصت ارزیابی سطح چابکی به شرکت‌ها می‌دهد تا بتوانند در یک محیط رقابتی پویایی خود را حفظ نمایند. بنابراین اجرای مدل در مقایسه با دنیای واقعی دارای هزینه پایین‌تری است و به طور گسترده در حوزه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف اصلی کنترل موجودی حفظ سطح موجودی هر نهاد در زنجیره تأمین و همچنین برآورده ساختن خواسته‌های مشتریان با محصولات سفارش داده شده در سطوح بالادستی است [۲۶].

تحقیقات گسترده‌ای بر روی چالش‌های کنترل موجودی در زنجیره تأمین انجام شده است که شامل عدم قطعیت در عرضه، عدم قطعیت در تقاضا و روش‌های حل مدل با پارامترهای تصادفی می‌شود. در شرایط معمول تصمیم‌گیری هر نهاد در زنجیره تأمین بر اساس هزینه انجام می‌شود، اما در هنگام افزایش ناگهانی تقاضا و اختلال در عرضه این روش کاربردی نیست. بنابراین، در ادامه به بررسی ادبیات مرتبط با عدم قطعیت در عرضه پرداخته می‌شود.

عدم قطعیت بالا در عرضه منجر به نگرانی نهادهای زنجیره تأمین از فرایند عرضه می‌گردد و باعث ناپایداری آن می‌شود که روش‌های سنتی کاربرد محدودی در این زمینه دارند و منجر به ارائه راه‌حل‌های غیرممکن می‌شوند و مدل را بیش از حد پیچیده می‌کنند [۲۰]. عرضه غیرقطعی در برنامه‌ریزی موجودی و مدیریت زنجیره تأمین شامل عواملی همچون زمان، کمیت، کیفیت و عدم قطعیت قیمت خرید

می‌باشد [۱۶] و یا در اثر برخی رویدادهای مخرب (مانند بلایای طبیعی، اعتصاب کارگری و غیره) ایجاد می‌شود [۲۷]، بنابراین، تغییر در هر یک از عوامل مذکور بر اساس شرایط مختلف تولیدکنندگان بالادستی ایجاد می‌شود که این عدم قطعیت در عرضه با یک تابع احتمالی نشان داده می‌شود [۳۴]. در شرایط عدم قطعیت در عرضه، نهادهای بالادستی ظرفیت انبارش کالاهای خود را افزایش می‌دهند که در نهایت منجر به تغییر در میزان عرضه در زنجیره تأمین می‌شود [۳] و با استفاده از روش‌های مختلف همچون منبع‌یابی^۱، گزینش تأمین‌کننده^۲، روابط قراردادی^۳ و سرمایه‌گذاری تأمین‌کننده^۴ و ... تسطیح می‌گردد [۱۲]. در پژوهش‌هایی که تاکنون در این حوزه انجام شده است بر روی عدم قطعیت تأمین کالا و تجهیزات زنجیره تأمین صنعت برق ایران تمرکز نشده است که پژوهش حاضر به بررسی مدل چهارسطحی چند محصولی و چند دوره‌ای در شرایط عدم قطعیت پرداخته است. ضمن این‌که در پژوهش‌های گذشته به سیاست بازپرسازی موجودی با هدف کاهش نارضایتی مشتریان در صنعت برق اشاره نشده است در حالی‌که در پژوهش کنونی موارد فوق با در نظر گرفتن تقاضای متغیر لحاظ شده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این تحقیق در دسته پژوهش‌های کمی و مقطعی قرار می‌گیرد، زیرا طی مدت ۶۰ دوره، شرکت‌های توزیع نیروی برق مورد بررسی قرار گرفتند، همچنین اطلاعات پژوهش از طریق مرور ادبیات تحقیق و جستجو در اسناد و مدارک سازمانی هر یک از نهادهای زنجیره تأمین و خروجی نرم‌افزار خرید کالا جمع‌آوری گردید. روش مدنظر در توسعه این پژوهش استفاده از روش طراحی آزمایشات به منظور ایجاد جواب‌های اولیه و سپس بکارگیری رویکرد ترکیبی الگوریتم فرا ابتکاری برای حصول مقادیر نقطه سفارش مجدد و مقدار سفارش و روش شبیه‌سازی برای تخمین مقادیر توابع هدف است، همچنین این مطالعه از نظر هدف جزء پژوهش‌های کاربردی و از نظر روش اجراء در دسته پژوهش‌های موردی و زمینه‌ای قرار می‌گیرد. در ادامه این بخش فرضیات مسئله مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و سپس بیکربندی مسئله انجام شده است.

مفروضات مدل.

- در زنجیره تأمین مطالعه موردی، تأمین‌کننده دارای ظرفیت انبار محدود در نظر گرفته شده است.
- حلقه‌های زنجیره تأمین در مدل مورد بررسی شامل مشتریان، خرده فروشان، توزیع‌کننده و تأمین‌کننده می‌باشد.
- میزان موجودی خرده فروشان در ابتدای دوره اول برابر با میزان سفارش ابتدای دوره می‌باشد.
- دو محصول با ویژگی‌های متفاوت و سطح تقاضاهای مختلف در زنجیره تأمین مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.
- مدل با فرض کمبود موجودی خرده‌فروشان و لحاظ نمودن هزینه فروش از دست رفته در نظر گرفته شده است.
- با توجه به ماهیت کالاهای مورد بررسی هزینه‌ها شامل هزینه‌های انبارداری (مجموع هزینه‌های نگهداری موجودی و هزینه نگهداری یک واحد کالا در واحد زمان)، فروش از دست رفته و سفارش‌دهی کالا می‌باشد.
- میزان سفارش دوره قبل خرده فروش در انتهای دوره تعیین و در ابتدای دوره بعد تحویل داده می‌شود، بنابراین مدت زمان دریافت سفارش ثابت در نظر گرفته می‌شود.
- در طراحی مدل مورد مطالعه، اختلالات احتمالی حین حمل و نقل و قطع موقت زنجیره تأمین در نظر گرفته نمی‌شود.
- تغییرات پیش‌بینی نشده در نرخ تقاضای مشتریان به دلایل سیاسی، اقتصادی و بلایای طبیعی در زنجیره تأمین در نظر گرفته نمی‌شود.
- کالاهای مورد بررسی با فرض نرخ عیب صفر مورد بررسی قرار گرفته‌اند و فاقد نواقص احتمالی هستند (برگشت کالاهای معیوب وجود ندارد).

پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشند.

i : مشتری / خرده فروش در زنجیره تأمین که $i=1, \dots, M$

z : نوع کالا در زنجیره تأمین که $z=1, 2, \dots, N$

t : دوره t در افق زمانی که $t=1, 2, \dots, T$

D_{ij}^t : میزان تقاضای مشتری از خرده فروش i ام برای محصول z ام در دوره t

ax_{ij}^t : موجودی در دست خرده فروش i ام برای محصول z ام در آغاز دوره t

x_{ij}^t : موجودی در دست کالای z ام خرده فروش (بعد از بازپرسی تقاضای مشتری) برای مشتری i ام در پایان دوره t

y_{ij}^t : سطح موجودی هدف سفارش داده شده کالای z ام برای خرده فروش i ام و در دوره زمانی t

L_{ij}^t : مدت زمان انتظار مشتری برای دریافت کالای z ام از خرده فروش i ام و در دوره زمانی t

R_{ij} : نقطه سفارش مجدد خرده فروش i برای کالای z ام

Q_{ij} : مقدار نقطه سفارش مجدد خرده‌فروش i برای کالای z ام

Z_{ij}^t : سطح موجودی واقعی سفارش داده شده کالای z ام برای خرده فروش i ام در دوره t

U_{0j} : ظرفیت تأمین‌کننده برای محصول z ام

P_{ij} : هزینه فروش از دست رفته (نارضایتی ذی‌نفعان) محصول z ام برای خرده فروش i

h_{ij} : هزینه نگهداری هر واحد محصول z ام در هر دوره برای خرده فروش i

α_{ij} : ضریب تبدیل "نسبت مجموع موجودی انتهای دوره قبل کالای z ام برای خرده فروش i ام و میزان سفارش واقعی دریافت شده

کالای z ام برای خرده فروش i ام به تعداد دوره‌ها" به "هزینه نگهداری یک واحد کالای z ام برای خرده فروش i ام"

K_{ij} : هزینه سفارش ثابت محصول z ام برای خرده فروش i

$G_{ij}(ax_{ij}^t)$: مجموع هزینه‌های نگهداری موجودی و هزینه فروش از دست رفته کالای z ام از خرده فروش i در دوره t

$v_{ij}^t(x)$: هزینه کل خرده فروش i ام کالای z ام در سطح موجودی x در دوره t

مدل پیشنهادی موجودی زنجیره تأمین. این مقاله توسعه یافته مدل دوان و لیائو می‌باشد [۸] که بررسی دو کالا طی یک دوره ۶۰

ماهه در زنجیره تأمین چهارسطحی شرکت‌های توزیع برق پرداخته است که شامل یک تأمین‌کننده، یک توزیع‌کننده، چهار خرده فروش و مشتریان می‌باشد.

$x = \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Mj}\} = 0$ نشان‌دهنده این است که سطح موجودی اولیه هر یک از خرده فروشان $i=1, 2$ در انتهای اولین دوره

($t=1$) در هر کدام از دوره‌های زمانی $t=1, 2, \dots, 60$ و برای هر یک از اقلام $z=1, 2$ برابر با میزان سفارش ابتدای دوره می‌باشد. در آغاز

دوره t مشتری مقدار نیاز خود به کالای z را از خرده فروش i (D_{ij}^t) درخواست می‌نماید، سپس خرده فروش درصدد برآورده کردن تقاضای

مشتری با موجودی در دست خود ax_{ij}^t برمی‌آید. در صورتی که خرده‌فروش نتواند تقاضای مشتریان خود را در دوره t برآورده نماید، کمبود

در دوره ایجاد می‌شود که به عنوان هزینه فروش از دست رفته خرده‌فروش P_{ij} در نظر گرفته می‌شود. چنانچه در دوره t میزان تقاضای

مشتریان کالای z از میزان موجودی در دست خرده فروش i کمتر باشد، کالای z در انبار خرده فروش i نگهداری می‌شود که دارای هزینه

نگهداری موجودی h_{ij} می‌باشد. همچنین متوسط موجودی کالای z خرده فروش i در طول دوره t که به صورت نسبت مجموع موجودی

انتهای دوره قبل و میزان سفارش واقعی دریافت شده به تعداد دوره‌ها عنوان می‌شود، هزینه نگهداری موجودی طول دوره α_{ij} را دارد.

مجموع هزینه نگهداری موجودی، هزینه متوسط موجودی در طول دوره و هزینه فروش از دست رفته کالای z برای هر یک از خرده‌فروشان

i در دوره t به صورت $G_{ij}(ax_{ij}^t)$ نشان داده می‌شود که به صورت رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$G_{ij}(ax_{ij}^t) = h_{ij} * (ax_{ij}^t - D_{ij}^t)^+ + \alpha_{ij} * \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N ax_{ij}^t \right) + p_{ij} * (D_{ij}^t - ax_{ij}^t)^+ \quad \text{که} \quad x^+ = \max\{x, 0\} \text{ و } t = 1, 2, \dots, T$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, M \text{ و } j = 1, 2, \dots, N \quad \text{رابطه (۱)}$$

در پایان دوره t خرده فروش i پس از برآورده کردن تقاضای مشتریان کالای j سطح موجودی باقی‌مانده (x_{ij}^t) را اندازه‌گیری می‌نماید و در صورتی که مقدار آن از میزان نقطه سفارش مجدد R_{ij} بیشتر باشد، سطح موجودی هدف (y_{ij}^t) برابر با مقدار سطح موجودی انتهای دوره خواهد بود. چنانچه سطح موجودی انتهای دوره کمتر از نقطه سفارش مجدد باشد، سطح موجودی هدف برابر با مجموع سطح موجودی انتهای دوره و مقدار سفارش خواهد بود که به صورت رابطه ۲ نشان داده می‌شود.

$$y_{ij}^t = \begin{cases} x_{ij}^{t-1}; & x_{ij}^{t-1} > R_{ij} \\ x_{ij}^{t-1} + Q_{ij}; & x_{ij}^{t-1} \leq R_{ij} \end{cases} \quad \forall i = 1, 2, \dots, M \text{ و } j = 1, 2, \dots, N \text{ و } t = 1, 2, \dots, T \quad \text{رابطه (۲)}$$

سفارش خرده‌فروشان در حلقه بعد تقاضای توزیع‌کننده است. با توجه به میزان موجودی ابتدای دوره توزیع‌کننده دو روش به منظور بازسازی تقاضای خرده‌فروش توسط توزیع‌کننده مدنظر قرار می‌گیرد.

۱- چنانچه موجودی در دست کالای j ام توزیع‌کننده به وفور باشد به گونه‌ای که $ax_{ij}^t \geq \sum_{i=1}^m (y_{ij}^t - x_{ij}^t)$ ، تمامی سفارشات خرده‌فروشان به‌طور کامل برآورده می‌گردد، به عبارت دیگر، سطح موجودی هدف (y_{ij}^t) با سطح موجودی واقعی (Z_{ij}^t) برابر می‌شود.

۲- در غیر این صورت سفارشات خرده‌فروشان بر اساس میزان موجودی توزیع‌کننده برآورده می‌شود که به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود.

$$Z_{ij}^t = \begin{cases} y_{ij}^t, & ax_{ij}^t \geq \sum_{i=1}^m (y_{ij}^t - x_{ij}^t) \\ x_i^t + \min\{y_{ij}^t - x_{ij}^t, ax_{ij}^t\}, & ax_{ij}^t < \sum_{i=1}^m (y_{ij}^t - x_{ij}^t) \end{cases} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, M \text{ و } j = 1, 2, \dots, N \text{ و } t = 1, 2, \dots, T$$

سپس توزیع‌کننده سطح موجودی انتهای دوره کالای j خود (x_{oj}^t) را اندازه‌گیری می‌نماید، در صورتی که سطح موجودی انتهای دوره از میزان موجودی هدف (y_{oj}^t) بیشتر باشد، درخواست کالا به تأمین‌کننده ارسال نمی‌شود، ولی چنانچه کمتر باشد (مطابق رابطه ۴) بسته به میزان موجودی تأمین‌کننده سفارش برای توزیع‌کننده ارسال می‌نماید و این بدین مفهوم می‌باشد که سفارش توزیع‌کننده ممکن است به‌طور کامل برآورده نگردد و به‌صورت رابطه ۵ نشان داده می‌شود.

$$y_{oj}^t \geq x_{oj}^t \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$y_{oj}^t - x_{oj}^t \leq U_{oj} \quad \forall i = 1, 2, \dots, M \text{ و } j = 1, 2, \dots, N \text{ و } t = 1, 2, \dots, T \quad \text{رابطه (۵)}$$

لازم به ذکر است خرده فروش i سطح موجودی کالای j در پایان دوره t خود را به منظور تعیین مقدار سفارش به توزیع‌کننده به صورت رابطه ۶ محاسبه می‌نماید.

$$x_{ij}^t = (ax_{ij}^t - D_{ij}^t)^+ \quad \forall i = 1, 2, \dots, M \text{ و } j = 1, 2, \dots, N \text{ و } t = 1, 2, \dots, T \quad \text{رابطه (۶)}$$

تقاضای کل کالای j از تأمین‌کننده برابر است با مجموع تفاضل مقادیر سفارش هدف (y_{ij}^t) با موجودی پایان دوره در کل زنجیره (رابطه ۷)، که به صورت رابطه ۷ محاسبه می‌گردد.

$$D_{oj}^t = \sum_{i=1}^M (y_{ij}^t - x_{ij}^t) \quad \forall i = 1, 2, \dots, M \text{ و } j = 1, 2, \dots, N \text{ و } t = 1, 2, \dots, T \quad \text{رابطه (۷)}$$

هزینه کل خرده فروش i برای کالای j در دوره t ($v_{ij}^t(x)$) به صورت رابطه ۸ نشان داده می‌شود.

$$v_{ij}^t(x_{ij}^t) = K_{ij} * \delta * (y_{ij}^t - x_{ij}^t) + G_{ij}(ax_{ij}^t) \quad \forall i = 1, \dots, M \quad j = 1, 2, \dots, N \quad t = 1, 2, \dots, T \quad \text{رابطه (۸)}$$

که مقدار $\delta(x)$ در صورتی که سفارش داده شود عدد یک است و در حالتی که سفارش داده نشود عدد صفر است.

برای نقطه سفارش مجدد مقادیر حد پایین و بالای در نظر گرفته شده است که آن به صورت رابطه ۹ نشان داده می‌شود.

$$lr_{ij} \leq R_{ij} \leq ur_{ij} \quad \text{رابطه (۹)}$$

مقدار نقطه سفارش مجدد به صورت رابطه ۱۰ نشان داده می‌شود.

$$R_{ij} = \left(\frac{1}{T}\right) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T D_{ij}^t * (L_{ij}^t \max - L_{ij}^t) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

همچنین برای مقدار سفارش مقادیر حد پایین و بالای در نظر گرفته شده است که آن به صورت رابطه ۱۱ نشان داده می‌شود.

$$lq_{ij} \leq Q_{ij} \leq uq_{ij} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

تابع هدف اول هزینه کل است که شامل هزینه انبارداری (مجموع هزینه‌های نگهداری موجودی و هزینه متوسط موجودی در طول

دوره)، هزینه سفارش‌دهی و هزینه فروش از دست رفته است و به صورت رابطه ۱۲ محاسبه می‌گردد.

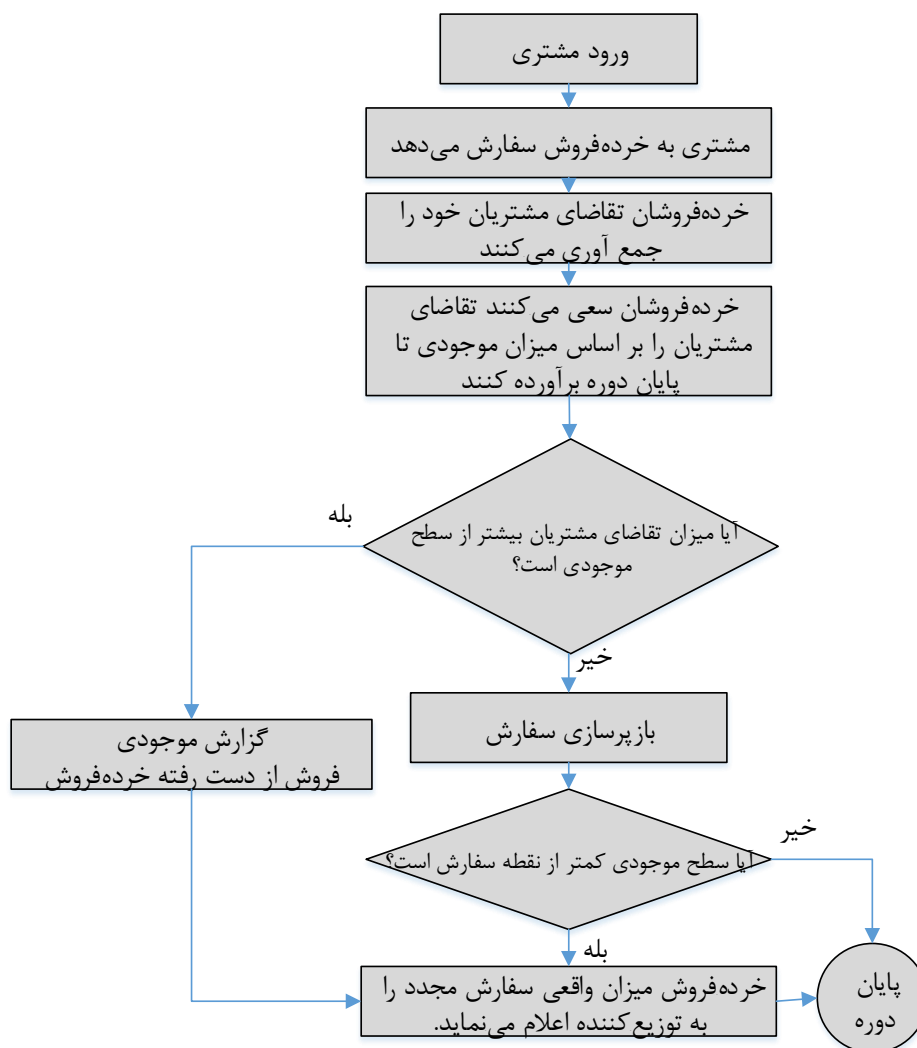
$$TC = \sum_{i=1}^M \min \left\{ \sum_{t=1}^T v_{ij}^t(x_{ij}^t) \right\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, M \quad \text{و} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad \text{و} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

تابع هدف دوم نسبت تقاضای مشتریان ناراضی به کل تقاضای مشتریان است و به صورت رابطه ۱۳ محاسبه می‌گردد [۳۲].

$$CD(T) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{\max(D_{ij}^t - ax_{ij}^t, 0)}{D_{ij}^t} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

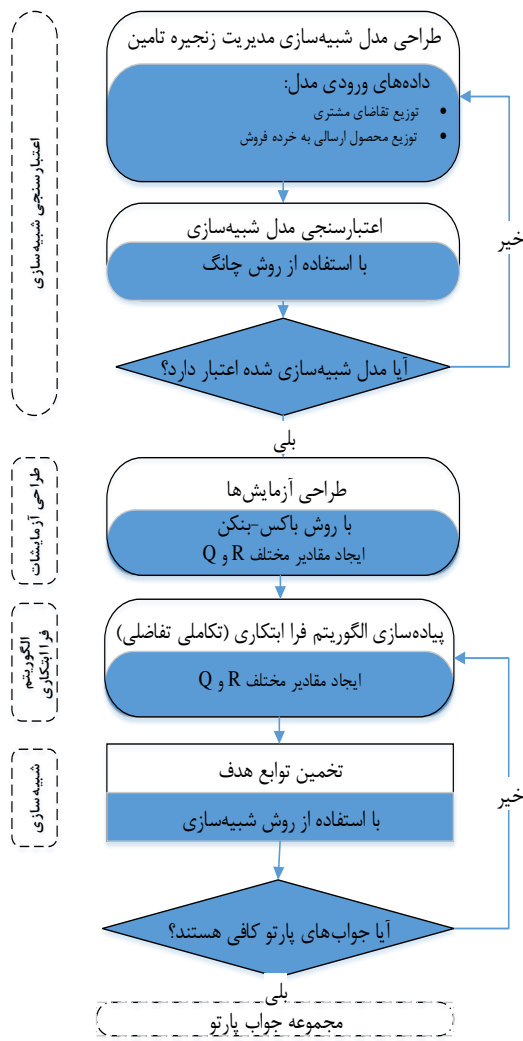
۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش به منظور تشریح روش ارائه شده، از داده‌های مطالعه موردی استفاده گردید. شکل ۱ نحوه سفارش‌دهی مشتریان و خرده‌فروشان در زنجیره تأمین چهارسطحی زنجیره تأمین شرکت‌های توزیع نیروی برق را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مدل شبیه‌سازی در یک دوره

مدل شبیه‌سازی بکار رفته در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ای. دی نسخه ۸.۲.۵ اجرا شده است. در گام اول اجرای مدل داده‌های دو نوع محصول و دو خرده‌فروش در دوره زمانی ۶۰ ماهه جمع‌آوری شد. در زنجیره تأمین تجهیزات صنعت برق توزیع‌های احتمالی سطح موجودی واقعی سفارش داده شده کالای i ام برای خرده‌فروش i ام و میزان تقاضای مشتری از خرده‌فروش i ام برای محصول i ام با استفاده از اندازه‌گیر اتوماتیک^۱ نرم‌افزار ای. دی محاسبه شد که مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. در شکل ۲ چارچوب کلان نظری تحقیق نشان داده شده است.



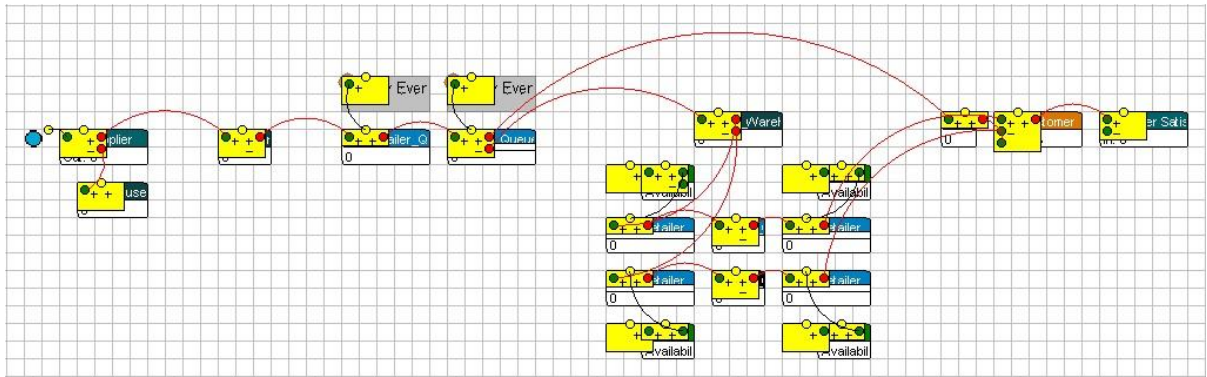
شکل ۲. چارچوب کلان نظری تحقیق

جدول ۱ نشان‌دهنده توزیع‌های احتمالی محصول ۱ و ۲ برای خرده‌فروشان اول و دوم است.

جدول ۱. توزیع‌های احتمالی مدل

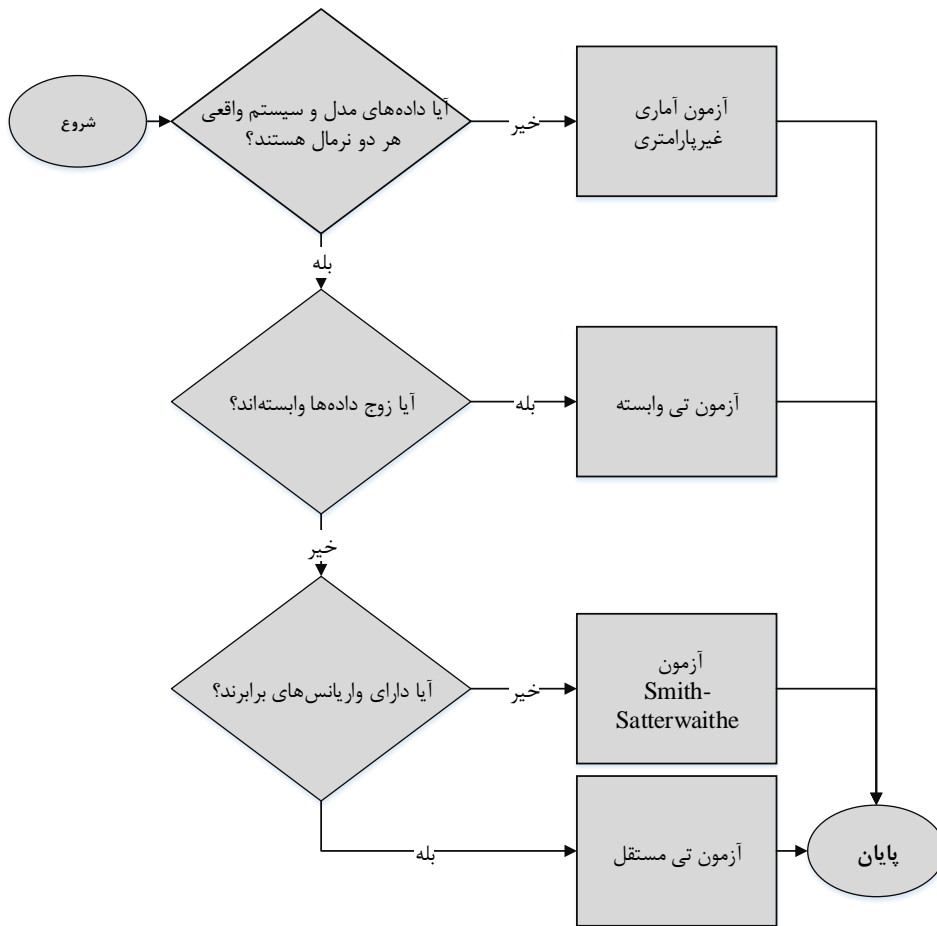
توزیع		متغیر
D_{ij}^t	Z_{ij}^t	
Logistic (۷۳.۳۵، ۹.۳۳)	Weibull (۷۲.۷۲، ۲.۶۰)	محصول ۱- خرده فروش اول
Normal (۴۰.۹۹، ۳.۳۷)	Lognormal (۴۱.۰۲، ۹.۷۸)	محصول ۱- خرده فروش دوم
Lognormal (۵۰.۸۰، ۱۱.۰۱)	Logistic (۴۴.۴۰، ۱۳.۹۸)	محصول ۲- خرده فروش اول
Uniform (۲۵.۴۱، ۴۰.۵۱)	Logistic (۳۰.۴۴، ۷.۱۷)	محصول ۲- خرده فروش دوم

شکل ۳ نشان‌دهنده مدل شبیه‌سازی در نرم‌افزار ای. دی است که به مدت ۸ ساعت و طی ۶۰ دوره اجرا شده است.



شکل ۳. مدل شبیه‌سازی نرم افزار Enterprise Dynamics

اعتبارسنجی. به منظور تایید اعتبار مدل و همچنین ارزیابی سازگاری مدل شبیه‌سازی با سیستم واقعی در سطح اطمینان معین آزمون اعتبارسنجی انجام شد. بنابراین در این پژوهش آزمون اعتبارسنجی چانگ^۱ اجرا شد که مراحل آن به صورت شکل ۴ می‌باشد.



شکل ۴. نمودار اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

اولین مرحله در فرایند اعتبارسنجی چانگ شامل انجام آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۱ بر روی نمونه‌ها است. آزمون کولموگروف-اسمیرنوف به بررسی نرمال بودن داده‌های جمع‌آوری شده از خروج مشتریان در طی ۶۰ دوره یک ماهه می‌پردازد که در آن هر دوره یک ماه و به مدت هشت ساعت کار انجام شده است. مدل شبیه‌سازی نیز به همین ترتیب در ۶۰ تکرار با ۸ ساعت در هر اجرا انجام شده است. براساس نتایج حاصله، مقدار احتمال^۲ در هر دو مجموعه بیشتر از ۰.۰۵ است ($P\text{-Value} > 0.05$) و بدین مفهوم است که داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد از توزیع نرمال پیروی می‌کند که به صورت جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. آزمون تک نمونه‌ای کولموگروف-اسمیرنوف

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test			
	VAR.....۳	VAR.....۴	
N	۶۰	۶۰	
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	۲۵۰۲.۳۶۶۷	۲۴۹۷.۵۳۳۳
	Std. Deviation	۵۷.۷۵۸۱۱	۲۵.۸۸۳۳۵
	Absolute	۰.۱۱۰	۰.۱۳۸
Most Extreme Differences	Positive	۰.۰۷۴	۰.۰۹۴
	Negative	-۰.۱۱۰	-۰.۱۳۸
Kolmogorov-Smirnov Z	۰.۸۵۲	۱.۰۶۹	
Asymp. Sig. (2-tailed)	۰.۴۶۳	۰.۲۰۴	

a. Test distribution is Normal.
b. Calculated from data.

بر اساس روش اعتبارسنجی چانگ مرحله دوم به ارزیابی کای دو^۳ می‌پردازد. چنانچه ضریب کای دو بزرگ‌تر از ۰.۰۵ باشد دو نمونه از هم مستقل‌اند و در صورتی که کمتر از ۰.۰۵ باشد دو نمونه وابسته هستند. در صورتی که داده‌ها از یکدیگر مستقل باشند از آزمون تی و در صورت وابستگی بین داده‌ها از آزمون تی وابسته^۴ استفاده می‌کنیم. در جدول ۳ آماره آزمون کای دو نشان داده شده است.

جدول ۳. آماره آزمون کای دو

جامعه اول	جامعه دوم	
۸.۰۰۰	۱۶.۲۶۷	آزمون کای دو
۵۰	۴۳	df
۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	Asymp. Sig.

با توجه به داده‌های بدست آمده، سطح معناداری هر دو مجموعه در آزمون کای دو بیشتر از ۰.۰۵ است، به عبارت دیگر واریانس‌های دو مجموعه در سطح اطمینان ۹۵٪ با یکدیگر برابرند، بنابراین براساس روش چانگ آخرین مرحله که شامل آزمون تی است می‌بایست اجرا گردد. با توجه به این که آماره آزمون تی مقدار آماره $t_{0.05, 118} = 1.9808$ است و بر اساس جدول ۴، این عدد بین حد پایین و حد بالای دو مجموعه داده‌هاست. بنابراین بر اساس روش اعتبارسنجی چانگ خروجی مدل شبیه‌سازی با مشتریان راضی واقعی یکسان هستند و اعتبارسنجی مدل مورد قبول قرار می‌گیرد.

1. Kolmogorov-Smirnov test
2. P-Value
3. Natural Pairing Evaluation
4. pair-t

جدول ۴. آزمون T عدم وابستگی

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower		Upper
VAR.....۱	Equal variances assumed	۵۰.۷۰۶	۰.۰۰۰	۰.۵۹۲	۱۱۸	۰.۵۵۵	۴۸۳۳۳۳	۸.۱۷۱۰۳	-۱۱.۳۴۷۵۴	۲۱.۰۱۴۲۰
	Equal variances not assumed			۰.۵۹۲	۸۱.۷۷۹	۰.۵۵۶	۴۸۳۳۳۳	۸.۱۷۱۰۳	-۱۱.۴۲۲۱۱	۲۱.۰۸۸۷۸

طراحی آزمایشات. یکی از روش‌های بسیار مهم که مدیران و کارشناسان با کمترین هزینه می‌توانند تصمیمات ارزشمندی بگیرند، استفاده از روش طراحی و تجزیه و تحلیل آزمایشات است. این روش که مبتنی بر رویکرد آماری است، راهکارهایی را معرفی می‌کند تا بتوان بهترین تصمیمات را با ریسک مشخص اتخاذ نمود. به منظور حل مدل توسعه داده شده با استفاده از طراحی آزمایشات مراحل شناسایی، درک و بیان مسئله، انتخاب عوامل و تعیین سطوح آن‌ها، انتخاب متغیر پاسخ، انتخاب طرح آزمایش، انجام آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها و نتیجه‌گیری و پیشنهادها انجام می‌شود. پس از شناسایی و بیان مسئله که در بخش فوق به آن اشاره شد در مرحله بعدی بایستی انتخاب عوامل و تعیین سطوح را انجام دهیم.

انتخاب عامل‌ها و سطوح‌های آن. طرح عاملی با k عامل که هر عامل دو سطح دارد، دارای اهمیت بسیار زیادی است و در کارهای پژوهشی به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌تواند کمی باشد. تکرار کامل چنین طرحی نیازمند 2^k مشاهده می‌باشد که در مدل مورد بررسی از سیاست موجودی (R, Q) و طرح تکرار کامل استفاده شده است. بدین معنا که هنگامی که سطح موجودی خرده‌فروش به کمتر از نقطه سفارش مجدد برسد، مقدار سفارش^۱ توسط توزیع‌کننده فوراً جایگزین خواهد شد. از آنجایی که هر یک از متغیرهای نقطه سفارش مجدد و مقدار سفارش برای سفارش هر یک از خرده‌فروشان دارای یک سطح بالا و یک سطح پایین است بنابراین طرح عاملی گزینه مناسبی برای تولید آزمایش می‌باشد که سطوح متغیرها در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. عوامل و سطوح مقداری آن‌ها

عوامل و فاکتورها (تیمارها)	خرده‌فروشان (۱ و ۲)	محصولات (۱ و ۲)	سطح پایین	مرکزی	سطح بالا	واحد اندازه‌گیری
R_{ij}	خرده‌فروش ۱	محصول ۱	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	عدد
نقطه سفارش مجدد خرده‌فروش i برای کالای j ام	خرده‌فروش ۲	محصول ۲	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	عدد
		محصول ۱	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰	عدد
Q_{ij}	خرده‌فروش ۱	محصول ۲	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	عدد
		محصول ۱	۳۸۵	۳۹۵	۴۰۵	عدد
مقدار سفارش مجدد خرده‌فروش i برای کالای j ام	خرده‌فروش ۲	محصول ۲	۵۵۰	۶۰۰	۶۵۰	عدد
		محصول ۱	۶۹۰	۷۰۰	۷۱۰	عدد
		محصول ۲	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	عدد

انتخاب متغیر پاسخ. متغیر پاسخ بایستی دارای اطلاعات مهمی از خرده‌فروشان در زنجیره تأمین باشد که برای به کنترل در آوردن آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین عوامل در این مدل زنجیره تأمین هزینه کل است که شامل هزینه نگهداری موجودی و هزینه سفارش‌دهی می‌باشد. از دیگر عوامل میزان تقاضای مشتری است که برآورده نشده‌است. به عبارت ساده‌تر به نسبت تقاضای برآورده نشده مشتری به کل تقاضای مشتری گفته می‌شود. به صورت خلاصه دو متغیر شناسایی شده در این مدل عبارتند از:

۱- هزینه کل

۲- نسبت تقاضای برآورده نشده به کل تقاضای مشتریان

انتخاب طرح آزمایش. در آزمایش‌های مبتنی بر چندین عامل که در آن‌ها مطالعه اثر توأم عوامل بر پاسخ ضروری است، طرح‌های عاملی به طور وسیع کاربرد دارند. با توجه به این که در مدل مورد بررسی برای هر خرده‌فروش دو سطح بالا و پایین وجود دارد، بنابراین $k=8$ و تعداد کل آزمایشات برابر ۲۷۲ است که از حاصل جمع ۲۵۶ نقطه گوشه‌ای و ۱۶ نقطه مرکزی در فضای طراحی آزمایشات بدست آمده است. سپس به منظور طراحی آزمایش‌ها از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۳ و روش باکس بنکن استفاده شد که در مجموع ۱۱۴ آزمایش طراحی گردید که برای هر یک از آزمایشات مقادیر مربوط به توابع هدف شامل هزینه موجودی کل و نسبت تقاضای برآورده نشده مشتری که به صورت خلاصه مطابق جدول ۶ بررسی شده است. لازم به ذکر است که مدت زمان اجرای هر مدل شبیه‌سازی شده ۴۸۰ ساعت کاری در نظر گرفته شده است.

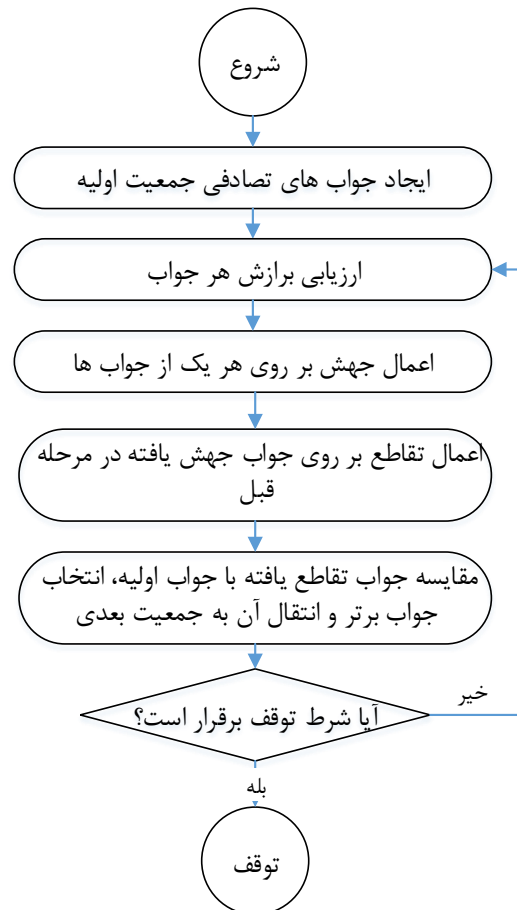
جدول ۶ نتایج حاصل از آزمایش‌ها

شماره آزمایش	R11	R12	R21	R22	Q11	Q12	Q21	Q22	TC(T) هزینه کل	CD (T) نسبت مشتریان ناراضی
۱	۱	۰	-۱	۰	۱	۰	-۱	۰	۴۵۸۰۴۱۴	۰.۱۵۳۱
۲	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۴۳۱۵۶.۵۵	۰.۱۰۳۸۰۹
۳	۱	-۱	۰	۰	۰	۰	۱	-۱	۴۸۸۶۸.۱۱	۰.۱۹۳۱۱۸
...
۱۱۲	۰	۱	-۱	۰	۱	۰	۰	-۱	۵۰۱۳۳.۶۶	۰.۲۱۶۶۹۴
۱۱۳	-۱	-۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۳۸۵۱۶.۱۸	۰.۰۷۵۱۷۴
۱۱۴	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۴۱۸۰۱.۶۵	۰.۰۹۷۳۱۸

الگوریتم فرا ابتکاری. در این پژوهش با توجه به توابع هدف احتمالی بکار رفته در مدل و عدم امکان محاسبه آن با روش‌های دقیق، از شبیه‌سازی برای تخمین مقادیر آن‌ها استفاده شد بنابراین مسئله مورد بررسی جزء مسائل ان. پی. سخت^۱ به شمار می‌رود [۲، ۱۵ و ۳۵]. در این پژوهش، از الگوریتم فراابتکاری تکاملی استفاده شده است که از الگوریتم‌های پرکاربرد و کارا می‌باشد [۱۰، ۱۱]. **الگوریتم تکاملی تفاضلی.** الگوریتم تکاملی تفاضلی در بهینه‌سازی مدل‌های پیوسته و گسسته دارای کاربرد فراوانی است و در علوم مختلف به صورت گسترده استفاده شده است. نقطه قوت روش تکاملی تفاضلی در این است که فرزندان را با استفاده از اطلاعات جهت‌دار در جمعیت پرورش می‌دهد. استورن و پرایس (۱۹۹۷) الگوریتم تکاملی تفاضلی را به عنوان یک الگوریتم اکتشافی ساده و کارآمد برای بهینه‌سازی جهانی در فضای پیوسته و گسسته پیشنهاد کردند که این روش در پرداختن به مشکلات بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است [۳۱].

الگوریتم تکاملی تفاضلی همچنین به همراه الگوریتم ژنتیک در یک مطالعه تطبیقی مورد بررسی قرار گرفت که در آن استراتژی‌های بهینه‌سازی برای مسائل ترکیبی توسط هگرتی، هونگ و کاسپارک (۲۰۰۹) مطالعه شد که در آن سرعت همگرایی، کیفیت راه‌حل‌ها و کارایی محاسباتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که عملکرد الگوریتم تکاملی تفاضلی در مقایسه با

الگوریتم ژنتیک قوی‌تر است و نتایج بهتری به همراه داشته است [۱۰]. به صورت مشابه در مقاله ایوان و همکاران (۲۰۱۲) الگوریتم تکاملی تفاضلی برای بهینه‌سازی محدود با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ مقایسه شد و نتایج نشان داد که الگوریتم تکاملی تفاضلی از نظر تکرارپذیری و تعداد تکرارهای لازم برای جابجایی راه‌حل از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات فراتر می‌رود [۱۱]. مراحل الگوریتم تکامل تفاضلی در یک مسئله بهینه‌سازی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. فلوچارت الگوریتم تکاملی تفاضلی

همانگونه که در شکل مشخص است، مراحل انجام الگوریتم تکاملی تفاضلی شامل ایجاد جمعیت اولیه جواب‌ها، محاسبه برازش جواب‌ها، جهش، تقاطع، انتخاب و شرط توقف می‌شود.

تنظیم پارامترها. برای اجرای الگوریتم تکاملی تفاضلی تعدادی از پارامترهای مهم بر اساس طراحی آزمایشات تعیین می‌شوند. با توجه به این که تعداد جواب‌های ایجاد شده طی هر مرحله اجرا مهم است، برای تعیین پارامترها، تعداد جواب‌های نامغلوب ایجاد شده به عنوان نتیجه مطلوب در نظر گرفته می‌شوند. مقادیر مذکور از مقایسه جواب‌های ایجاد شده در تمامی آزمایشات بدست می‌آیند. بنابراین مساله برای ۲۰ دوره، دو کالا، دو خرده فروش که سایر پارامترها به صورت تصادفی ایجاد شده‌اند، در نظر گرفته شد و بهترین ترکیب برای پارامترهای الگوریتم مطابق جدول ۷ است.

جدول ۷. پارامترهای تنظیم شده الگوریتم تکاملی تفاضلی

الگوریتم	نرخ جهش Mutation	ضریب تقاطع Cross Over	جمعیت اولیه npop
تکاملی تفاضلی	۰.۳	۰.۵	۵۰

نحوه تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فرا ابتکاری از طریق طراحی آزمایشات تاگوجی در مطالعه کومار و همکاران (۲۰۱۵) [۱۹] و ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) [۳۷] ارائه شده است.

ایجاد جمعیت اولیه جواب‌ها. در این الگوریتم، ایجاد جواب اولیه به صورت تصادفی و از حدود تعیین شده برای متغیرهای تصمیم (R_{ij}, Q_{ij}) بدست می‌آید. بنابراین هر جواب جمعیت اولیه از متغیرهای تصمیم نقطه سفارش مجدد سفارش و مقدار سفارش تشکیل شده است که در کدنویسی متلب مقادیر $T = 60 * 8 * nt = 60 * nj = 2 * ni = 2$ متلب مقادیر $i=1,2, j=1,2$ به عنوان جمعیت اولیه جواب استفاده شد.

محاسبه برآزش جواب‌ها. پس از انجام محاسبات آن مقداری که تابع هدف به خود می‌گیرد، معیار برآزش جواب به شمار می‌رود. **جهش.** به ازاء مقادیر بردار اولیه که شامل جواب‌های جمعیت می‌باشد، بردار جواب جهش یافته به صورت رابطه ۱۴ بدست می‌آید.

$$mv_{i,G+1} = v_{i,G} + CF * (v_{i_2,G} - v_{i_3,G}) \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

اندیس‌های $\{1, 2, \dots, NP\}$ که با اندیس جواب فعلی فرق می‌کنند، با یکدیگر دو به دو متفاوتند که به صورت تصادفی از جمعیت فعلی انتخاب شده‌اند. ضریب $CF \in [0, 2]$ برای کنترل و جلوگیری از تشدید تغییر پذیری تفاضل $(v_{i_2,G} - v_{i_3,G})$ در نظر گرفته می‌شود و $mv_{i,G+1}$ بردار جهش یافته می‌باشد. پس از انجام جهش، در صورتی که عنصر جهش یافته از حدود تعیین شده متغیر تصمیم خارج شده باشد، عدد دیگری در بازه متغیر تصمیم تولید و جایگزین عنصر جهش یافته می‌شود. به صورت کلی، در این الگوریتم بین جواب‌ها حرکت انجام می‌شود تا بهترین جواب در هر تکرار مدل شود. با توجه به رابطه ۱۴ که در آن عملیات تفریق، ضرب و جمع استفاده شده است، در ادامه عملیات مذکور تشریح می‌گردد.

تفریق. برای به دست آوردن اختلاف دو بردار در فضای گسسته، حرکات ضروری برای تغییر راه حل S_j به S_i با عنوان $M_{j \rightarrow i}$ تعریف شده است که از طریق تغییر عناصر بدست می‌آید. اختلاف بین دو راه حل به صورت رابطه ۱۵ بدست می‌آید.

$$M_{j \rightarrow i} = S_i \ominus S_j \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

این راه حل بدین معناست که چنانچه حرکات در فهرست $M_{j \rightarrow i}$ روی راه حل S_j اعمال شود، راه حل S_i بدست خواهد آمد. ضرب. با در نظر گرفتن $F \in [0, 1]$ که یک عدد اعشاری است و $M' = F \times |M|$ ، عملگر ضرب به این معناست که تعدادی از حرکات موجود در فهرست $M_{j \rightarrow i}$ انتخاب می‌شود. درواقع برای تکمیل کردن عملگر، از پارامتر F استفاده می‌شود که گامی تصادفی به سمت بهترین جواب تعریف شده است.

جمع. اگر X موقعیت و M' فهرست حرکات باشد، $X + M'$ به معنای اعمال فهرست حرکات M' روی بردار X است که موقعیت جدیدی در فضا ایجاد می‌کند. برای تفهیم این ایده شکل ۶ را در نظر بگیرید.

$$v_{i_2,G} = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 2 \end{bmatrix} \quad v_{i_3,G} = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & 2 \end{bmatrix} \leftarrow$$

شکل ۶. بهترین کروموزوم و کروموزوم انتخاب شده برای جهش

در کروموزوم انتخاب شده برای جهش، موقعیت‌هایی که با پیکان نمایش داده شده‌اند، با بهترین جواب متفاوت هستند. $v_{i_2.G}$ باید فهرست حرکاتی تعریف شود که وقتی روی $v_{i_3.G}$ اعمال شود، $v_{i_2.G}$ تولید شود. حرکات برای این مثال مطابق رابطه ۱۶ است.

$$v_{i_2.G} - v_{i_3.G} = \{(2,6);(4,2);(5,4);(6,5)\} \tag{۱۶}$$

این به بدین مفهوم است که موقعیت ژن دوم در کروموزوم انتخاب شده باید با موقعیت ژن ششم جابجا شود تا با موقعیت ششم بهترین کروموزوم یکسان شود. این جابجایی ژن فقط توالی عملیات را روی ماشین تغییر می‌دهد، اگر در کروموزوم انتخاب شده عملیات روی ماشینی متفاوت از بهترین کروموزوم پردازش شود، باید نوع ماشین را نیز با آن هماهنگ کرد. در این مثال و در بهترین کروموزوم، عملیات ۲ از کار ۳ روی ماشین ۱ پردازش شده است، اما در کروموزوم انتخاب شده عملیات ۲ از کار ۳ روی ماشین ۲ پردازش می‌شود. بنابراین پس از جابجایی توالی در کروموزوم انتخاب شده باید تخصیص ماشین نیز با بهترین کروموزوم هماهنگ شود. در نهایت چنانچه جواب خارج از فضای موجه باشد، باید سازوکار اصلاحی به فضای موجه برگردد. این فرایند در شکل ۷ نشان داده شده است.

$$v_{i_3.G} = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & 2 \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & 2 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 2 \end{bmatrix} \quad mv_{i.G+1} = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 2 \end{bmatrix}$$

(تطبیق توالی) جابه جایی ژن های ۲ و ۶ (تطبیق توالی) تطبیق تخصیص موجه کردن جواب

شکل ۷. نحوه عملکرد عملگر جهش الگوریتم تکامل تفاضلی

با توجه به اینکه $F \in [0, 1]$ ، اگر $F = 0.3$ ، $M' = [F \times |M|]$ برابر با حرکت اول فهرست M به شکل $M' = \{(2,6)\}$ است [۳۶] که در کدنویسی این مساله سه جواب از میان جواب‌ها به نام‌های A ، B و C به تصادف انتخاب می‌شوند.

```
S=randsample(Q,3);
A=S(1);
B=S(2);
C=S(3);
```

سپس عدد بتا که بین حد بالا و پایین بتا است به شرح زیر ایجاد می‌شود.

```
BetaLb= -0.3*ones(1, nvar);
BetaUb= 0.9*ones(1,nvar);
beta=unifrnd(BetaLb, BetaUb);
```

سپس بردار جواب جدید بر اساس رابطه جواب‌های تصادفی انتخاب شده به شرح زیر بدست می‌آید.

```
u=pop(A). Par.x+beta. *(pop(B).Par.x-pop(C).Par.x);
```

تقاطع. برای تنوع بخشی بردارهای جهش یافته، عملگر تقاطع بکار گرفته می‌شود که بردار تقاطع یافته به صورت رابطه ۱۷ نمایش داده می‌شود.

$$tv_{i.G+1} = (tv_{1i.G+1} \cdot tv_{2i.G+1} \cdot \dots \cdot tv_{Di.G+1}) \tag{۱۷}$$

بردار تقاطع یافته دارای D عنصر است که به تعداد متغیرهای تصمیم مسئله است، بردار تقاطع یافته به صورت رابطه ۱۸ محاسبه می‌گردد که در آن $randb(j)$ عنصر j ام مولد عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ است، CR ضریب تقاطع است که در بازه $[0, 1]$ قرار گرفته است و مقدار آن توسط کاربر تعیین می‌گردد که در این مساله مقدار ضریب تقاطع ۰.۵ لحاظ شده است. رابطه (۱۸)

$$tv_{ji.G+1} = \begin{cases} mv_{ji.G+1} & \text{if } (randb(j) \leq CR \text{ or } j = rnbr(i)). \quad j = 1.2. \dots .D \\ v_{ji.G} & \text{if } (randb(j) > CR \text{ or } j \neq rnbr(i)) \end{cases}$$

همان‌گونه که در رابطه فوق نشان داده است $\{1.2. \dots .D\}$ یکی از عناصر جواب مسئله است که به صورت تصادفی انتخاب شده تا این اطمینان وجود داشته باشد تا $tv_{i.G+1}$ حداقل یکی از عناصر خود را از $mv_{i.G+1}$ گرفته است؛ به عبارت بهتر اطمینان حاصل می‌شود که جواب آزمایشی با جواب اولیه یکسان نیست و حداقل در یک عنصر متفاوت است که کدنویسی این مساله به ازاء هر یک از بردارها عدد بین صفر و یک به صورت زیر ارائه شده است.

```
pop(i).Par.x=rand([1,nvar]);
pop(i)=fitness(pop(i),data);
```

انتخاب. برای پذیرش و یا عدم پذیرش جواب آزمایشی ایجاد شده در جمعیت جدید $G+1$ ، مقایسه بین جواب آزمایشی $tv_{i.G+1}$ و جواب اولیه $v_{i.G}$ انجام می‌شود و سپس جواب منتخب به جمعیت بعدی انتقال می‌یابد که در کدنویسی این مساله درایه‌هایی که می‌بایست تغییر نماید از بردار جواب جدید گرفته شده و به شرح زیر محاسبه می‌گردد.

```
x(J)=u(J);
newpop.Par.x=x;
newpop=fitness(newpop,data);
if dominate(newpop.fit,pop(i).fit)
pop(i)=newpop;
end
```

سپس عملیات مرتب سازی جواب‌ها به صورت زیر انجام می‌شود.

```
F=non_dominated_sorting(pop);
F=crowding_distance(F);
pop=sorting(F);
```

در ادامه بهترین از مجموع جواب‌ها انتخاب و به جمعیت بعدی منتقل می‌شود.

```
Pop=pop(1:npop);
```

شرط توقف. زمانی که تعداد مشخصی از نسل‌ها تعیین شد، فرایند الگوریتم متوقف می‌شود [۱۸] که در این مساله اندازه جمعیت $npop = 50$ می‌باشد.

الگوریتم تکاملی تفاضلی چند هدفه. یک روش چند هدفه است که با بیش از یک تابع هدف کار می‌کند. در بسیاری از موقعیت‌ها در دنیای واقعی، اهداف و معیارهای متعددی در اکثر مسائل تصمیم‌گیری عملی وجود دارد. بهینه‌سازی چند هدفه که به عنوان بهینه‌سازی برداری شناخته می‌شود زیرا بردار اهداف باید به جای یک هدف واحد به طور همزمان بهینه شود. درچنین مواردی یک راه‌حل بهینه واحد وجود ندارد بلکه طیف گسترده‌ای از راه‌حل‌ها که قابل مقایسه‌اند، وجود دارد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش به بررسی مسئله زنجیره تأمین چهار سطحی شامل مشتری، خرده فروش، توزیع‌کننده و تأمین‌کننده پرداخته شد. همچنین با توجه به اهمیت مقادیر سفارش‌دهی، انبارش و فروش از دست رفته، از جمله اهداف مطالعه موردی کمیته‌سازی هزینه‌های مذکور می‌باشد، از طرفی هدف دیگر مدل نسبت تقاضای مشتری که برآورده نمی‌شود به کل تقاضا بوده است. باتوجه به موارد مذکور، این پژوهش به دنبال

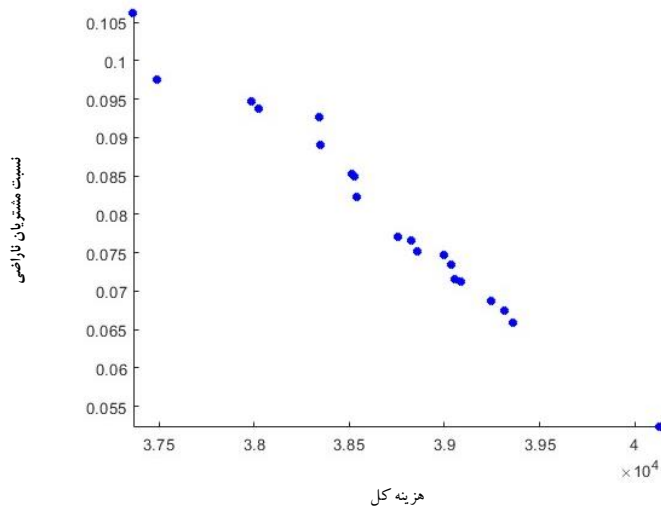
طراحی یک زنجیره تأمین چهارسطحی با توالی نهادهای مختلف بوده که از سیاست (R,Q) برای بازپرسازی موجودی کالاها استفاده می‌نماید. متغیرهای مستقل (قابل کنترل) که در این مقاله با تحلیل آن‌ها می‌توان پاسخ‌ها مناسبی برای مساله یافت شامل نقطه سفارش مجدد خرده فروش و مقدار سفارش مجدد خرده فروش می‌باشد.

از سوی دیگر، متغیرهای وابسته (پاسخ) مورد انتظار عبارتند از هزینه کل و نسبت تقاضای برآورده نشده به کل تقاضای مشتریان می‌باشد. با توجه به اهداف مدل پژوهش و احتمالی بودن مقادیر آن‌ها، ابتدا با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها به برآورد دو تابع هدف هزینه موجودی و نسبت تقاضای مشتری که برآورده نمی‌شود به کل تقاضا اقدام گردید و سپس برای طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی به ترتیب از نرم‌افزارهای دیزاین اکسپرت نسخه ۱۳.۰.۵۰ و ای. دی نسخه ۸.۲.۵ استفاده شد. در این پژوهش پس از مدل‌سازی بر اساس ادبیات تحقیق و مطالعه موردی با استفاده از داده‌های مربوط به سطح موجودی واقعی سفارش داده شده کالابرای خرده فروش و میزان تقاضای مشتری از خرده فروش، توابع احتمالی آن بدست آمد و پس از صحت‌سنجی مدل با روش چانگ بوسیله طراحی آزمایش‌ها رابطه بین دو نوع متغیر (مستقل و پاسخ) مشخص گردید و تعدادی آزمایش با استفاده از روش باکس-بنکن به عنوان جواب‌های اولیه الگوریتم فرا ابتکاری ایجاد شد. در ادامه، با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی مقادیر نقطه سفارش مجدد و مقدار سفارش بدست آمد و سپس با استفاده از شبیه‌سازی مقادیر توابع هدف برآورده شد که نتایج حاصل از آن برای مسئله مورد مطالعه به شرح جدول ۸ است.

جدول ۸. بخشی از مجموعه جواب‌های پارتنو بدست آمده بر اساس ترکیب مقادیر مختلفی از متغیرهای تصمیم‌نمای الگوریتم

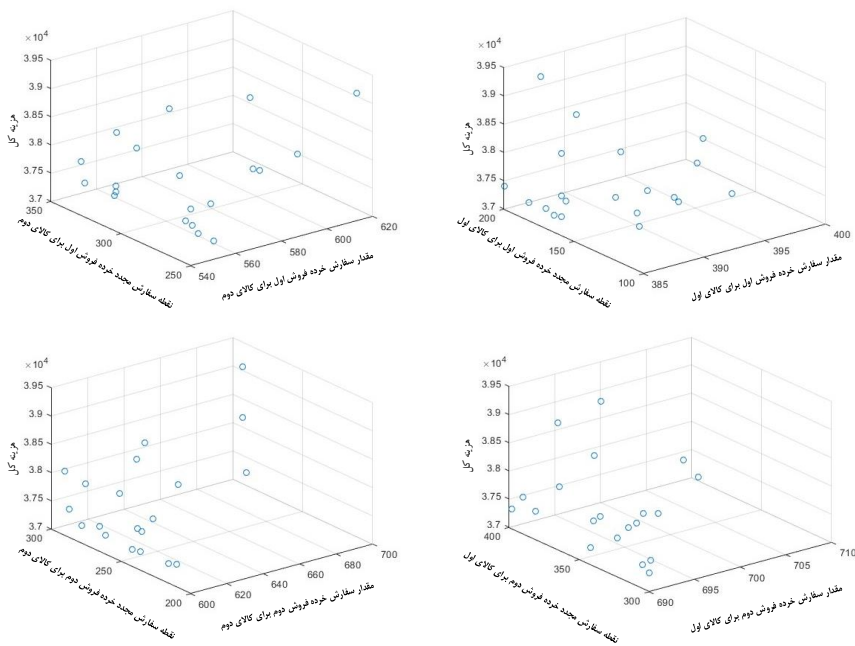
R11	R12	R21	R22	Q11	Q12	Q21	Q22	Max Iteration	npop	TC(T) هزینه کل	CD (T) نسبت مشتریان ناراضی
۱۷۶	۲۶۸	۳۶۴	۲۹۰	۳۷۸	۵۹۸	۶۹۰	۶۰۰	۱۰۰	۵۰	۳۸۱۳۹.۶۹	۰.۰۸۹۳۸۸
۱۶۴	۳۴۲	۳۴۲	۲۴۲	۳۸۵	۵۵۰	۶۹۰	۶۰۰	۹۵	۵۰	۳۷۳۰۱.۱	۰.۰۸۷۲۹۴
۱۱۳	۲۵۲	۳۱۵	۲۵۶	۳۸۹	۵۵۰	۶۹۰	۶۳۶	۹۰	۵۰	۳۷۹۷۲.۴۵	۰.۰۸۸۴۷۳
...
۱۸۲	۳۲۱	۳۱۱	۲۷۸	۳۸۵	۵۵۰	۶۹۱	۶۰۰	۱۵	۵۰	۳۷۳۱۷.۱۳	۰.۰۸۷۳۲۸
۱۵۱	۳۲۶	۳۰۰	۲۲۹	۳۸۹	۵۵۴	۶۹۱	۶۵۳	۱۰	۵۰	۳۸۳۴۱.۱۳	۰.۰۸۹۰۸۴
۱۰۶	۲۵۱	۳۰۴	۲۸۵	۳۸۶	۵۷۱	۶۹۰	۶۴۰	۵	۵۰	۳۸۳۴۰.۰۴	۰.۰۸۹۱۹۸

شکل ۸ مجموعه جواب پارتو بر اساس نتایج بدست آمده را نشان می‌دهد.



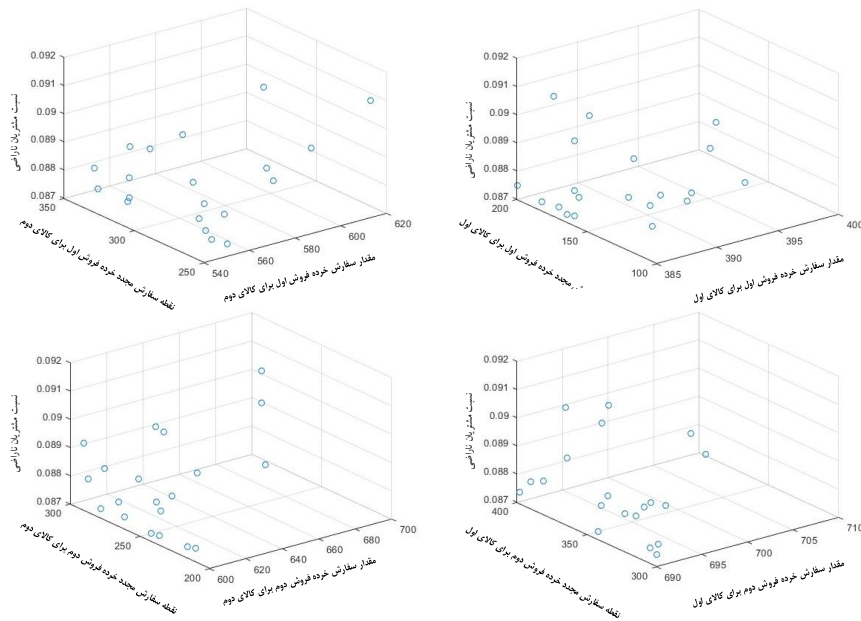
شکل ۸. مجموعه جواب پارتو بر اساس نتایج الگوریتم تکاملی تفاضلی

شکل ۹ مجموعه جواب پارتو بر اساس مقادیر R_{ij} و Q_{ij} و هزینه کل را نشان می‌دهد.



شکل ۹. مجموعه جواب پارتو بر اساس R_{ij} و Q_{ij} و هزینه کل

شکل ۱۰ مجموعه جواب پارتو بر اساس مقادیر R_{ij} و Q_{ij} و نسبت مشتریان ناراضی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. مجموعه جواب پارتو بر اساس R_{ij} و Q_{ij} و نسبت مشتریان ناراضی

با توجه به این که بسیاری از اقلام زنجیره تأمین صنعت برق دارای عمر کوتاه، تقاضای احتمالی و نرخ خرابی بالا هستند بنابراین مطالعه این دسته اقلام و همچنین ملاحظه سطوح تولیدکنندگان اقلام و تأمین‌کنندگان مواد اولیه در زنجیره تأمین می‌تواند مطالعه ارزشمندی برای تحقیقات آینده باشد. از سوی دیگر با توجه به این که مواد اولیه برخی اقلام این صنعت وارداتی هستند بنابراین می‌توان اختلال در زنجیره تأمین این صنعت را مورد بررسی قرار داد. همچنین در این پژوهش از الگوریتم تکاملی تفاضلی استفاده شده است، بنابراین پیشنهاد می‌شود نتایج دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری با الگوریتم مذکور در این مقاله مقایسه و تحلیل شوند.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدهی بی طرف ولی متخصص بود است و نویسندگان هیچ گونه تعارض منافی ندارند.

منابع

1. Azar, A., Shahbazi, M., Yazdani, H., & Mahmoudian, O. (2019). Assessment of Supply Chain Resilience of Electric Power Industry in Iran: Fuzzy Approach. *Journal of Energy Planning and Policy Research*, 5(1), 7-28.
2. Bahrampour, P., Safari, M., & Taraghdari, M. B. (2016). Modeling multi-product multi-stage supply chain network design. *Procedia economics and finance*, 36, 70-80.
3. Baloch, G., Gzara, F., & Elhedhli, S. (2022). Covid-19 PPE distribution planning with demand priorities and supply uncertainties. *Computers & Operations Research*, 146, 105913.
4. Blessley, M., & Mudambi, S. M. (2022). A trade war and a pandemic: Disruption and resilience in the food bank supply chain. *Industrial Marketing Management*, 102, 58-73.
5. Brandao, M. S., & Godinho-Filho, M. (2022). Is a multiple supply chain management perspective a new way to manage global supply chains toward sustainability?. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134046.

6. Bressanelli, G., Pigosso, D. C., Saccani, N., & Perona, M. (2021). Enablers, levers and benefits of Circular Economy in the Electrical and Electronic Equipment supply chain: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126819.
7. Cui, L., Yue, S., Nghiem, X. H., & Duan, M. (2023). Exploring the risk and economic vulnerability of global energy supply chain interruption in the context of Russo-Ukrainian war. *Resources Policy*, 81, 103373.
8. Duan, Q., & Liao, T. W. (2013). Optimization of replenishment policies for decentralized and centralized capacitated supply chains under various demands. *International Journal of Production Economics*, 142(1), 194-204.
9. Gozgor, G., Khalfaoui, R., & Yarovaya, L. (2023). Global supply chain pressure and commodity markets: Evidence from multiple wavelet and quantile connectedness analyses. *Finance Research Letters*, 54, 103791.
10. Hegerty, B., Hung, C. C., & Kasprak, K. (2009, November). A comparative study on differential evolution and genetic algorithms for some combinatorial problems. In *Proceedings of 8th Mexican international conference on artificial intelligence*, 9, 13.
11. Iwan, M., Akmeliawati, R., Faisal, T., & Al-Assadi, H. M. (2012). Performance comparison of differential evolution and particle swarm optimization in constrained optimization. *Procedia Engineering*, 41, 1323-1328.
12. Iyer, A. V., Vedantam, A., & Lacourbe, P. (2023). Recycled content claims under demand benefit and supply uncertainty: Multi-period model and application to glasswool insulation. *European Journal of Operational Research*, 309(2), 745-761.
13. Jafarnejhad Chaghoooshi, A., Kazemi, A., & Arab, A. (2016). Identification and Prioritization of Supplier's Resiliency Evaluation Criteria Based on BWM. *The Journal of Industrial Management Perspective*, 6(3), 159-186. (In Persian).
14. Jha, H., & Mohan, U. (2023). A multi-period discrete event simulation model for comparing synchronous and asynchronous facility reopening in global supply chains affected by disruption. *Supply Chain Analytics*, 2, 100010.
15. Juan, A. A., Kelton, W. D., Currie, C. S., & Faulin, J. (2018, December). Simheuristics applications: dealing with uncertainty in logistics, transportation, and other supply chain areas. In *2018 winter simulation conference (WSC)*, 3048-3059. IEEE.
16. Karakaya, S., & Balcik, B. (2023). Developing a National Pandemic Vaccination Calendar Under Supply Uncertainty. Available at SSRN 4380147.
17. Kazancoglu, Y., Ekinci, E., Mangla, S. K., Sezer, M. D., & Ozbiltekin-Pala, M. (2023). Impact of epidemic outbreaks (COVID-19) on global supply chains: A case of trade between Turkey and China. *Socio-Economic Planning Sciences*, 85, 101494.
18. Khishtandar, S., Zandieh, M., Dorri Nokarani, B., & Ranaei Siadat, S. O. (2016). Evolutionary Algorithms for Location Allocation Biomethane Supply Chain Problem. *Journal of Industrial Management Perspective*, 6(3), Autumn 2016, 29-54.
19. Kumar, S., Chary, G. H. V. C., & Dastidar, M. G. (2015). Optimization studies on coal-oil agglomeration using Taguchi (L16) experimental design. *Fuel*, 141, 9-16.
20. Kwon, O., Im, G. P., & Lee, K. C. (2007). MACE-SCM: A multi-agent and case-based reasoning collaboration mechanism for supply chain management under supply and demand uncertainties. *Expert systems with applications*, 33(3), 690-705.
21. Mohammed, A., Al-shaibani, M. S., & Duffuaa, S. O. (2023). A meta-heuristic-based algorithm for designing multi-objective multi-echelon supply chain network. *Applied Soft Computing*, 147, 110774.
22. Mora, C. J., Malik, A., & Murray, J. (2024). From mines to consumption via global supply chains: A viewpoint on assessing modern slavery and disease interactions. *Environmental Impact Assessment Review*, 104, 107353.
23. Morovati Sharifabadi, A., Mirghafouri, S. H., & Mir Fakhreddini, S. H. (2021). Designing a probabilistic model of sustainable supply chain in the electricity industry with the influence of renewable products. *Organizational Resources Management Researchs*, 11(1), 105-128.
24. Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Zahiri, B. (2015). A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. *Computers & chemical engineering*, 82, 115-128.
25. Naderi, B., Govindan, K., & Soleimani, H. (2020). A Benders decomposition approach for a real case supply chain network design with capacity acquisition and transporter planning: wheat distribution network. *Annals of Operations Research*, 291, 685-705.
26. Nya, D. N., & Abouaïssa, H. (2023). A robust inventory management in dynamic supply chains using an adaptive model-free control. *Computers & Chemical Engineering*, 179, 108434.
27. Pan, W., So, K. C., & Xiao, G. (2022). Benefits of backup sourcing for components in assembly systems under supply uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 302(1), 158-171.
28. Pellicelli, M. (2023). Chapter Eight - War in Europe: another blow to the global supply chains, *The Digital Transformation of Supply Chain Management, Logistics and Law*, 213-226.

29. Shoja, A., Molla-Alizadeh-Zavardehi, S., & Niroomand, S. (2019). Adaptive meta-heuristic algorithms for flexible supply chain network design problem with different delivery modes. *Computers & Industrial Engineering*, *138*, 106107.
30. Shurrab, H. (2019). *Tactical planning in engineer-to-order environments*. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).
31. Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, *11*, 341-359.
32. Tsai, S. C., & Chen, S. T. (2017). A simulation-based multi-objective optimization framework: A case study on inventory management. *Omega*, *70*, 148-159.
33. Vieira, A. A., Figueira, J. R., & Fragoso, R. (2023). A multi-objective simulation-based decision support tool for wine supply chain design and risk management under sustainability goals. *Expert Systems with Applications*, 120757.
34. Yang, Z., Tang, K., & Yao, X. (2011). Scalability of generalized adaptive differential evolution for large-scale continuous optimization. *Soft Computing*, *15*, 2141-2155.
35. Zahiri, B., Zhuang, J., & Mohammadi, M. (2017). Toward an integrated sustainable-resilient supply chain: A pharmaceutical case study. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *103*, 109-142.
36. Zandieh, M., & Ahmadi, E. (2014). Robust and stable scheduling for FJSP under random machine breakdown by use of genetic algorithm and simulation. *Industrial Management Journal*, *6*(3), 511-534.
37. Zhang, F. B., Wang, Z. L., & Yang, M. Y. (2015). Assessing the applicability of the Taguchi design method to an interrill erosion study. *Journal of Hydrology*, *521*, 65-73.