



Paper Type: Original Article



Presenting a Robust Optimization Model for the Design of the Green Loop Supply Chain Network in the Power Plant by Taking into Account the Disruption in the Supply Chain

Javad Mohammadghasemi¹, Seyyed Esmacil Najafi^{2*}, Mohammad Fallah¹, Mohammad Reza Nabatchian¹

¹ Department of Industrial Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; javad.ghasemi216@gmail.com; fallahm1343@gmail.com; mohammadrezanabatchian@yahoo.com.

² Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; najafi1515@yahoo.com.

Citation:



Mohammadghasemi, J., Najafi, S. E., Fallah, M., & Nabatchian, M. R. (2023). Presenting a robust optimization model for the design of the green loop supply chain network in the power plant by taking into account the disruption in the supply chain. *Journal of decisions and operations research*, 8(4), 1032-1049.

Received: 15/01/2023

Reviewed: 17/02/2023

Revised: 09/04/2023

Accepted: 01/05/2023

Abstract

Purpose: This paper focuses on modeling a sustainable electricity industry supply chain network under uncertainty. The aim of presenting this supply chain network is to meet customer demands for solar panels to generate clean energy.

Methodology: A mixed-integer linear programming model, including facility location, supplier selection, optimal flow allocation, and determination of the optimal price of solar panels in the network, is considered. The sustainability objectives of the model include maximizing the profit of the supply chain network, minimizing greenhouse gas emissions, and maximizing reliability. A robust optimization method is also considered to control uncertain parameters, and precise and innovative techniques are used to solve the model.

Findings: The results of the model show that with an increase in network reliability, the current net value in the network decreases, and greenhouse gas emissions in the network increase. Additionally, the analysis of the results shows that with an increase in the network's uncertainty rate, the network's current net value and reliability decrease, and greenhouse gas emissions increase. Finally, the statistical test results also show that there was no significant difference between the averages of the number of practical solutions, the maximum spread, and the metric distance between the two algorithms, and only a significant difference exists between the solution times of the two algorithms. The results of the presented solution methods demonstrate their high efficiency in solving the sustainable electricity industry supply chain model.

Originality/Value: In the proposed model, essential decisions such as supplier selection, establishment of production centers, optimal product flow allocation, and pricing of solar panels are made. On the other hand, further analyses of 15 numerical examples show the high efficiency of the MOALO and MOWOA algorithms compared to the epsilon-constraint method.

Keywords: Electricity industry supply chain, Robust optimization, Reliability, Sustainability, Metaheuristic algorithm.

Corresponding Author: najafi1515@yahoo.com



Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



ارایه مدل بهینه‌سازی استوار امکانی برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین پایدار صنعت برق با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان

جواد محمدقاسمی^۱، سید اسماعیل نجفی^۲، محمد فلاح^۱، محمدرضا نباتچیان^۱

^۱ گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^۲ گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

هدف: این مقاله به مدل‌سازی یک شبکه زنجیره‌تامین پایدار صنعت برق تحت عدم قطعیت می‌پردازد. هدف از ارایه این شبکه زنجیره‌تامین برآورده‌سازی تقاضای مشتریان در رابطه با پنل‌های خورشیدی به منظور تولید انرژی پاک است.

روش‌شناسی پژوهش: یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط شامل مکان‌یابی مراکز تولید، انتخاب تامین‌کننده، تخصیص بهینه جریان و تعیین قیمت بهینه پنل‌های خورشیدی در شبکه در نظر گرفته شده است. اهداف پایداری مدل شامل بهینه‌سازی سود شبکه زنجیره‌تامین، کمینه‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهینه‌سازی قابلیت اطمینان است. به منظور کنترل پارامترهای غیرقطعی مدل نیز روش بهینه‌سازی استوار امکانی در نظر گرفته شده و از روش‌های دقیق و فرا ابتکاری برای حل مدل بهره گرفته شده است.

یافته‌ها: نتایج مدل نشان داد با افزایش قابلیت اطمینان در شبکه، میزان ارزش خالص فعلی در شبکه کاهش و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در شبکه افزایش یافته است. همچنین، تحلیل نتایج نشان داد که با افزایش نرخ عدم قطعیت در شبکه، ارزش خالص فعلی و قابلیت اطمینان در شبکه کاهش و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش یافته است. در نهایت، نتایج آزمون آماری نیز نشان داد که هیچ‌گونه اختلاف معناداری بین میانگین‌های تعداد جواب کارا، بیشترین گسترش و فاصله متریک بین دو الگوریتم وجود نداشته و تنها بین زمان حل دو الگوریتم اختلاف معنادار وجود دارد. نتایج روش‌های حل ارایه‌شده نشان از کارایی بالای آن‌ها در حل مدل شبکه زنجیره‌تامین پایدار صنعت برق دارند.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: در مدل پیشنهادی تصمیمات مهمی از جمله انتخاب تامین‌کننده، احداث مراکز تولید، تخصیص بهینه جریان محصول و قیمت‌گذاری پنل خورشیدی اتخاذ گردید. از سوی دیگر، تحلیل‌های بیشتر بر روی ۱۵ مثال عددی نشان از کارایی بالای دو الگوریتم MOALO و MOWOA نسبت به روش اپسیلون محدودیت بود.

کلیدواژه‌ها: زنجیره‌تامین صنعت برق، بهینه‌سازی استوار امکانی، قابلیت اطمینان، پایداری، الگوریتم فرا ابتکاری.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات در عرصه اقتصادی و صنعت با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. هدف نهایی سازمان‌ها، افزایش سود و هم‌چنین بقا در بازار رقابتی جهانی با در نظر گرفتن قوانین و مقررات دولتی شرایط زیست‌محیطی و هم‌چنین جنبه‌های اجتماعی است [1]. رشد سریع فناوری و محدود بودن منابع در دسترس سازمان‌ها را به سمت مفهومی به نام زنجیره‌تامین سوق داده است. در این مفهوم سازمان‌ها در





تلاش هستند تا با ایجاد یک شرایط یکپارچه در طول شبکه زنجیره‌تامین به طور هم‌زمان به تمامی اهداف خود برسند [2]. تغییر در فضای رقابتی بازار و هم‌چنین سوق یافتن شرکت‌ها به ارایه محصولات در سطح جهانی، منجر به آن شده است تا سازمان‌ها برای بقا در بازار و کسب سهم بیشتر از فروش محصولات در بازارهای جهانی، به بهینه‌سازی زنجیره‌تامین شرکت خود برآیند تا بتوانند پاسخگوی سریع نیازهای مشتری در کوتاه‌ترین زمان، کمترین هزینه و بالاترین کیفیت را داشته باشند. از این رو بایستی به‌طور دقیق کلیه سطوح زنجیره‌تامین از تامین‌کنندگان مواد اولیه تا توزیع محصولات به مشتریان، رصد، برنامه‌ریزی و کنترل شود [3]، [4].

یکی از مهم‌ترین صنایعی که مدیریت زنجیره‌تامین در آن نقش مهمی ایفا می‌کند، صنعت برق می‌باشد. در صنعت برق، فرآیند تولید و توزیع برق به مصرف‌کنندگان توسط تشکلهای دولتی به‌عنوان صنایع بالادست انجام می‌گیرد [5]. سازندگان تجهیزات برقی به‌عنوان صنایع پایین‌دستی شناخته می‌شوند که مصرف‌کننده بیش از ۷۰٪ سهم بازار محصولات فلزی هستند. در عین حال سهم این مواد اولیه در زنجیره تولید، قیمت تمام شده و جریان نقدینگی این صنایع بسیار بالا است. تنوع بالای گروه کالایی صنعت برق و الکترونیک اهمیت لجستیک در این صنعت را بالاتر برده است، چرا که هر گروه نیازمند برنامه‌ریزی دقیق برای ارایه خدمات لجستیک می‌باشند [6]. وجود تنوع کالایی از کالاهای بسیار کوچک حساس تا کالاهایی همچون توربین‌های غول‌پیکر که نیازمند مدیریت لجستیک قوی است، نشان‌دهنده این اهمیت می‌باشد. صنعت برق و الکترونیک علاوه بر برنامه بلندمدت خود، به دنبال تولید انرژی پاک و آسیب کمتر به محیط‌زیست نیز می‌باشد. به همین منظور در کنار رفع تمامی موانع مالی و افزایش سرمایه‌گذاری در صنعت برق و الکترونیک، به دنبال استفاده هرچه بهتر از زنجیره‌تامین پایدار می‌باشد که می‌تواند مسیر رسیدن به اهداف صنعت برق و الکترونیک را تسهیل کند.

تولید انرژی از طریق خورشید، امروزه توانسته است تا علاوه بر کاهش هزینه‌های توزیع برق در دنیا، اثرات مخرب زیست‌محیطی را نیز کاهش داده است [7]. تاثیرات زیست‌محیطی بالقوه مرتبط با انرژی خورشیدی را می‌توان بر اساس عوامل مختلفی طبقه‌بندی کرد که برخی از آن‌ها شامل تاثیرشان بر کاربری زمین، تاثیرات اکولوژیکی و تاثیرات آن‌ها بر آب، هوا و خاک است. در ضمن استفاده از این انرژی ممکن است تاثیرات اجتماعی-اقتصادی متفاوتی نیز در برداشته باشد که بسته به نوع فناوری مورد استفاده بسیار متفاوت و متمایز هستند [8]. یکی از تکنولوژی‌های حاضر، پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک هستند که فرآیند طراحی شبکه زنجیره‌تامین آن، امروزه به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی مطرح شده است [9]. در این مقاله با توجه به اهمیت موضوع، تلاش شده است تا مدلی برای مدیریت زنجیره‌تامین ارایه گردد. در این مدل هدف مدیریت تامین، تولید و توزیع پنل‌های خورشیدی به‌منظور استفاده حداکثری از انرژی خورشیدی است. برای این منظور یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط شامل مکان‌یابی مراکز تولید، انتخاب تامین‌کننده، تخصیص بهینه جریان و تعیین قیمت بهینه پنل‌های خورشیدی در شبکه در نظر گرفته شده است. اهداف پایداری مدل شامل بهینه‌سازی سود شبکه زنجیره‌تامین، کمینه‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهینه‌سازی قابلیت اطمینان می‌باشد. به‌منظور کنترل پارامترهای غیرقطعی مدل نیز روش بهینه‌سازی استوار امکانی در نظر گرفته شده و از روش‌های دقیق و فرا ابتکاری برای حل مدل بهره گرفته شده است. سهم اصلی این مقاله شامل موارد زیر است:

۱. توسعه مدلی مبتنی بر قابلیت اطمینان و قیمت‌گذاری پنل‌های خورشیدی.
۲. ادغام تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی در طراحی شبکه زنجیره‌تامین.
۳. استفاده از روش بهینه‌سازی استوار امکانی به‌منظور مقابله با عدم قطعیت شبکه.
۴. استفاده از روش‌های مختلف جهت حل مساله.

این مقاله در ۶ بخش تدوین شده است. در بخش دوم به مرور ادبیات تحقیق پرداخته شده است. در بخش سوم مدل شبکه زنجیره‌تامین در صنعت برق برای پنل‌های خورشیدی ارایه شده است. در بخش چهارم به طراحی راه‌حل اولیه الگوریتم‌های فرا ابتکاری پرداخته شده است. در بخش پنجم به تجزیه و تحلیل مثال‌های عددی مختلف پرداخته شده است. در بخش ششم نیز نتیجه‌گیری تحقیق و پیشنهادها آتی تحقیق ارایه شده است.

۲- مرور ادبیات تحقیق

آلامرو و بریساد [10] مدلی برای نمایش سیستم پیچیده لجستیک معکوس برای بازیابی باتری‌های خودروهای برقی طراحی کردند. رویکرد استفاده شده توسط آن‌ها یک رویکرد سیستم دینامیک برای تعادل بین هزینه، درآمد و تصمیمات استراتژیکی و نظارتی بود.



ربانی و همکاران [11] به طراحی یک شبکه زنجیره‌تامین پایدار چند دوره‌ای و چندهدفه پرداختند. در این مدل، سطوح مختلف فناوری برای ناوگان وسایل نقلیه که منجر به هزینه‌های پولی و زیست‌محیطی مختلفی می‌شود، در نظر گرفته شده بود. برای حل مدل چندهدفه از روش اسپیلون محدودیت تقویت شده استفاده گردد. کلانتری خلیل آباد و همکاران [12] یک مدل برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته سبز با تقاضای تصادفی ارائه کردند. برای حل مدل، آن‌ها یک الگوریتم تجزیه *Benders* جدید شتاب دهنده همراه با روش برش بهینه پارتو به کار بستند. پهلوان و همکاران [13] یک مدل ریاضی خطی صحیح مختلط سه هدفه برای طراحی یک زنجیره‌تامین پایدار در صنعت آلومینیوم پیشنهاد کردند. آن‌ها برای حل این مدل از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری چندهدفه، الگوریتم گوزن قرمز چندهدفه و اسپیلون محدودیت برای دستیابی به پارتو بهینه استفاده کردند.

پور مهدی و همکاران [14] یک مدل ریاضی خطی چندهدفه تحت عدم قطعیت برای بهینه‌سازی زنجیره‌تامین پایدار فولادی توسعه دادند. عدم قطعیت موجود از طریق یک روش مبتنی بر سناریو در محیط تصادفی مدل‌سازی گردید و مدل چندهدفه پیشنهادی به دنبال یک رویکرد برنامه‌ریزی هدف فازی توسعه یافت. آن‌ها، یک مطالعه موردی واقعی در یکی از زنجیره‌های تامین فولاد فعال در ایران برای اعتبارسنجی مدل مورد بررسی قرار دادند. محتمشی و همکاران [15] یک مدل چندهدفه زنجیره‌تامین زیست‌محیطی با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی فازی تحت عدم قطعیت طراحی کردند که قادر است مینیمم تأثیرات متعدد زیست‌محیطی را در کنار هدف به حداقل رسانیدن هزینه‌ها در نظر بگیرد و بین آن‌ها تعادل برقرار سازد. برای حل مساله یک رویکرد فازی تعاملی مورد توسعه قرار گرفت. یک نمونه موردی واقعی صنعتی برای نشان دادن اهمیت و کاربرد مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. لطفی و همکاران [16] یک مدل بهینه‌سازی استوار احتمالی دومرحله‌ای برای شبکه زنجیره‌تامین انرژی‌های تجدید پذیر ارائه کردند. نتایج مدل آن‌ها نشان داد با افزایش ۲۰٪ ضریب جریمه محافظه‌کارانه، تابع هدف ۵٪/۰ افزایش می‌یابد. مدل آن‌ها به‌طور هم‌زمان به اتخاذ تصمیمات مکان‌یابی و تخصیص پرداخته است.

نیلی و همکاران [17] یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی با اعداد صحیح مختلط چندهدفه برای طراحی یک شبکه زنجیره‌تامین فتوولتائیک با پرداختن به هزینه‌های مرتبط سیستم، اثرات زیست‌محیطی و ارزش‌های اجتماعی ارائه کردند. مدل مربوطه هم‌چنین یک جریان معکوس را علاوه بر جریان روبه‌جلو معمولی در زنجیره‌تامین پیشنهادی برای مسایل محیطی و اجتماعی خاص در نظر می‌گیرد. به همین ترتیب، برای بهینه‌سازی مدل چندهدفه ارائه‌شده، از روش محدودیت ϵ -افزوده استفاده شده است که قادر به تضمین راه‌حل‌های بهینه پارتو است.

وفادارنیکجو و همکاران [18] یک چارچوب ارزیابی آسیب‌پذیری را برای شناسایی و ارزیابی خطرات مرتبط با زنجیره‌تامین برق در بریتانیا و مطالعه رابطه علت و معلولی بین آن‌ها با روش آزمایش و ارزیابی تصمیم‌گیری نوتروسوفیک پیشنهاد کردند. یافته‌ها نشان داد که بلاای طبیعی و تغییرات آب‌وهوایی حیاتی‌ترین خطرات هستند که پس‌از آن اقدامات صنعتی، مقرون‌به‌صرفه بودن، بی‌ثباتی سیاسی و خرابکاری/تروریسم قرار دارند. رنتیزلاس و همکاران [19] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلف برای شبکه زنجیره‌تامین پره‌های باد طراحی کردند. یافته‌ها نشان‌دهنده طراحی شبکه بهینه نیمه غیرمتمرکز، با ۳ تا ۴ تسهیلات پردازشی در سراسر اروپا در همه سناریوها است. بوسک آبادی و همکاران [20] یک مدل ریاضی فازی جدید برای یک مساله طراحی شبکه توزیع در یک سیستم زنجیره‌تامین سبز چند محصولی، چند دوره‌ای و چند سطحی پیشنهاد کردند. سه هدف این مدل به حداقل رساندن هزینه کل شبکه، به حداکثر رساندن سود خالص سرانه برای هر منبع انسانی و کاهش انتشار CO_2 در سراسر شبکه بود. آن‌ها برای حل مدل ریاضی خود از دو الگوریتم *NSGA-II* و *MOPSO* استفاده کردند.

تیرکلانی و همکاران [21] یک مدل ریاضی جدید را برای طراحی یک شبکه پایدار زنجیره‌تامین در طول شیوع *COVID-19* ارائه دادند. در این مدل تصمیمات مکان‌یابی، عرضه، تولید، توزیع، جمع‌آوری، قرنطینه، بازیافت، استفاده مجدد و انهدام اتخاذ شده است. هدف اصلی کمینه‌سازی هزینه‌های کل و میزان انتشار آلودگی به‌طور هم‌زمان است. جهت حل مساله از الگوریتم *MOGWO* و *NSGA-II* استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که الگوریتم *MOGWO* برای مقابله با مشکل قابل اعتمادتر است، به طوری که از نظر پراکندگی راه‌حل‌های پارتو حدود ۲۵٪ برتر از *NSGA-II* و از نظر کیفیت راه‌حل حدود ۲٪ برتر است. صالحی امیری و همکاران [22] یک شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته برای صنعت آوکادو با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های کل شبکه و بیشینه‌سازی فرصت‌های شغلی ایجاد شده ارائه نمودند. آن‌ها مدل خود را در یک مطالعه موردی واقعی در پوئبلا در مکزیک پیاده کردند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، تقاضا بیشترین تأثیر را بر این شبکه دارد که در آن کاهش ۲۵٪ در تقاضا می‌تواند هزینه کل (هدف اول) را تا ۴۰٪ افزایش دهد و راندمان اشتغال (هدف دوم) را تا حدود ۳۰٪ افزایش دهد.



راجاک و همکاران [23] یک مدل ریاضی برای تبدیل یک زنجیره‌تامین خطی سنتی به یک زنجیره‌تامین حلقه بسته برای یک سازمان واقع در هند ارایه کردند. این امر با ترکیب ساخت مجدد با لجستیک معکوس در زنجیره‌تامین برای دستیابی به پایداری و در نتیجه برآوردن اهداف توسعه پایدار انجام گردید. هدف تنها توجه به پایداری شبکه زنجیره‌تامین از ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی بود. آن‌ها از نرم‌افزار GAMS برای حل مدل خود استفاده نمودند. حسینی دهشیری و همکاران [24] یک مدل جامع از شبکه زنجیره‌تامین را برای محصول کاغذ سنگی پیشنهاد دادند که در آن هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها، افزایش پاسخگویی به مشتریان با به حداقل رساندن زمان حمل‌ونقل و نگرانی‌های زیست‌محیطی بود. برای حل مدل سه هدفه آن‌ها از روش تعاملی فازی و بهترین بدترین استفاده کردند. نتایج کاربردی تحقیق نشان می‌دهد که مدل ارایه شده از قابلیت و پتانسیل خوبی برای توسعه پایدار در زمینه کاغذ سنگی برخوردار است.

موگاله و همکاران [25] یک مدل چندهدفه از شبکه زنجیره‌تامین در راستای بهینه‌سازی هزینه‌های کل و انتشار کربن دی‌اکسید مدل‌سازی کردند. مدل ارایه شده توسط آن‌ها چند دوره‌ای و چند محصولی بود که حل آن توسط الگوریتم *NSGA-II* صورت گرفته بود. نتایج نشان می‌دهد که رویکرد دومرحله‌ای پیشنهادی نتایج قابل قبول‌تری ارایه می‌کند و از نظر محاسباتی سریع‌تر از رویکرد محدودیت اسیلون است. هم‌چنین این مطالعه اثرات مثبت قیمت‌گذاری انگیزشی را بر کالاهای برگشتی در شبکه لجستیک معکوس نشان می‌دهد و راه‌حل‌های مبادله‌ای متعددی را برای مدیران زنجیره‌تامین برای تصمیم‌گیری آگاهانه ارایه می‌دهد.

صفائی و همکاران [26] یک شبکه زنجیره‌تامین چند دوره‌ای چندلایه جدید ارایه کردند که کل هزینه‌های شبکه را به حداقل می‌رساند. این سطوح شامل تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز توزیع، مشتریان و واحدهای بازیافت و بازیابی قطعات در شبکه پیشنهادی بود. هم‌چنین، آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با در نظر گرفتن وسایل نقلیه کارخانه‌ها و خودروهای اجاره‌ای شرکت‌های حمل‌ونقل برای مساله پیشنهادی فرموله کردند. برای حل مدل در سایز کوچک از نرم‌افزار GAMS و در سایز بزرگ از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. چهار محلی و همکاران [27] از یک مدل تخفیف در شبکه زنجیره‌تامین استفاده کردند. آن‌ها از مدل تخفیف کمی در مدل استفاده و از الگوریتم تکامل دیفرانسیل اصلاح شده برای حل مدل بهره گرفتند. هم‌چنین تنظیم پارامتر الگوریتم پیشنهادی آن‌ها توسط روش تاگوچی انجام شده بود.

اکبری کاسگری و همکاران [28] شبکه زنجیره‌تامین پایدار چندهدفه برای صنعت مس را مدل‌سازی کردند. در این مدل هدف بیشینه‌سازی سود زنجیره‌تامین، کمینه‌سازی مصرف آب و آلانده‌های هوا و بیشینه‌سازی مطلوبیت اجتماعی بود. آن‌ها برای حل مدل از روش اسیلون محدودیت استفاده نمودند. همتا و همکاران [29] یک شبکه زنجیره‌تامین برای شرکت ایرانی تولیدی کننده تجهیزات ساختمانی طراحی کردند که در آن بازیگرانی نظیر شرکت مهندسی و قطعات، فروشندگان داخلی و فروشندگان بین‌المللی و خود شرکت حضور داشت. هدف آن‌ها از ارایه این مدل کمینه‌سازی هزینه‌های کل شبکه بود.

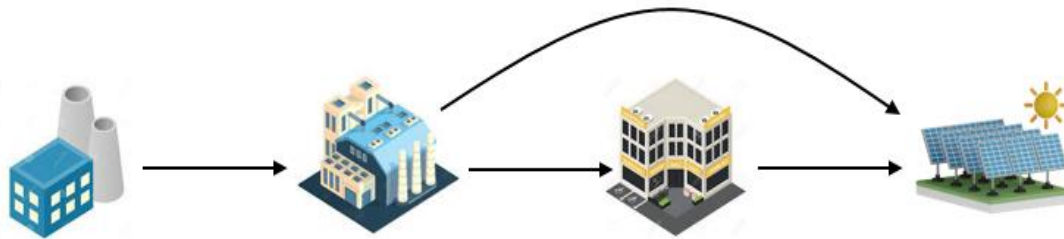
پال و همکاران [30] یک بازی استکلبرگ برای تعیین قیمت بهینه در دو کانال زنجیره‌تامین ارایه کردند. در این مدل علاوه بر تعیین قیمت‌ها در راستای بیشینه‌سازی سود، تصمیماتی مثل تعیین سطح بهینه نوآوری سبز، تلاش تبلیغاتی نیز تعیین می‌شد. نتایج نشان داد که زنجیره‌تامین دو کاناله کارآمدتر از زنجیره‌تامین تک کاناله برای محصولات سبز است. بارمن و همکاران [31] یک مدل زنجیره‌تامین سبز سه لایه با ساختار دو کاناله متشکل از یک تامین‌کننده، یک تولیدکننده و یک خرده‌فروش پیشنهاد کردند. هدف آن‌ها تعیین قیمت بهینه در فروش مستقیم و فروش غیرمستقیم به خرده‌فروش جهت بیشینه‌سازی بود. برای این امر آن‌ها مدل‌های متمرکز و غیرمتمرکز از بازی استکلبرگ را استفاده نمودند.

با مطالعه ادبیات موضوع و پیشینه تحقیقات می‌توان بیان کرد که مدل جامعی در خصوص طراحی شبکه زنجیره‌تامین در صنعت برق وجود نداشته و بیشتر مطالعات در حوزه‌های دیگر بوده است. از این رو در این مقاله با تمرکز بر فرآیند زنجیره‌تامین تولید پنل‌های خورشیدی برای تولید برق، مدل نوینی از آن طراحی شده است. در این مدل توابع پایداری اعم از بیشینه‌سازی سود شبکه زنجیره‌تامین، کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است. مفاهیمی همچون قیمت‌گذاری پنل‌های خورشیدی نیز در مدل ارایه شده در نظر گرفته شده است، لذا می‌توان نوآوری‌های مقاله را به شرح زیر بیان کرد:

۱. طراحی مدل نوینی از شبکه زنجیره‌تامین در صنعت برق.
۲. کنترل پارامترهای غیرقطعی با استفاده از رویکرد استوار امکانی.

۳- تعریف مساله

در این مقاله مدل نوینی از شبکه زنجیره‌تامین در صنعت برق ارائه شده است. در این شبکه و مطابق با شکل ۱، مجموعه‌ای از تامین‌کنندگان مواد اولیه، مواد لازم جهت تولید پنل‌های خورشیدی را در اختیار مراکز تولید قرار می‌دهند. مراکز تولید نیز با توجه به قیمت فروش محصولات در بازار، اقدام به تولید انواع مختلفی از پنل‌ها نموده و به‌صورت مستقیم و یا غیرمستقیم به مشتریان یا مراکز فروش عرضه می‌نمایند. مراکز فروش نیز تقاضای مشتریان از پنل‌های خورشیدی را برآورده می‌نمایند. بدین‌صورت تقاضای مشتریان وابسته به قیمت فروش محصولات در کانال مستقیم و غیرمستقیم است. هم‌چنین تقاضای مشتریان می‌تواند به‌صورت مستقیم از مراکز تولید و یا غیرمستقیم از مراکز فروش تامین گردد. تعیین قیمت فروش محصولات در کانال مستقیم و غیرمستقیم وابسته به کشش قیمت تقاضا و محصولات رقیب در بازار است.



شکل ۱- شبکه زنجیره‌تامین صنعت برق.

Figure 1- Electricity industry supply chain network.

در مدل ارائه شده به سه جنبه مختلف پایداری اعم از اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی پرداخته شده است. در نتیجه سه تابع هدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی، کمینه‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است. در تابع هدف اول، هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن نرخ بهره می‌باشد. در تابع هدف دوم، میزان تولید و حمل‌ونقل محصولات منجر به افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. در تابع هدف سوم، با در نظر گرفتن خرابی مراکز تولید و تامین‌کننده‌ها، هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان در تحویل حداکثری تقاضای مشتریان است. جهت دستیابی به توابع هدف در نظر گرفته شده، تصمیماتی همچون انتخاب تامین‌کننده‌ها، تعیین مکان مراکز تولید، تعیین مقدار بهینه تولید، تعیین قیمت فروش محصول در کانال مستقیم و غیرمستقیم بایستی اتخاذ گردد. بر این اساس مفروضات زیر برای مدل ریاضی بایستی در نظر گرفته شود:

۱. مساله چند محصولی، چند سطحی و چند دوره‌ای می‌باشد.
۲. چندین تامین‌کننده بالقوه در نظر گرفته شده است.
۳. تعداد و مکان مراکز تولید نامشخص می‌باشد.
۴. ظرفیت کل مراکز و تسهیلات از قبل معلوم و مشخص می‌باشد.
۵. پارامترهای تقاضا، هزینه‌های حمل‌ونقل به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.
۶. کمبود به‌صورت فروش از دست‌رفته در نظر گرفته شده است.
۷. نرخ خرابی همه مراکز بالقوه مشخص می‌باشد.

با توجه به مفروضات فوق، مجموعه، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری مساله به شرح زیر تعریف می‌گردد:

مجموعه

مجموعه مشتریان (پنل‌های خورشیدی) $i \in \{1, \dots, I\}$	I
مجموعه مراکز تولید پنل‌های خورشیدی $j \in \{1, \dots, J\}$	J
مجموعه مراکز فروش پنل‌های خورشیدی $l \in \{1, \dots, L\}$	L
مجموعه تامین‌کننده‌ها $s \in \{1, \dots, S\}$	S
مجموعه محصولات پنل خورشیدی $p \in \{1, \dots, P\}$	P

پارامترها

هزینه انتخاب تامین‌کننده s .	Fs_s
هزینه احداث مرکز تولید در مکان j .	Fj_j
نرخ خرابی تامین‌کننده s .	λs_s
نرخ خرابی مرکز تولید j .	λj_j
هزینه جریمه عدم برآورد تقاضای مشتری i از محصول p .	π_{ip}
تقاضای مشتری i از محصول p در دوره زمانی t .	Dem_{ipt}
ظرفیت تامین‌کننده s از محصول p .	$Cap^{s_{sp}}$
ظرفیت مرکز تولید j از محصول p .	$Cap^{j_{ip}}$
ظرفیت مرکز فروش l از محصول p .	$Cap^{l_{ip}}$
هزینه انتقال محصول p به ازای هر کیلومتر.	ω_p
فاصله بین مرکز تولید j و مشتری i .	D'_{ji}
فاصله بین مرکز تولید j و مرکز فروش l .	D'_{jl}
فاصله بین مرکز فروش l و مشتری i .	D'_{li}
فاصله بین تامین‌کننده s و مرکز تولید j .	D^s_{sj}
میزان انتشار گاز گلخانه‌ای به ازای حمل‌ونقل محصول p به ازای هر کیلومتر.	φ_p
کشش قیمت و جایگزینی محصول در کانال مستقیم برای مشتری i .	λ_{ip}
کشش قیمت و جایگزینی محصول در کانال غیرمستقیم برای مشتری i .	λ'_{ip}
کشش قیمت بر اساس تقاضای مشتری i در کانال مستقیم.	γ_1
کشش قیمت بر اساس تقاضای مشتری i در کانال غیرمستقیم.	γ_2
نرخ بهره.	i_r
هزینه جریمه عدم برآورد تقاضا.	η
حداقل درجه اطمینان (نرخ عدم قطعیت).	α
ضریب وزنی تابع هدف.	ξ

متغیرهای تصمیم‌گیری

مقدار محصول p انتقال یافته بین مرکز تولید j و مرکز فروش l در دوره زمانی t .	Q'_{lpt}
مقدار محصول p انتقال یافته بین مرکز تولید j و مشتری i در دوره زمانی t (کانال مستقیم).	Q'_{ipt}
مقدار محصول p انتقال یافته بین مرکز فروش l و مشتری i در دوره زمانی t (کانال غیرمستقیم).	Q'_{lpt}
مقدار محصول p انتقال یافته بین تامین‌کننده s و مرکز تولید j در دوره زمانی t .	Q^s_{sjt}
تقاضای واقعی مشتری i از محصول p در کانال مستقیم در دوره زمانی t .	d_{ipt}
تقاضای واقعی مشتری i از محصول p در کانال غیرمستقیم در دوره زمانی t .	d'_{ipt}
قیمت محصول p در کانال مستقیم در دوره زمانی t .	PD_{pt}
قیمت محصول p در کانال غیرمستقیم در دوره زمانی t .	PI_{pt}
مقدار عدم تامین تقاضای مشتری i از محصول p در کانال مستقیم در دوره زمانی t .	δ_{ipt}
مقدار عدم تامین تقاضای مشتری i از محصول p در کانال غیرمستقیم در دوره زمانی t .	δ'_{ipt}
اگر تامین‌کننده s انتخاب گردد، مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰ می‌گیرد.	Ys_s
اگر مرکز تولید در مکان j احداث شود، مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰ می‌گیرد.	Yj_j





$$\text{Max } W_1 = E[W_1] - \xi(W_{1 \max} - W_{1 \min}) - \eta \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T [Dem_{ipt}^4 - 1 - \alpha) Dem_{ipt}^3 - \alpha Dem_{ipt}^4], \quad (۱)$$

$$\text{Min } W_2 = \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \varphi_p D_{sj}^s Q_{sjpt}^s + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \varphi_p D_{ji}^j Q_{jipt}^j + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \varphi_p D_{jl}^j Q_{jlpt}^j + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \varphi_p D_{li}^l Q_{lipt}^l, \quad (۲)$$

$$\text{Max } W_3 = \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T e^{-\lambda s_s} Q_{sjpt}^s + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T e^{-\lambda j_j} Q_{jlpt}^j + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T e^{-\lambda j_j} Q_{jipt}^j, \quad (۳)$$

s.t.

$$E[W_1] = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{PD_{pt} Q_{jipt}^j}{1 + i_r)^t} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{PI_{pt} Q_{lipt}^l}{1 + i_r)^t} -$$

$$\sum_{s=1}^S F s_s Y s_s - \sum_{j=1}^J F j_j Y j_j - \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\left[\frac{\omega_p^1 + \omega_p^2 + \omega_p^3 + \omega_p^4}{4} \right] D_{sj}^s Q_{sjpt}^s}{1 + i_r)^t} -$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\left[\frac{\omega_p^1 + \omega_p^2 + \omega_p^3 + \omega_p^4}{4} \right] D_{ji}^j Q_{jipt}^j}{1 + i_r)^t} - \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\left[\frac{\omega_p^1 + \omega_p^2 + \omega_p^3 + \omega_p^4}{4} \right] D_{jl}^j Q_{jlpt}^j}{1 + i_r)^t} - \quad (۴)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\left[\frac{\omega_p^1 + \omega_p^2 + \omega_p^3 + \omega_p^4}{4} \right] D_{li}^l Q_{lipt}^l}{1 + i_r)^t} - \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\pi_{ip} (\delta_{ipt} + \delta'_{ipt})}{1 + i_r)^t},$$

$$W_{1 \max} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{PD_{pt} Q_{jipt}^j}{1 + i_r)^t} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{PI_{pt} Q_{lipt}^l}{1 + i_r)^t} -$$

$$\sum_{s=1}^S F s_s Y s_s - \sum_{j=1}^J F j_j Y j_j - \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\omega_p^4 D_{sj}^s Q_{sjpt}^s}{1 + i_r)^t} - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\omega_p^4 D_{ji}^j Q_{jipt}^j}{1 + i_r)^t} - \quad (۵)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\omega_p^4 D_{jl}^j Q_{jlpt}^j}{1 + i_r)^t} - \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\omega_p^4 D_{li}^l Q_{lipt}^l}{1 + i_r)^t} - \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\pi_{ip} (\delta_{ipt} + \delta'_{ipt})}{1 + i_r)^t},$$



$$W_{1 \min} = \sum_{j=1}^I \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{PD_{pt} Q'_{ijpt}}{1+i_r)^t} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{PI_{lpt} Q^l_{lpt}}{1+i_r)^t} - \sum_{s=1}^S F_{s_s} Y_{s_s} - \sum_{j=1}^I F_{j_j} Y_{j_j} - \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\omega_p^1 D_{sj}^s Q_{sjpt}^s}{1+i_r)^t} - \sum_{j=1}^I \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\omega_p^1 D_{ji}^j Q'_{ijpt}}{1+i_r)^t} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\omega_p^1 D_{jl}^j Q^j_{lpt}}{1+i_r)^t} - \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\omega_p^1 D_{li}^l Q^l_{lpt}}{1+i_r)^t} - \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\pi_{ip} (\delta_{ipt} + \delta'_{ipt})}{1+i_r)^t},$$

$$d_{ipt} = [\alpha Dem_{ipt}^4 + 1 - \alpha] Dem_{ipt}^3 - \lambda_{ip} PD_{pt} + \gamma_1 PI_{lpt}, \quad \text{for all } i, p, t, \quad (7)$$

$$d'_{ipt} = [\alpha Dem_{ipt}^4 + 1 - \alpha] Dem_{ipt}^3 - \lambda'_{ip} PI_{lpt} + \gamma_2 PD_{pt}, \quad \text{for all } i, p, t, \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^L Q^l_{lpt} + \delta_{ipt} = d_{ipt}, \quad \text{for all } i, p, t, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^I Q'_{ijpt} + \delta'_{ipt} = d'_{ipt}, \quad \text{for all } i, p, t, \quad (10)$$

$$\sum_{s=1}^S Q_{sjpt}^s = \sum_{l=1}^I Q^l_{lpt} + \sum_{i=1}^I Q'_{ijpt}, \quad \text{for all } j, p, t, \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^I Q^j_{ijpt} = \sum_{i=1}^I Q^l_{lpt}, \quad \text{for all } l, p, t, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I Q^l_{lpt} \leq Cap_{lpt}, \quad \text{for all } l, p, t, \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^I Q_{sjpt}^s \leq Caps_{sp} Y_{s_s}, \quad \text{for all } s, p, t, \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I Q'_{ijpt} + \sum_{l=1}^I Q^l_{lpt} \leq Cap_{jip} Y_{j_j}, \quad \text{for all } j, p, t, \quad (15)$$

$$Q^l_{lpt}, Q^j_{ijpt}, Q'_{ijpt}, Q_{sjpt}^s, d_{ipt}, d'_{ipt}, PD_{pt}, PI_{lpt}, \delta_{ipt}, \delta'_{ipt} \geq 0, \quad (16)$$

$$Y_{j_j}, Y_{s_s} \in \{0,1\}. \quad (17)$$

رابطه (۱) تابع هدف استواری مساله را نشان می‌دهد و آن نیز بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی کل می‌باشد. رابطه (۲) میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید و حمل و نقل را کمینه می‌کند. رابطه (۳) با توجه به نرخ خرابی مراکز تولید و تامین‌کننده‌ها درصد حداکثر سازی قابلیت اطمینان است. رابطه (۴) تا رابطه (۶) به ترتیب میانگین، حداکثر و حداقل ارزش خالص فعلی را با توجه به داده‌های فازی نشان می‌دهد. رابطه (۷) و رابطه (۸) قیمت فروش محصولات را در کانال مستقیم و غیرمستقیم با توجه به کشش قیمت محصولات محاسبه می‌کند. رابطه (۹) و رابطه (۱۰) مقدار محصولات انتقال یافته از مراکز تولید و فروش را به مشتریان با در نظر گرفتن کمبود به صورت فروش ازدست‌رفته نشان می‌دهد. رابطه (۱۱) تعادل جریان محصول را در مراکز تولید و رابطه (۱۲) تعادل جریان محصول را در مراکز فروش نشان می‌دهد. رابطه (۱۳) تا رابطه (۱۵) محدودیت‌های مربوط به ظرفیت مراکز فروش، تامین‌کننده‌ها و مراکز تولید را نشان می‌دهد. رابطه (۱۶) و رابطه (۱۷) نوع متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.

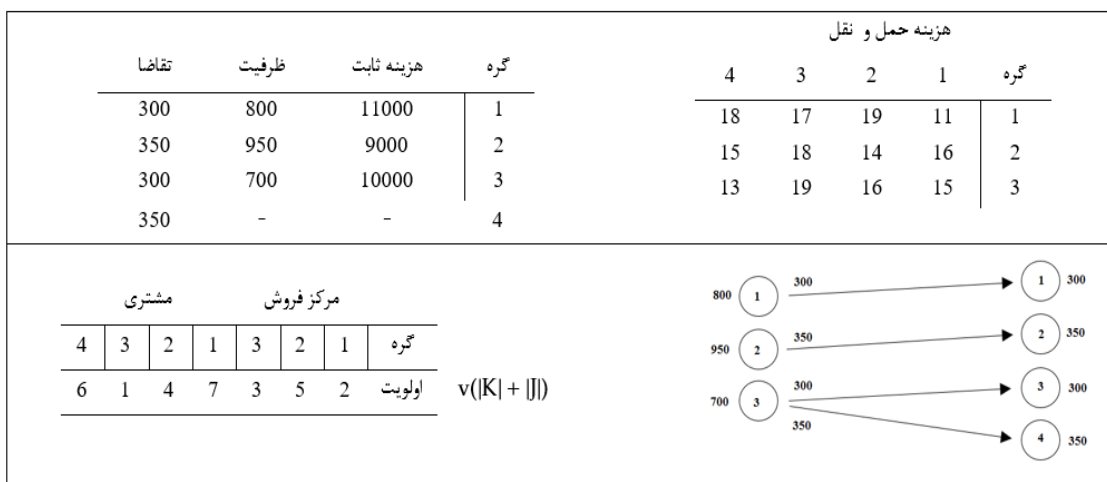
مدل‌های طراحی شبکه زنجیره‌تامین به واسطه اتخاذ تصمیمات هم‌زمان استراتژیکی نظیر مکان‌یابی و تاکتیکی نظیر بهینه‌سازی جریان حمل و نقل جزو مسایل NP-Hard می‌باشد. لذا حداقل در چه سختی مدل طراحی شده در این مقاله به اندازه درجه سختی مسایل مکان‌یابی و یا بهینه‌سازی جریان تقاضا است. از این رو جهت حل مساله در سایزهای بزرگ‌تر از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده شده است. در ادامه به تعریف راه‌حل اولیه مساله پرداخته شده است.



در این مقاله یک شبکه زنجیره‌تامین ۴ سطحی شامل تامین‌کننده‌ها، مراکز تولید، مراکز فروش و مشتریان در نظر گرفته شده است. مثال فرضی در نظر گرفته شده برای طراحی راه‌حل اولیه شامل سه مشتری، چهار مرکز فروش، چهار مرکز تولید و سه تامین‌کننده برای دو محصول و دو دوره زمانی می‌باشد. برای این امر ابتدا قیمت فروش محصول در کانال مستقیم به صورت تصادفی تعیین می‌گردد.

بر اساس قیمت فروش محصول در کانال مستقیم و با توجه به پارامترهای تقاضا و کشش قیمت محصول قیمت محصول در کانال غیر مستقیم نیز به دست می‌آید. بر اساس قیمت‌های به دست آمده در کانال مستقیم و غیر مستقیم، تقاضای هر کدام از مشتریان برای هر نوع کانال تعیین می‌گردد. پس از تعیین تقاضای واقعی، بایستی مقدار بهینه جریان محصول بین سطوح مختلف شبکه زنجیره‌تامین مشخص گردد.

در ادامه به تعریف راه‌حل اولیه برای تعیین مقدار جریان محصول بین دو سطح شبکه زنجیره‌تامین پرداخته شده است. راه‌حل ارائه شده برای تعیین مقدار جریان محصول بین سایر سطوح نیز می‌تواند به کار رود. شکل ۲ راه‌حل اولیه را برای یک زنجیره‌تامین دوسطحی نشان می‌دهد.



شکل ۲- راه‌حل اولیه شبکه زنجیره‌تامین دوسطحی.

Figure 2- The initial solution of the two-level supply chain network.

رمزگشایی شکل ۲ مطابق با گام‌های زیر صورت می‌پذیرد:

۱. بالاترین اولویت از بین راه‌حل اولیه انتخاب می‌گردد.
۲. اگر اولویت انتخاب شده مربوط به مشتری باشد، کمترین هزینه آن مشتری با مراکز فروش مشخص می‌شود.
۳. اگر اولویت انتخاب شده مربوط به مرکز فروش باشد، کمترین هزینه آن مرکز فروش با مشتری مشخص می‌شود.
۴. کمترین مقدار تقاضا (مشتری) و ظرفیت (مرکز فروش) به عنوان مقدار جریان محصول در نظر گرفته می‌شود.
۵. تقاضا (مشتری) و ظرفیت (مرکز فروش) به روزرسانی می‌شود.
۶. اگر تقاضا (مشتری) یا ظرفیت (مرکز فروش) صفر گردد، اولویت آن گره نیز به صفر کاهش می‌یابد.
۷. تا زمانی که همه تقاضاها پاسخ داده نشود، مراحل فوق تکرار می‌گردد.

الگوریتم ۱، الگوریتم رمزگشایی مربوط به شبکه زنجیره‌تامین دوسطحی را برای یک محصول و یک دوره نشان می‌دهد.

Algorithm 1- Two-level supply chain network decoding algorithm.

Inputs:

- K: Set of sources
- J: Set of depots
- dem_j : Demand on depot j
- cap_k : Capacity of source k
- tr_{kj} : Transportation cost of one unit of product from source k to depot j
- $v(|K| + |J|)$: Representation

Output:

- X_{kj} : Quantity of shipment between source k and depot j
- Y_k : Opening of a center at location k

Step 1.

- While $capT \geq \sum_j dem_j$
- Select a node on $l = arg\ max\{v(k)\}$

Step 2.

- $capT \geq \sum_k cap_k$
- If $capT < \sum_j dem_j$ then $v(k-l) = 0$

Step 3.

- While $v(|k| + j) \neq 0$
- Select a node based on $l = arg\ max\{tr_{kj}|v\ t\}. t \in |K| + |J|\}$
- If $l \in k$ a source is selected $k^* = l$
- Then $j^* = arg\ min\{tr_{kj}|v(j) \neq 0\}$ select a depot with minimum cost
- Else $l \in j$ a depot is selected $j^* = l$
- Then $k^* = arg\ min\{tr_{kj}|v(k) \neq 0\}$ select a source with minimum cost

$X_{k^*j^*} = \min(cap_{k^*}, dem_{j^*})$ Update demands and capacities $cap_k = cap_{k^*} - X_{k^*j^*}$ and $dem_j = dem_{j^*} - X_{k^*j^*}$

Step 4.

- If $cap_{k^*} = 0$ then $v(k^*) = 0$
- If $dem_{j^*} = 0$ then $v(j^*) = 0$

پس از طراحی راه‌حل اولیه، رمزگشایی مدل ریاضی در نظر گرفته شده در این تحقیق در الگوریتم ۲ نشان داده شده است.

الگوریتم ۲- الگوریتم رمزگشایی کل شبکه زنجیره‌تامین.

Algorithm 2- Algorithm for decoding the entire supply chain network.

Inputs:

- $Fs_s, Fj_j, \lambda s_s, \lambda j_j, \pi_{ipr}, Dem_{ipt}, Caps_{sp}, Capj_{jp}, Capl_{lp}$
- $\omega_p, D'_{ijr}, D^j_{jlr}, D^l_{lir}, D^s_{sjr}, \varphi_{pr}, \lambda_{ipr}, \lambda'_{ipr}, \gamma_1, \gamma_2, i_r, \eta_r, \alpha$

Step 1: Random price generation in the direct channel

- Determining the selling price of the product in the indirect channel
- Determining the real demand in the direct and indirect channel based on Eq. (7) and Eq. (8)

Step 2: Determining the product flow between the customer and the sales center

- Input: $d_{ipt}, Capl_{lp}, \omega_p, D^l_{lir}, v(|L| + |I|)$
- Process: Decoding based on Algorithm 1
- Output: Q^l_{lpt}

Step 3: Determining the product flow between the customer and the production center

- Input: $d'_{ipt}, Capj_{jp}, \omega_p, D^j_{jlr}, v(|J| + |I|)$
- Process: Decoding based on Algorithm 1
- Output: Q^j_{jpt}, Y^j_j

Step 4: Determining the product flow between the production and the sales center

- Input: $Q^l_{lpt}, Capj_{jp}, \omega_p, D^j_{jlr}, v(|J| + |L|)$
- Process: Decoding based on Algorithm 1
- Output: Q^j_{jpt}, Y^j_j

Step 5: Determining the product flow between the supplier and the production center

- Input: $Q^l_{lpt}, Q^j_{jpt}, Caps_{sp}, \omega_p, D^s_{sjr}, v(|S| + |J|) -$
- Process: Decoding based on Algorithm 1
- Output: Q^s_{sjpt}, Y^s_s

Step 6: Determining the Eqs. (4)-(6)

Step 7: Determining the objective functions

پس از طراحی راه‌حل اولیه، جهت حل مساله از دو الگوریتم *MOWOA* و *MOALO* استفاده شده است. راه‌حل‌های اولیه به‌کاررفته در هر دو الگوریتم با یکدیگر یکسان است.





پس از طراحی راه‌حل اولیه، در این بخش به تجزیه و تحلیل مثال‌های عددی مختلف برای مدل طراحی شده پرداخته شده است. با توجه به عدم دسترسی به داده‌های دنیای واقعی، از داده‌های تصادفی برحسب تابع توزیع یکنواخت مطابق با جدول ۱ استفاده شده است. هم‌چنین در این مقاله ۱۵ مثال عددی به صورت تصادفی جهت تحلیل طراحی شده است که در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- حدود بازه‌ای پارامترهای مساله.

Table 1- Interval limits of problem parameters.

پارامتر	حدود بازه‌ای	پارامتر	حدود بازه‌ای
F_{S_s}, F_{J_j}	$\sim U(100000, 120000)$	$D_{ji}^l, D_{ji}^j, D_{lr}^i, D_{sj}^s$	$\sim U(0.5, 1)$
$\lambda_{S_s}, \lambda_{J_j}$	$\sim U(0.2, 0.4)$	ϕ_p	$\sim U(3, 4)$
π_{ip}	$\sim U(800, 1200)$	λ_{ip}	$\sim U(2, 3)$
$Caps_{sp}$	$\sim U(1000, 1200)$	γ_1	$\sim U(1, 2)$
Cap_{jip}	$\sim U(1800, 2800)$	γ_2	$\sim U(2, 3)$
Cap_{lip}	$\sim U(1200, 1500)$	i_r	0.18
α	0.5	ξ	1
η	2		
ω_p	$\sim U(2, 3), [3, 4], [4, 5], [5, 6]$		
dem_{ipt}	$\sim U(600, 700), [700, 800], [800, 900], [900, 1000]$		

جدول ۲- مسایل نمونه در سایزهای مختلف.

Table 2- Sample problems in different sizes.

مساله نمونه	T	P	S	J	L	I
1	2	2	3	3	3	4
2	2	2	3	5	5	6
3	2	2	5	7	7	8
4	3	2	5	9	9	10
5	3	3	6	12	12	15
6	3	3	6	15	15	20
7	3	3	8	18	18	25
8	4	3	8	20	20	30
9	4	4	10	23	23	38
10	4	4	10	25	25	45
11	4	4	15	28	28	58
12	6	5	15	30	30	67
13	6	5	15	32	32	79
14	6	5	20	34	34	85
15	6	5	20	36	36	90

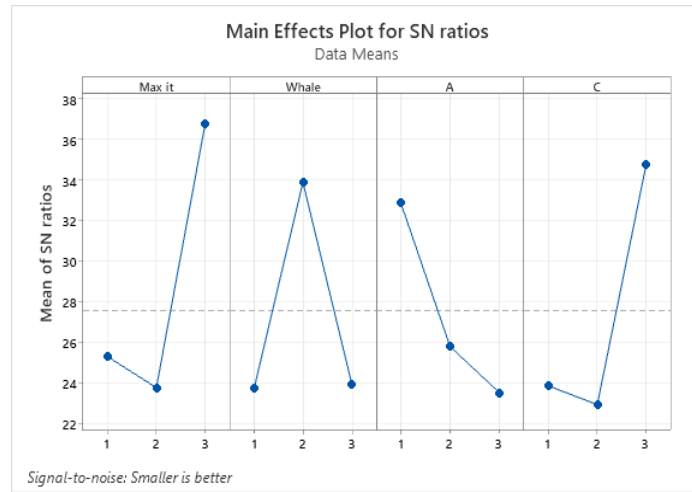
قبل از تجزیه و تحلیل مثال‌های عددی، ابتدا جهت افزایش کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری در جستجوی فضای جستجو، به تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها با روش تاگوچی پرداخته شده است. در این روش برای هر پارامتر الگوریتم، سه سطح پیشنهاد و برای هر سطح یک عدد متناظر با آن در نظر گرفته شده است. جهت تعیین بهترین ترکیب سطوح، مجموعه‌ای از آزمایشات تاگوچی صورت می‌پذیرد. به دلیل چندهدفه بودن مدل ریاضی، نتایج هر آزمایش از طریق رابطه زیر محاسبه شده است:

$$RPD_i = \frac{s_i - s^*}{s^*} \quad | \quad s_i = \frac{NPF_i + MSI_i + SM_i + CT_i}{4} \quad \& \quad s^* = \min_i s_i. \quad (18)$$

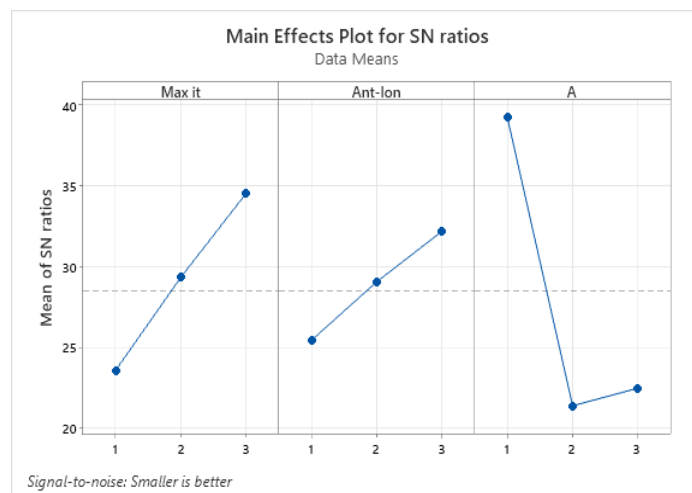
در رابطه فوق، NPF برابر با تعداد جواب‌های کارای به دست آمده، MSI بیشترین گسترگی جواب‌های کارا، SM فاصله متریک جواب‌های کارا و CT زمان حل مساله در هر آزمایش است. شکل ۳ و شکل ۴ به ترتیب نمودارهای متوسط نسبت S/N را برای هر یک از الگوریتم‌های $MOALO$ و $MOWOA$ نشان می‌دهد.



۱۰۴۳



شکل ۳- نمودار متوسط نسبت S/N در MOWOA.
Figure 3- Average graph of S/N ratio in MOWOA.



شکل ۴- نمودار متوسط نسبت S/N در MOALO.
Figure 4- Average plot of S/N ratio in MOALO.

پس از تحلیل آزمایشات تاگوچی، مقدار بهینه پارامترهای هر الگوریتم به شرح جدول ۳ به دست آمده است.

جدول ۳- سطوح و مقادیر بهینه پارامتر هر الگوریتم.

Table 3- Levels and optimal parameter values of each algorithm.

MOALO			MOWOA		
مقدار بهینه	سطح بهینه	پارامتر	مقدار بهینه	سطح بهینه	پارامتر
200	3	Max it	200	3	Max it
200	3	Ani - lion	150	2	whale
2	1	A	2	1	A
-	-	-	6	3	c

برای حل مساله علاوه بر دو الگوریتم MOWOA و MOALO، از روش اپسیلون محدودیت نیز برای حل مساله بهره گرفته شده است. از این رو مجموعه شاخص‌های به دست آمده از حل مثال‌های عددی در جدول ۴ نشان داده شده است.

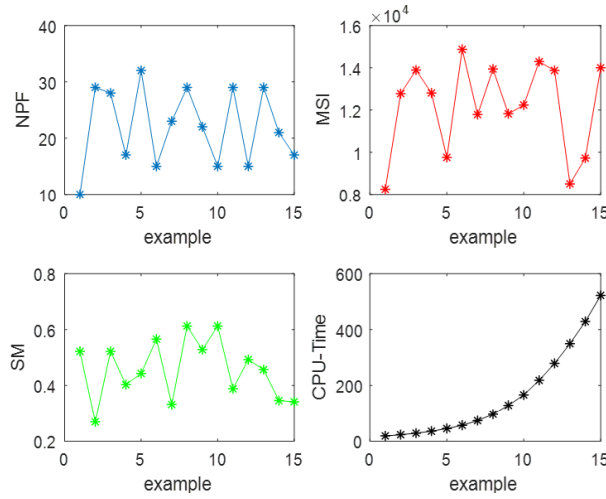


جدول ۴- مجموعه نتایج به دست آمده از حل مثال های عددی مختلف.

Table 4- The set of results obtained from solving different numerical examples.

مثال عددی	MOALO					MOWOA						
	CPU - TIME	SM	MSI	NPF	CPU - TIME	SM	MSI	NPF	CPU - TIME	SM	MSI	NPF
1	121.14	116304.4	379393.2	63	143.61	125816.1	365875.5	48	335.93	106876.7	384840.3	14
2	195.74	198580.7	417644.1	40	217.83	137010.2	497685.5	58	499.34	163540.3	216765.7	22
3	266.84	192140	366960.2	46	299.36	103427.6	335007.7	44	775.18	174721	383933.6	24
4	348.96	138922	219264.9	45	392.17	154476.4	236197.1	61	1260.84	161885.7	284232.4	18
5	450.34	186019.2	419203.8	74	509.52	188744.6	206446.7	60				
6	562.84	117878.5	250651	53	643.07	187819.2	202869.2	80				
7	674.21	164724.7	321807.5	42	768.19	103650.3	430782.5	40				
8	804.67	121382.9	461310.3	58	923.63	188762.7	457554.4	71				
9	956.48	209762.8	479765.8	44	1108.88	208497.8	372290.1	62				
10	1125.47	109708.5	307461.2	79	1330.42	193041.2	448416.2	72				
11	1329.86	153406.1	230834.6	47	1581.77	189409.3	440655.3	76				
12	1552.68	191264.7	303280.2	80	1878.48	208100.2	313514.9	70				
13	1847.68	120695.3	266364	73	2201.75	115726	318769.2	50				
14	2147.37	166928.1	345072.4	64	2604.12	131085.2	409784.7	67				
15	2566.48	104740.3	312154	53	3103.62	166762.6	436570	62				
میانگین	996.71	152829.34	338744.48	57.4	1180.42	160155.35	364827.94	61.40				

بر اساس میانگین نتایج به دست آمده مشاهده می گردد که روش اپسیلون محدودیت تنها تا قادر به حل مثال عددی شماره ۱ تا ۴ شده است. هم چنین مشاهده می گردد که زمان حل چهارمین مساله نمونه برابر با ۸۴/۱۲۶۰ می باشد. از سوی دیگر الگوریتم *MOWOA* بالاترین تعداد جواب کارا، بیشترین شاخص گسترش را به دست آورده است. الگوریتم *MOALO* نیز کمترین شاخص فاصله متریک و زمان حل را کسب کرده است. نتایج بررسی نشان می دهد که هر الگوریتم در دستیابی به شاخص بخصوصی کارا بوده است. از این رو به دلیل عدم تصمیم گیری درست در خصوص انتخاب الگوریتم کارا، ابتدا بایستی بررسی اختلاف معناداری آن ها در مقایسه میانگین نتایج به دست آمده، انجام پذیرد. شکل ۵ میانگین هر یک از شاخص های به دست آمده از حل مثال های عددی در اندازه های مختلف توسط الگوریتم های فرا ابتکاری را نشان می دهد.



شکل ۵- میانگین شاخص‌های مقایسه در مثال‌های عددی مختلف.
Figure 5- Average comparison indices in different numerical examples.

بر اساس شکل ۵ می‌توان بیان کرد که با افزایش اندازه مساله، زمان محاسباتی به صورت نمایی افزایش یافته است. لذا می‌توان NP - $Hard$ بودن مدل را نیز از این طریق اثبات نمود. جدول ۵ نتایج آزمون آماری T -test را در سطح اطمینان ۹۵٪ بر روی میانگین‌های تعداد جواب کارا، بیشترین گسترش، فاصله متریک و زمان محاسباتی در بین الگوریتم‌های فرا ابتکاری نشان می‌دهد. در صورتی که مقدار P -Value کمتر از ۰/۰۵ باشد، نشان از عدم وجود اختلاف معنادار بین میانگین‌های آن شاخص در بین الگوریتم‌های حل است.

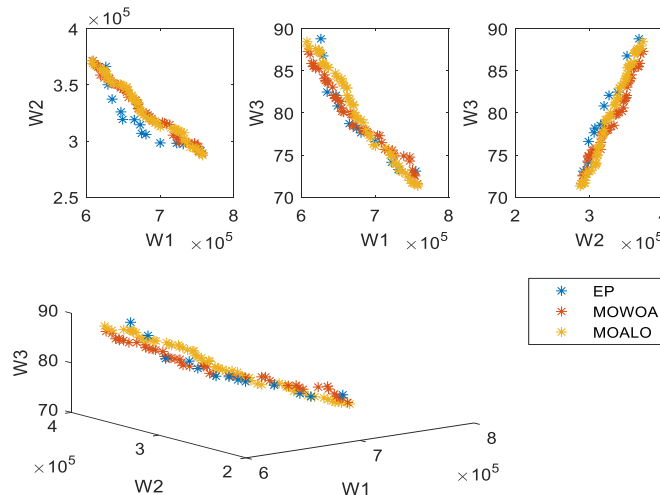
جدول ۵- نتایج آزمون آماری T -test در سطح اطمینان ۹۵٪.

Table 5- The results of the T-test at the 95% confidence level.

شاخص	اختلاف میانگین	بازه اطمینان ۹۵٪	T-Value	P-Value
NPF	0.73	(-7.11, 8.57)	0.20	0.844
MSI	2335	(-56850, 61521)	0.08	0.934
SM	669	(29580, 30918)	0.05	0.963
CPU-time	63.65	(43, 84.31)	6.61	0.000

نتایج جدول ۵ گویای آن است که تنها در بین شاخص‌های زمان محاسباتی اختلاف معنادار وجود دارد. از این رو به دلیل کوتاه بودن زمان حل الگوریتم $MOALO$ ، این الگوریتم به عنوان الگوریتم کارا انتخاب می‌شود.

بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده گردید که کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری در حل مدل ریاضی ارایه شده بسیار بالا بوده است. به طوری که این روش‌ها، توانایی دستیابی به جواب کارای بیشتر در مدت زمان کوتاه‌تر را داشته‌اند. شکل ۶ به بررسی مقایسه جواب‌های کارا در اولین مساله نمونه با روش‌های حل مختلف می‌پردازد. مطابق با این شکل مشاهده می‌گردد که جواب‌های کارای به دست آمده بین روش اپسیلون محدودیت و الگوریتم‌های تعریف شده بسیار نزدیک به همدیگر می‌باشد.



شکل ۶- جبهه پارتو به دست آمده از حل مساله نمونه با روش‌های مختلف.
Figure 6- Pareto front obtained from solving the sample problem with different methods.



مطابق با شکل ۶، مشاهده گردید که اختلاف بین جواب‌های کارای به‌دست‌آمده از حل مساله نمونه بین روش‌های حل مختلف بسیار کم بوده است. در حالی که الگوریتم‌های فرا ابتکاری در مدت زمان کوتاه‌تر از روش اپسیلون محدودیت توانسته‌اند مساله را حل نمایند. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد با افزایش قابلیت اطمینان در شبکه، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش یافته و قابلیت اطمینان در شبکه کاهش یافته است.

در ادامه به بررسی تغییرات مقادیر توابع هدف مساله بر روی اولین جواب کارای به‌دست‌آمده از روش اپسیلون محدودیت، بر روی پارامترهای مختلف مساله پرداخته شده است. در جدول ۶ مقادیر توابع هدف مساله در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت شبکه زنجیره‌تأمین صنعت برق نشان داده شده است.

جدول ۶- مقادیر توابع هدف مساله در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت.

Table 6- The values of the objective functions of the problem at different rates of uncertainty.

W_3	W_2	W_1	α
93.66	253977.40	786754.67	0.1
92.94	255745.39	778645.37	0.2
91.57	268762.14	773478.24	0.3
90.14	274877.16	761477.64	0.4
88.28	287073.26	758724.43	0.5
87.67	297176.64	742687.64	0.6
86.47	300876.84	735471.33	0.7
85.20	306847.49	726748.17	0.8
83.97	310768.47	718475.68	0.9

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که با افزایش نرخ عدم قطعیت در شبکه زنجیره‌تأمین، مقدار تقاضا در شبکه افزایش یافته است. از سوی دیگر هزینه‌های مرتبط با تأمین، تولید و توزیع پل‌های خورشیدی نیز در شبکه افزایش می‌یابد. افزایش تقاضا و هم‌چنین هزینه‌های شبکه منجر به کاهش سود شبکه زنجیره‌تأمین شده است. از سوی دیگر با افزایش نرخ عدم قطعیت و افزایش حجم انتقال پل‌های خورشیدی در شبکه زنجیره‌تأمین، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش یافته است. این در حالی است که با افزایش نرخ عدم قطعیت در شبکه، قابلیت اطمینان کاهش یافته است.

از سوی دیگر استواری مدل مرتبط با ضرایب جریمه و هم‌چنین ضرایب وزنی تابع هدف می‌باشد که در جدول ۷ به تحلیل حساسیت آن‌ها پرداخته شده است. در این جدول با تغییر در ضرایب وزنی و ضرایب جریمه عدم برآورد تقاضا، تغییرات مقادیر توابع هدف مساله نشان داده شده است.

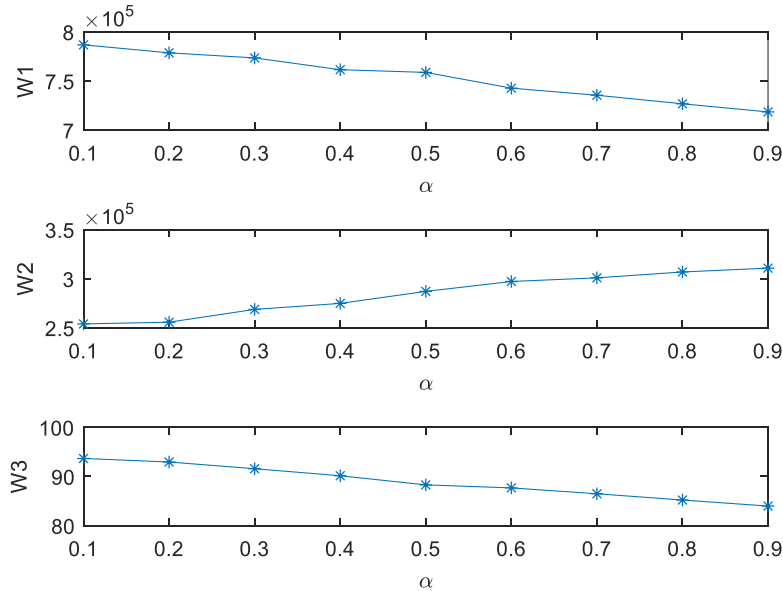
جدول ۷- مقادیر توابع هدف مساله در ضرایب مختلف استواری مدل.

Table 7- The values of the objective functions of the problem in different stability coefficients of the model.

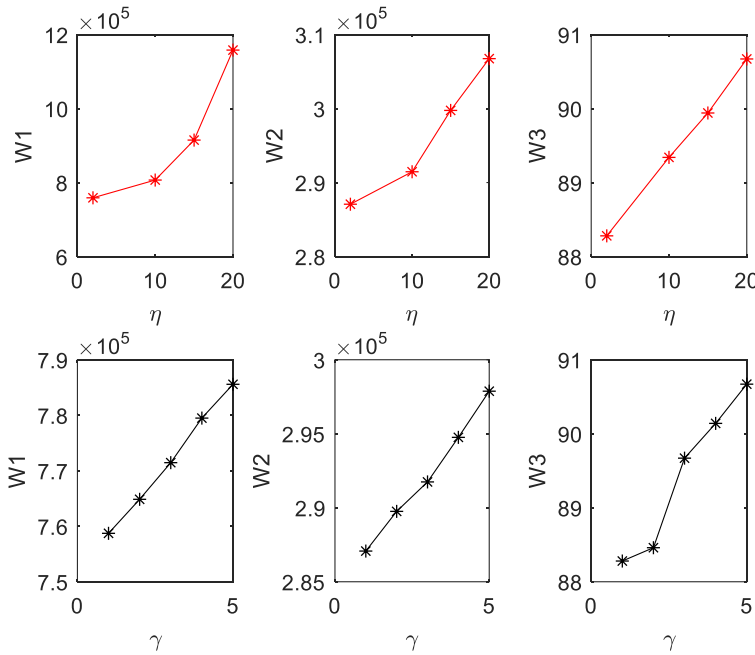
W_3	W_2	W_1	ξ	η
88.28	287073.26	758724.43	1	2
89.34	291457.68	806748.68	1	10
89.94	299745.66	914756.59	1	15
90.67	306741.24	1157946.67	1	20
88.28	287073.26	758724.43	1	2
88.46	289754.10	764852.14	2	2
89.67	291744.67	771456.34	3	2
90.14	294754.66	779482.67	4	2
90.67	297874.56	785574.67	5	2

با توجه به نتایج جدول ۷ می‌توان بیان کرد که با افزایش ضرایب جریمه و هم‌چنین ضرایب وزنی تابع هدف، به دلیل افزایش فضای جستجو، مقدار بیشتری از تقاضا تأمین و در نتیجه هزینه‌های شبکه کاهش یافته است. در این حالت مقدار ارزش خالص فعلی شبکه افزایش یافته است. هم‌چنین با افزایش حجم انتقال محصولات، مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای و قابلیت اطمینان نیز افزایش یافته است.

شکل ۷ و شکل ۸ تغییرات مقادیر توابع هدف مساله را در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت و هم‌چنین ضرایب وزنی و جریمه تابع هدف نشان می‌دهد.



شکل ۷- تغییرات مقادیر توابع هدف مساله در نرخ های مختلف عدم قطعیت.
 Figure 7- Changes in the values of the objective functions of the problem at different rates of uncertainty.



شکل ۸- تغییرات مقادیر توابع هدف مساله در ضرایب مختلف پایداری شبکه.
 Figure 8- Changes in the values of the objective functions of the problem in different network stability coefficients.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مدل‌سازی و حل یک مساله شبکه زنجیره‌تامین در صنعت برق برای تامین تقاضای پل‌های خورشیدی پرداخته شد. مدل طراحی شده شامل مجموعه‌ای از تامین‌کننده‌ها، مراکز تولید، مراکز فروش و مشتریان نهایی بودند. در این شبکه قیمت‌گذاری بر روی پل‌های خورشیدی وابسته به تقاضا و کسب قیمت محصول و قیمت رقبا بود. برای این منظور تابع هدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر تاثیرگذاری پل‌های خورشیدی در پایداری شبکه منجر به آن شد تا توابع هدف کمینه‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش قابلیت اطمینان در شبکه در نظر گرفته شود. با توجه به غیرقطعی بودن تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل پل‌های خورشیدی، از روش بهینه‌سازی استوار امکانی برای کنترل پارامترها استفاده گردید. نتایج حل مدل با استفاده از سه روش اپسیلون محدودیت، الگوریتم *MOWAO* و *MOALO* نشان داد که با افزایش قابلیت اطمینان در شبکه زنجیره‌تامین، میزان سود



کاهش و هزینه‌ها افزایش یافته و در نتیجه ارزش خالص فعلی کاهش یافته است. هم‌چنین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در شبکه نیز با افزایش قابلیت اطمینان، افزایش یافته است.

حل مثال‌های عددی مختلف نشان داد که با افزایش اندازه مساله، زمان حل به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. این امر نیز نشان دهنده NP - $Hard$ بودن مساله می‌باشد. هم‌چنین روش اپسیلون محدودیت تنها قادر به حل ۴ مثال عددی شده است. الگوریتم‌های فرا ابتکاری در زمان بسیار کوتاه‌تر از روش اپسیلون محدودیت قادر به حل مثال‌های عددی شده‌اند. هم‌چنین مقایسه بین الگوریتم‌های فرا ابتکاری نیز نشان داد که اختلاف معنادار، تنها بین زمان حل مساله وجود دارد و در نتیجه الگوریتم $MOALO$ به‌عنوان الگوریتم کارا شناخته شد. با بررسی تاثیرگذاری نرخ عدم قطعیت نیز بر روی شبکه مشاهده شد، با افزایش نرخ عدم قطعیت، ارزش خالص فعلی کاهش، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش و قابلیت اطمینان کاهش یافته است. درحالی‌که با افزایش ضرایب استواری مدل، ارزش خالص فعلی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و درنهایت قابلیت اطمینان افزایش یافته است.

نتایج تحقیق به مدیران صنایع برق کم می‌کند تا با در نظر داشتن نرخ عدم قطعیت، مقدار ارزش خالص فعلی کل طراحی شبکه را به دست آوردن و از بالا بودن قابلیت اطمینان شبکه مطمئن گردند. در این صورت می‌توانند با قیمت‌گذاری مناسب در شبکه زنجیره‌تامین، مقدار سود به‌دست‌آمده را افزایش دهند. هم‌چنین استفاده از روش استوار امکانی نیز به مدیران کمک می‌کند تا از حداقل و حداکثر سود و هزینه شبکه زنجیره‌تامین خود مطلع گردند. با انجام این مقاله می‌توان پیشنهاد داد که مسیریابی وسیله نقلیه به جهت توزیع پنل‌های خورشیدی در نظر گرفته شود و هم‌چنین روش‌های حل دقیق برای دستیابی به جبهه پارتو توسعه یابد.

منابع

- [1] Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*, 54, 11–32.
- [2] Rezapour, S., Farahani, R. Z., & Pourakbar, M. (2017). Resilient supply chain network design under competition: A case study. *European journal of operational research*, 259(3), 1017–1035. DOI:10.1016/j.ejor.2016.11.041
- [3] Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy sets and systems*, 206, 1–20.
- [4] Ghomi-Avili, M., Akhavan Niaki, S. T., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2023). A joint pricing and sustainable closed-loop supply chain network design problem using blockchain technology. *Journal of industrial and systems engineering*, 14(4), 121–137.
- [5] Tsao, Y. C., & Vu, T. L. (2019). Power supply chain network design problem for smart grid considering differential pricing and buy-back policies. *Energy economics*, 81, 493–502. DOI:10.1016/j.eneco.2019.04.022
- [6] Dehghani, E., Jabalameli, M. S., Naderi, M. J., & Safari, A. (2020). An environmentally conscious photovoltaic supply chain network design under correlated uncertainty: A case study in Iran. *Journal of cleaner production*, 262, 121434. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121434
- [7] Attari, M. Y. N., Ala, A., & Khalilpourshiraz, Z. (2022). The electric power supply chain network design and emission reduction policy: a comprehensive review. *Environmental science and pollution research*, 29(37), 55541–55567. DOI:10.1007/s11356-022-21373-w
- [8] Shahbazbegian, V., Hosseini-Motlagh, S. M., & Haeri, A. (2020). Integrated forward/reverse logistics thin-film photovoltaic power plant supply chain network design with uncertain data. *Applied energy*, 277, 115538. DOI:10.1016/j.apenergy.2020.115538
- [9] Dehghani, E., Jabalameli, M. S., Jabbarzadeh, A., & Pishvae, M. S. (2018). Resilient solar photovoltaic supply chain network design under business-as-usual and hazard uncertainties. *Computers and chemical engineering*, 111, 288–310. DOI:10.1016/j.compchemeng.2018.01.013
- [10] Alamerew, Y. A., & Brissaud, D. (2020). Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries. *Journal of cleaner production*, 254, 120025. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120025
- [11] Rabbani, M., Hosseini-Mokhallesun, S. A. A., Ordibazar, A. H., & Farrokhi-Asl, H. (2020). A hybrid robust possibilistic approach for a sustainable supply chain location-allocation network design. *International journal of systems science: operations and logistics*, 7(1), 60–75. DOI:10.1080/23302674.2018.1506061
- [12] Abad, A. R. K. K., & Pasandideh, S. H. R. (2022). Green closed-loop supply chain network design with stochastic demand: A novel accelerated benders decomposition method. *Scientia Iranica*, 29(5E), 2578–2592. DOI:10.24200/sci.2020.53412.3249
- [13] Pahlevan, S. M., Hosseini, S. M. S., & Goli, A. (2021). Sustainable supply chain network design using products' life cycle in the aluminum industry. *Environmental science and pollution research*, 1–25. DOI:10.1007/s11356-020-12150-8
- [14] Pourmehdi, M., Paydar, M. M., & Asadi-Gangraj, E. (2020). Scenario-based design of a steel sustainable closed-loop supply chain network considering production technology. *Journal of cleaner production*, 277, 123298. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.123298



- [15] Mohtashami, Z., Aghsami, A., & Jolai, F. (2020). A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption. *Journal of cleaner production*, 242, 118452. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118452
- [16] Lotfi, R., Kargar, B., Hoseini, S. H., Nazari, S., Safavi, S., & Weber, G. W. (2021). Resilience and sustainable supply chain network design by considering renewable energy. *International journal of energy research*, 45(12), 17749–17766. DOI:10.1002/er.6943
- [17] Nili, M., Seyedhosseini, S. M., Jabalameli, M. S., & Dehghani, E. (2021). A multi-objective optimization model to sustainable closed-loop solar photovoltaic supply chain network design: A case study in Iran. *Renewable and sustainable energy reviews*, 150, 111428.
- [18] Vafadarnikjoo, A., Tavana, M., Chalvatzis, K., & Botelho, T. (2022). A socio-economic and environmental vulnerability assessment model with causal relationships in electric power supply chains. *Socio-economic planning sciences*, 80, 101156. DOI:10.1016/j.seps.2021.101156
- [19] Rentizelas, A., Trivyza, N., Oswald, S., & Siegl, S. (2022). Reverse supply network design for circular economy pathways of wind turbine blades in Europe. *International journal of production research*, 60(6), 1795–1814. DOI:10.1080/00207543.2020.1870016
- [20] Boskabadi, A., Mirmozaffari, M., Yazdani, R., & Farahani, A. (2022). Design of a distribution network in a multi-product, multi-period green supply chain system under demand uncertainty. *Sustainable operations and computers*, 3, 226–237. DOI:10.1016/j.susoc.2022.01.005
- [21] Tirkolae, E. B., Goli, A., Ghasemi, P., & Goodarzi, F. (2022). Designing a sustainable closed-loop supply chain network of face masks during the COVID-19 pandemic: Pareto-based algorithms. *Journal of cleaner production*, 333, 130056. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.130056
- [22] Salehi-Amiri, A., Zahedi, A., Gholian-Jouybari, F., Calvo, E. Z. R., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2022). Designing a closed-loop supply chain network considering social factors; a case study on avocado industry. *Applied mathematical modelling*, 101, 600–631. DOI:10.1016/j.apm.2021.08.035
- [23] Rajak, S., Vimal, K. E. K., Arumugam, S., Parthiban, J., Sivaraman, S. K., Kandasamy, J., & Duque, A. A. (2022). Multi-objective mixed-integer linear optimization model for sustainable closed-loop supply chain network: a case study on remanufacturing steering column. *Environment, development and sustainability*, 24(5), 6481–6507. DOI:10.1007/s10668-021-01713-5
- [24] Hosseini Dehshiri, S. J., Amiri, M., Olfat, L., & Pishvae, M. S. (2022). Multi-objective closed-loop supply chain network design: A novel robust stochastic, possibilistic, and flexible approach. *Expert systems with applications*, 206, 117807. DOI:10.1016/j.eswa.2022.117807
- [25] Mogale, D. G., De, A., Ghadge, A., & Aktas, E. (2022). Multi-objective modelling of sustainable closed-loop supply chain network with price-sensitive demand and consumer's incentives. *Computers and industrial engineering*, 168, 108105. DOI:10.1016/j.cie.2022.108105
- [26] Safaei, S., Ghasemi, P., Goodarzi, F., & Momenitabar, M. (2022). Designing a new multi-echelon multi-period closed-loop supply chain network by forecasting demand using time series model: a genetic algorithm. *Environmental science and pollution research*, 29(53), 79754–79768. DOI:10.1007/s11356-022-19341-5
- [27] Chaharmahali, G., Ghandalipour, D., Jasemi, M., & Molla-Alizadeh-Zavardehi, S. (2022). Modified metaheuristic algorithms to design a closed-loop supply chain network considering quantity discount and fixed-charge transportation. *Expert systems with applications*, 202, 117364. DOI:10.1016/j.eswa.2022.117364
- [28] Akbari-Kasgari, M., Khademi-Zare, H., Fakhrzad, M. B., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Honarvar, M. (2022). Designing a resilient and sustainable closed-loop supply chain network in copper industry. *Clean technologies and environmental policy*, 24(5), 1553–1580. DOI:10.1007/s10098-021-02266-x
- [29] Hamta, N., Ehsanifar, M., & Biglar, A. (2023). Optimization in supply chain design of assembled products: a case study of HEPCO company. *Iranian journal of management studies*, 16(1), 61–77. DOI:10.22059/IJMS.2022.318236.674424
- [30] Pal, B., Sarkar, A., & Sarkar, B. (2023). Optimal decisions in a dual-channel competitive green supply chain management under promotional effort. *Expert systems with applications*, 211, 118315. DOI:10.1016/j.eswa.2022.118315
- [31] Barman, A., De, P. K., Chakraborty, A. K., Lim, C. P., & Das, R. (2023). Optimal pricing policy in a three-layer dual-channel supply chain under government subsidy in green manufacturing. *Mathematics and computers in simulation*, 204, 401–429. DOI:10.1016/j.matcom.2022.08.008