



Optimization of the Paper Recycling Cycle in the Packaging Industry: A Vertically Integrated Model Using Harmony Search Algorithm and Comparison with Genetic Algorithm

Mahdi Alizadeh Bermi,^{1*} Mohammad Ali Afsharkazemi², Mohammad Ali Keramati³, Abbas Toloie ashlaghi⁴

^{1,2,3} Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

⁴ Department of Management and Economics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 10.03.2024
Revised: 11.20.2024
Accepted: 12.30.2024

Keyword:
Vertical integration
Harmony Search Algorithm
Genetic Algorithm
Recycling Optimization Closed-loop supply chain

***Corresponding Author:**
Mahdi Alizadeh Bermi
Email: mahdi2496@yahoo.com

ABSTRACT

Closed-loop supply chain (CLSC) management has become an essential approach for improving economic performance and reducing environmental impacts in modern industries. By integrating forward and reverse logistics activities, CLSC systems enable firms to optimize the flow of raw materials, finished products, returned items, and recyclable waste. In the paper and cardboard industry, where production, recovery, recycling, and remanufacturing are highly interconnected, effective supply chain design can play a critical role in minimizing operational costs and enhancing sustainability.

This study aims to optimize supply chain costs through the vertical integration of paper and cardboard production centers using advanced optimization techniques. A comprehensive closed-loop supply chain model is developed to represent the relationships among production, distribution, collection, recycling, and remanufacturing processes. To solve the proposed model, two metaheuristic algorithms, namely the Genetic Algorithm (GA) and the Harmony Search Algorithm (HSA), are applied and compared. Their performance is evaluated through a real case study in the packaging industry using empirical data.

The findings reveal that the Harmony Search Algorithm performs better than the Genetic Algorithm in minimizing total supply chain costs, particularly in terms of inventory and transportation expenses. The results also show that vertical integration can significantly improve supply chain efficiency while contributing to environmental sustainability. These findings highlight the practical value of combining CLSC design with metaheuristic optimization methods in the packaging industry.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Closed-loop supply chain (CLSC) management plays a pivotal role in reducing environmental impacts and minimizing costs throughout the life cycle of products, from raw material acquisition to production, recycling, and remanufacturing. The packaging industry, particularly the paper sector, stands out as a significant player in addressing sustainability challenges, given the extensive use of paper and cardboard for packaging and the potential for recycling. However, despite the environmental benefits, paper recycling in the packaging sector faces several challenges, such as high operational costs, the degradation of product quality in recycled materials, and inefficiencies within the recycling process itself.

In an increasingly competitive and resource-constrained world, the need for optimizing the recycling process in a cost-effective manner is more critical than ever. The integration of production centers, especially between paper and cardboard manufacturers, provides a promising approach for enhancing efficiency and reducing costs. This research aims to develop a vertically integrated model using two advanced optimization algorithms—Genetic Algorithm (GA) and Harmony Search Algorithm (HSA)—to optimize the recycling process, reduce supply chain costs, and improve overall system performance. The goal is not only to streamline operations but also to explore how these algorithms can be used to handle the complexities of closed-loop supply chains in dynamic environments.

Methodology

The study proposes a model of vertical integration within the CLSC, specifically between paper production and cardboard manufacturing centers. This integration seeks to optimize the cost structure of the supply chain, reduce bottlenecks, and improve the coordination between the various stages of production and recycling. The proposed model addresses several key parameters, including production capacities, transportation costs, inventory holding costs, and penalties for shortages. The integration aims to eliminate redundancies and improve collaboration between production entities, ultimately driving down costs and improving sustainability.

Two metaheuristic algorithms were employed to solve this optimization problem: Genetic Algorithm (GA) and Harmony Search Algorithm (HSA). Both algorithms are renowned for their efficacy in solving multi-objective and complex optimization problems. The GA operates by simulating the process of natural selection, allowing it to efficiently search through large solution spaces to find the optimal configurations for reducing costs. On the other hand, HSA mimics the improvisation process of musicians, exploring various combinations to arrive at the most harmonious solution.

To test the effectiveness of these algorithms, the research utilized a set of real-world data from the paper packaging industry, including cost data related to production, transportation, recycling, and customer demand. A comprehensive set of cost components, including fixed costs for establishing production centers, transportation costs between different supply chain nodes, and costs associated with inventory management and

shortages, was included in the analysis. The model was tested under several scenarios to evaluate the performance of the two algorithms in optimizing the vertically integrated supply chain.

Results and discussion

The results of the study demonstrated the superiority of the vertically integrated model in reducing supply chain costs compared to traditional non-integrated approaches. By integrating the production processes of paper and cardboard, the model achieved significant cost savings, particularly in the areas of transportation and inventory management. The application of HSA proved to be more effective than GA, offering a reduction of 11% in overall supply chain costs, compared to a 10% reduction achieved by GA.

The performance of both algorithms was evaluated based on several criteria, including the total cost savings, the time taken to converge to an optimal solution, and the uniformity and stability of the solutions. HSA outperformed GA in all of these areas, demonstrating faster convergence and more consistent results across different scenarios. The key advantage of HSA lay in its ability to explore the solution space more thoroughly, leading to better overall outcomes in terms of cost reduction and process efficiency.

Moreover, the integration of production centers led to improved coordination across the supply chain, reducing inefficiencies and streamlining the flow of materials from production to recycling. This not only resulted in cost savings but also enhanced the sustainability of the process by reducing the need for raw material extraction and minimizing waste generation. Both algorithms showed significant improvements in reducing inventory holding costs and shortage penalties, thus improving the responsiveness of the supply chain to fluctuations in demand.

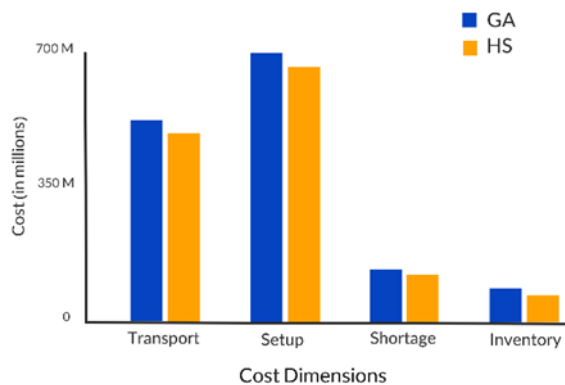


Figure 1. Cost Reduction and Comparison Chart Between Harmony Search Algorithm and Genetic Algorithm

Conclusion

This research investigates the optimization of the paper and cardboard supply chain through the vertical integration of production centers. Vertical integration was employed as a strategic approach to reduce costs, enhance operational efficiency, and improve coordination within the supply chain. Optimization was conducted using two metaheuristic algorithms: the Harmony Search Algorithm (HSA) and the Genetic Algorithm (GA). The findings demonstrate that the Harmony Search Algorithm achieved an 11% reduction in overall supply chain costs, outperforming the Genetic Algorithm and exhibiting superior efficiency in reducing transportation, inventory, and total supply chain expenses. These results underscore the effectiveness of combining optimization algorithms with vertical integration strategies to enhance performance and minimize costs. Comparison with Previous Studies:

Prior research has largely focused on optimizing supply chains using metaheuristic algorithms without considering the effects of vertical integration. The results of this study indicate that integrating advanced optimization algorithms with vertical integration strategies can result in significant cost reductions and improved sustainability within the supply chain. Notably, the Harmony Search Algorithm demonstrated superior performance due to its faster convergence and greater cost reduction capabilities compared to conventional optimization methods. Future Directions and Generalizability:

This study proposes that future research should examine the influence of uncertainty parameters, such as demand fluctuations, changes in operational costs, and varying environmental conditions, to further enhance the performance and applicability of the proposed models. Furthermore, the utilization of other metaheuristic algorithms, such as Particle Swarm Optimization, Ant Colony Optimization, or hybrid approaches, could further refine optimization models and improve the efficiency of supply chain systems. This research trajectory has the potential to generalize the findings to similar industries and diverse applications, thereby enhancing the sustainability and overall performance of closed-loop supply chains.



بهینه سازی چرخه بازیافت کاغذ در صنعت بسته بندی: مدل ادغام شده عمودی با رویکرد الگوریتم جستجوی هارمونی و مقایسه با الگوریتم ژنتیک

مهدی عزیزاده برمی^{*۱}، محمدعلی افشار کاظمی^۲، محمدعلی کرامتی^۳، عباس طلویی اشلقی^۴

۱ و ۲- گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳- گروه مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته به یکی از رویکردهای اساسی برای بهبود عملکرد اقتصادی و کاهش پیامدهای زیست محیطی در صنایع امروزی تبدیل شده است. با یکپارچه سازی فعالیت های لجستیک مستقیم و معکوس، سیستم های زنجیره تأمین حلقه بسته این امکان را برای بنگاه ها فراهم می کنند که جریان مواد اولیه، محصولات نهایی، اقلام برگشتی و ضایعات قابل بازیافت را بهینه سازی کنند. در صنعت کاغذ و مقوا، که در آن فرایندهای تولید، بازیافت، بازگردانی و بازتولید به شدت به یکدیگر وابسته اند، طراحی اثربخش زنجیره تأمین می تواند نقش مهمی در کاهش هزینه های عملیاتی و ارتقای پایداری ایفا کند.

این پژوهش با هدف بهینه سازی هزینه های زنجیره تأمین از طریق یکپارچه سازی عمودی مراکز تولید کاغذ و مقوا و با بهره گیری از تکنیک های پیشرفته بهینه سازی انجام شده است. در این راستا، یک مدل جامع زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه یافته که روابط میان فرایندهای تولید، توزیع، جمع آوری، بازیافت و بازتولید را نمایش می دهد. برای حل مدل پیشنهادی، دو الگوریتم فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) به کار گرفته و با یکدیگر مقایسه شدند. عملکرد این الگوریتم ها از طریق یک مطالعه موردی واقعی در صنعت بسته بندی و با استفاده از داده های تجربی ارزیابی شد.

یافته ها نشان می دهد که الگوریتم جستجوی هارمونی در کمینه سازی هزینه کل زنجیره تأمین، به ویژه در هزینه های موجودی و حمل و نقل، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. همچنین نتایج بیانگر آن است که یکپارچه سازی عمودی می تواند ضمن بهبود قابل توجه کارایی زنجیره تأمین، به پایداری زیست محیطی نیز کمک کند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

کلید واژگان:

ادغام عمودی

الگوریتم جستجوی هارمونی

الگوریتم ژنتیک

بازیافت

بهینه سازی زنجیره تأمین حلقه بسته

*نویسنده مسئول: مهدی

عیززاده برمی

پست الکترونیکی:

mahdi2496@yahoo.com



مقدمه

بازیافت کاغذ در صنعت بسته‌بندی نقش مهمی در کاهش مصرف مواد اولیه، انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد، اما با چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالا و کیفیت پایین‌تر محصولات بازیافتی روبرو است. بهینه‌سازی چرخه بازیافت می‌تواند این مشکلات را کاهش داده و اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی مثبتی به همراه داشته باشد. این مقاله به بررسی استراتژی‌های بهینه‌سازی در تولید و کاهش ضایعات مرتبط با این فرآیند می‌پردازد [۱]. مدیریت زنجیره تأمین در بازارهای ناپایدار نیازمند پذیرش عدم قطعیت و نوسانات است. مدیران باید با استفاده از فناوری‌های نوین، بهینه‌سازی فرآیندها و مدل‌های پیش‌بینی، انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین را افزایش دهند و عملکرد آن را بهبود بخشند [۲]. بهینه‌سازی بازیافت کاغذ در صنعت بسته‌بندی با کاهش هزینه‌های انرژی و مواد اولیه و کاهش اثرات زیست‌محیطی به افزایش بازده تولید و کاهش ضایعات کمک می‌کند [۳]. الگوریتم‌های فراابتکاری که از پدیده‌های زیستی الهام گرفته‌اند، ابزارهای مؤثری برای حل مسائل پیچیده و چندمعیاره در صنایع مختلف هستند. این الگوریتم‌ها می‌توانند به بهبود فرآیندهای بازیافت و بهینه‌سازی زنجیره تأمین کمک کنند [۴]. مدیریت کارآمد زنجیره تأمین با بهینه‌سازی فرآیندها از تأمین مواد اولیه تا تحویل کالا، می‌تواند هزینه‌ها را کاهش و بهره‌وری را افزایش دهد. ادغام رو به عقب، با کسب کنترل بیشتر بر مراحل اولیه زنجیره، یکی از استراتژی‌های مؤثر در بهبود عملکرد و رقابت‌پذیری شرکت‌هاست. ادغام رو به عقب به شرکت‌ها امکان کاهش وابستگی به تأمین‌کنندگان و بهبود کنترل بر کیفیت و هزینه‌ها را می‌دهد، اما با چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالای اولیه، پیچیدگی مدیریتی و افزایش ریسک‌های عملیاتی همراه است. مدیریت نادرست این استراتژی ممکن است به کمبود مواد اولیه یا افزایش هزینه‌های زنجیره تأمین منجر شود. مقالات و تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی فرآیندها و بهبود زنجیره تأمین به عنوان یکی از مباحث حیاتی در صنایع تولیدی و تبدیلی، همواره توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند.

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، محدودیت منابع طبیعی و فشارهای اقتصادی، توجه پژوهشگران و مدیران را به سمت طراحی و مدیریت زنجیره‌های تأمین پایدار جلب کرده است. در این میان، مفهوم زنجیره تأمین حلقه بسته به عنوان رویکردی نوین برای مدیریت جریان مواد، اطلاعات و محصولات در طول چرخه عمر آن‌ها مطرح شده است. این نوع زنجیره تأمین با در نظر گرفتن فرآیندهایی مانند جمع‌آوری، بازیافت، بازتولید و استفاده مجدد از محصولات، تلاش می‌کند علاوه بر کاهش ضایعات و اثرات زیست‌محیطی، بهره‌وری اقتصادی را نیز افزایش دهد. از سوی دیگر، موضوعاتی نظیر یکپارچه‌سازی اجزای زنجیره تأمین، کاهش هزینه‌ها و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسائل پیچیده زنجیره تأمین، از جمله محورهای مهم در مطالعات این حوزه به شمار می‌آیند. در ادامه، مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بنابراین مرور ادبیات این پژوهش شامل موارد ذیل است:

- زنجیره تأمین حلقه بسته و پایداری آن
- ادغام-یکپارچه‌سازی زنجیره تأمین
- کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین
- کاربرد الگوریتم جستجوی هارمونی و الگوریتم ژنتیک در زنجیره تأمین

مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته به عنوان جایگزینی برای مدل‌های اقتصادی سنتی (گرفتن، ساخت و دفع) مطرح شده است. فاروک و همکاران^۱ (۲۰۱۹) معتقدند که این نوع مدیریت با ادغام اصول اقتصاد دایره‌ای، به پایداری زنجیره تأمین کمک می‌کند [۵]. این دیدگاه از سوی هابسون^۲ (۲۰۱۶) نیز تأیید شده و به عنوان نیروی مؤثر در بهبود عملکرد زیست‌محیطی شناخته می‌شود [۶]. با این حال، پرستون^۳ (۲۰۱۲) معتقد است که الگوهای فعلی تولید و مصرف در سطح جهانی هنوز ناپایدار هستند [۷]. گوید و همکاران^۴ (۲۰۰۶) بیان می‌کنند که زنجیره تأمین حلقه بسته با بازگشت مواد و بسته‌بندی‌ها به تولیدکننده برای بازیابی ارزش، به بهبود عملکرد زیست‌محیطی کمک می‌کند [۸]. به عنوان مثال، تافل^۵ (۲۰۰۴) نشان داد که بازسازی زنجیره تأمین دستگاه‌های فتوکپی می‌تواند مصرف مواد، نیروی کار و انرژی را کاهش داده و ضایعات را تا ۵۰ درصد کمتر از تولید معمولی کند [۹]. با این حال، موالا و همکاران^۶ (۲۰۱۷) به محدودیت‌های این رویکرد اشاره کردند و معتقدند که تمرکز عمده بر زنجیره اصلی تولید است و زنجیره‌های تأمین ثانویه کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند [۱۰]. ویتمن^۷ (۲۰۱۶) نیز بیان کرد که حتی با تلاش‌های جدی، زنجیره تأمین حلقه بسته همچنان ضایعات قابل توجهی تولید می‌کند، زیرا امکان بازیافت کامل تمام مواد وجود ندارد [۱۱]. بابازاده (۲۰۱۸) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جامع برای تولید و توزیع در زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه داد که مشتریان را به سه گروه (محصول جدید، بازیابی شده و مواد خام) تقسیم می‌کند [۱۲]. هاتفی و جولایی^۸ (۲۰۱۴) به اهمیت مدل‌سازی عدم قطعیت در زنجیره تأمین اشاره کردند و تأکید نمودند که پیچیدگی و ناپایداری زنجیره، نیازمند ابزارهای مناسب برای مدیریت ریسک است [۱۳]. دویکا و همکاران^۹ (۲۰۱۴) نیز به استفاده از مدل‌های غیرقطعی و برنامه‌ریزی استوار در زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند که این مدل‌ها کمک می‌کنند تا در مواجهه با عدم قطعیت‌ها، عملکرد بهینه حفظ شود [۱۴]. صنعت کاغذ به‌عنوان یک زنجیره تأمین دایره‌ای، با بازگشت مواد مصرفی و پیشنهادهای دوان و همکاران (۲۰۲۲) برای بهبود مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته، شامل ایجاد ذخایر و سازوکارهای بیمه برای کاهش تأثیر نوسانات خارجی است [۱۵]. همچنین شن و همکاران^۱ (۲۰۲۳) مدل بازی استکلیبرگ را برای هماهنگ سازی اجزای زنجیره تأمین حلقه بسته بین تولیدکننده و خرده‌فروش ارائه نمودند [۱۶]. علیزاده و همکاران (۲۰۲۴) با طراحی یک مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح، به بررسی قیمت‌گذاری بهینه و هزینه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته کاغذ و کارتن پرداخته‌اند.

شکل شماره ۱ نمایی از زنجیره تأمین حلقه بسته کارتن و کاغذ است، که در آن هدر رفت زنجیره یعنی α و β بسیار اندک است و عملاً زنجیره تأمین حلقه بسته را به زنجیره تأمین دایره‌ای مبدل کرده است [۱۷].

¹ Farook & et al.

² Hobson

³ Preston

⁴ Goid & et al.

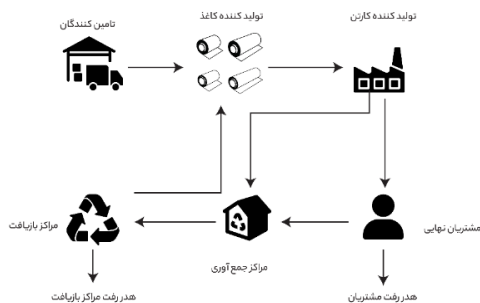
⁵ Tofel

⁶ Moala & et al.

⁷ Whitman

⁸ Dwika & et al.

⁹ Shen & et al.



شکل ۱. نمایی از زنجیره تأمین کاغذ و کارتن

تولیدکنندگان کارتن و کاغذ در زنجیره تأمین کاغذ و کارتن نقش مهمی دارند و ادغام آن‌ها از طریق تقسیم منافع و هزینه‌ها می‌تواند به پایداری سیستم کمک کند. ادغام عمودی شامل ادغام رو به جلو (کنترل مراحل پایین دستی) و ادغام رو به عقب (کنترل مراحل بالادستی) است، که با ادغام افقی که بر حذف رقبا تمرکز دارد، متفاوت است. هاریگان (۱۹۸۵)، و همیلتون و ماسکاس^۱ (۱۹۹۷) به نقش ادغام عمودی بین تولیدکنندگان کاغذ و کارتن پرداخته و نشان داده‌اند که این ادغام از طریق تقسیم هزینه‌ها و منافع می‌تواند باعث افزایش پایداری و کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین شود [۱۸] و [۱۹]. ادغام زنجیره تأمین بر اهمیت همکاری و روابط درون و بین سازمانی برای بهبود مدیریت زنجیره تأمین تأکید دارد. خانوجا و جیان^۲ (۲۰۱۹) به نبود تعریف یکپارچه از ادغام زنجیره تأمین و محرک‌های آن اشاره کرده‌اند که منجر به تفسیرهای مختلف در مطالعات شده است. مرور ۱۵۴ مقاله توسط نویسندگان، دو بعد اصلی ادغام زنجیره تأمین شامل ادغام داخلی و ادغام با مشتریان و تأمین کنندگان را شناسایی می‌کند که از طریق اشتراک اطلاعات، هماهنگی فرآیندها و اتحادهای استراتژیک صورت می‌گیرد. همچنین، بر نقش ادغام در بهبود عملکرد سازمانی تأکید شده و پی‌شهاد می‌شود که تحقیقات بی‌شتری برای کاهش فاصله بین تئوری و کاربرد عملی انجام گیرد [۲۰].

تحقیقات اخیر بهینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین را با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی بررسی کرده‌اند. هاراهاپ و رحیم^۳ (۲۰۲۳) و دو و همکاران^۴ (۲۰۲۲) به استفاده از هوش مصنوعی و تکنیک‌های فراابتکاری برای کاهش هزینه‌ها پرداخته‌اند [۲۱] و [۲۲]. همچنین دامودارام و همکاران^۵ (۲۰۲۲) با بهره‌گیری از این تکنیک‌ها، مدل‌های تک‌هدفه و چندهدفه برای بهینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین ارائه داده‌اند [۲۳]. الگوریتم‌های فراابتکاری همچون الگوریتم ژنتیک^۶ در مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته بسیار رایج هستند و در زمینه‌هایی مانند توزیع محصول، مسیریابی و کاهش هزینه‌ها به کار گرفته می‌شوند [۲۴] و [۲۵]. رجبی کفشگر و همکاران (۲۰۲۳) و چهارمحالی و همکاران (۲۰۲۲) از این الگوریتم‌ها برای حل مسائل زنجیره تأمین استفاده کرده و کارایی آن‌ها را مقایسه کرده‌اند [۶] و [۲۶]. همچنین، عابد و همکاران (۲۰۲۳) از الگوریتم‌های کلنی مورچگان،

¹ Hamilton and Muskas

² Khanuja and Gian

³ Harahap and Rahim

⁴ Dow & et al.

⁵ Damodaram & et al.

⁶ Genetic algorithm(GA)

شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم شتر برای توزیع شبکه زنجیره تأمین استفاده کرده‌اند [۲۷]. فیروزی و همکاران (۲۰۱۳) و ژانگ و همکاران^۱ (۲۰۲۱) نیز الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین و حل مسائل زمان‌بندی پروژه به کار برده‌اند [۲۸] و [۲۹]. علاوه بر این، الگوریتم جستجوی هارمونی نیز در مسائل زنجیره تأمین مانند طراحی شبکه زنجیره تأمین توسط میسنی و همکاران^۲ (۲۰۲۰) استفاده شده است که نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌ها ارائه داده است [۳۰]. در این بین برخی از مطالعات در جهت نزدیک کردن شرایط زنجیره تأمین به شرایط واقعی به وارد کردن پارامترهایی همچون عدم قطعیت به سیستم پرداخته‌اند این عدم قطعیت می‌تواند مرتبط با هر مرکز و یا هر پارامتر تاثیر گذار بر عملکرد زنجیره تأمین حلقه بسته باشد. بر همین اساس زرین پور و امیدوار در سال (۲۰۲۰) مدل ریاضی را همراه با عدم قطعیت در زنجیره تأمین سوخت تبیین نمودند [۳۱]. بنیایی (۲۰۱۱) به بررسی فرآیندهای زنجیره تأمین در سیستم‌های تولید خودکار پرداخته و مدل پیچیده‌ای برای زنجیره تأمین چند سطحی ارائه می‌دهد که نیازمند تکنیک‌های پیشرفته تحقیق عملیاتی است. الگوریتم جستجوی هارمونی^۳ به‌عنوان روشی مناسب برای حل مسائل بهینه‌سازی انتخاب شده است و توانایی آن در حل مسائل پیچیده به اثبات رسیده است [۳۲].

بیان مسئله: صنعت بسته‌بندی، به‌ویژه در حوزه بازیافت کاغذ و کارتن، به عنوان یکی از ارکان حیاتی زنجیره تأمین، نقش قابل توجهی در کاهش مصرف منابع طبیعی، انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. با این وجود، این صنعت با چالش‌های متعددی روبه‌رو است؛ از جمله هزینه‌های عملیاتی بالا، کیفیت پایین‌تر محصولات بازیافتی، و پیچیدگی‌های مدیریتی در فرآیندهای بازیافت و بازتولید. این مسائل می‌توانند به کاهش بهره‌وری و افزایش عدم قطعیت در زنجیره تأمین منجر شوند. از این رو، ارائه راهکارهای بهینه‌سازی برای افزایش کارایی و پایداری این زنجیره امری ضروری به شمار می‌رود. مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته (CLSC) با تمرکز بر بازگشت و بازیافت مواد و ادغام عمودی فرآیندهای تولید و بازیافت، رویکردی نوآورانه برای حل این چالش‌ها ارائه می‌دهد. ادغام عمودی تولیدکنندگان کاغذ و کارتن می‌تواند منجر به بهبود هماهنگی، کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی جریان مواد در زنجیره تأمین شود. این استراتژی، با تقویت کنترل بر منابع، کاهش وابستگی به تأمین‌کنندگان خارجی و بهره‌گیری از مزایای مقیاس، امکان دستیابی به سطوح بالاتری از پایداری و بهره‌وری را فراهم می‌آورد.

خلاء پژوهشی: خلاء پژوهشی قابل توجهی در ادبیات موجود به چشم می‌خورد؛ به طوری که تاکنون به ترکیب اثربخش استراتژی ادغام عمودی با بهینه‌سازی‌های پیشرفته در زنجیره تأمین حلقه بسته کمتر پرداخته شده است. از سوی دیگر، کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری همچون الگوریتم ژنتیک (GA) و جستجوی هارمونی (HSA) به عنوان ابزارهای قدرتمند بهینه‌سازی در این حوزه، می‌تواند به کاهش هزینه‌ها، بهبود کارایی و افزایش پایداری منجر گردد. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، به مدل‌سازی و بهینه‌سازی یک زنجیره تأمین حلقه بسته ادغام شده می‌پردازد و تأثیرات استفاده از این الگوریتم‌ها را در مقایسه با رویکردهای مرسوم بررسی و تحلیل می‌نماید.

اهداف پژوهش: هدف اصلی این پژوهش بهینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت بسته‌بندی از طریق ادغام عمودی مراکز تولید کاغذ و کارتن و به کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری است. این هدف بر کاهش هزینه‌های کلی زنجیره تأمین، افزایش بهره‌وری و بهبود پایداری زنجیره تأمین متمرکز است. اهداف جزئی عبارتند از:

- تحلیل تأثیر ادغام عمودی مراکز تولید کاغذ و کارتن بر کاهش هزینه‌های کلی زنجیره تأمین و بررسی چگونگی بهبود هماهنگی، کنترل هزینه‌ها و بهره‌وری در فرآیندهای تولید و بازیافت.

- ارزیابی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، شامل الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA)، برای دستیابی به کاهش هزینه‌های موجودی و حمل‌ونقل.

¹ Zhang & et al.

² Mesni & et al.

³ Harmony Search algorithm (HAS)

- مقایسه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی در کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین و تعیین مزیت نسبی هر الگوریتم در دستیابی به نتایج بهینه و کاهش هزینه‌های سیستم.

روش‌شناسی

این پژوهش به منظور بهینه‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت بسته‌بندی و کاهش هزینه‌های عملیاتی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری طراحی شده است. ساختار روش‌شناسی به صورت زیر ارائه می‌شود:

مدل‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته: در این مرحله، زنجیره تأمین حلقه بسته با هدف پوشش تمامی فرآیندهای تولید، بازیافت و بازتولید مدل‌سازی شده است. مدل مورد نظر به صورت یکپارچه طراحی شده تا شامل تأمین‌کنندگان مواد اولیه، تولیدکنندگان کاغذ و کارتن، مشتریان نهایی، مراکز جمع‌آوری و بازیافت باشد. هدف از این مدل‌سازی، بهینه‌سازی هزینه‌های کلی زنجیره با تمرکز بر کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، نگهداری و کمبود است.

ادغام عمودی در زنجیره تأمین: ادغام عمودی مراکز تولید کاغذ و کارتن به عنوان راهکاری برای کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی در زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است. این ادغام به منظور بهبود هماهنگی میان مراکز تولید، کاهش هزینه‌های انتقال و افزایش کنترل بر فرآیندهای بازیافت و تولید انجام شده است. اثرات این ادغام بر بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌های موجودی و هزینه‌های حمل‌ونقل از طریق مدل‌سازی و شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت.

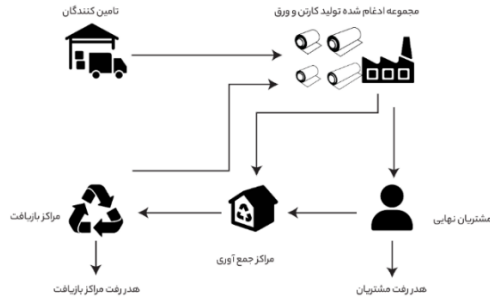
انتخاب و پیاده‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی: برای بهینه‌سازی مدل، از دو الگوریتم فراابتکاری الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) استفاده شد. انتخاب این الگوریتم‌ها به دلیل قابلیت آن‌ها در جستجوی بهینه در فضای چندهدفه و حل مسائل پیچیده با پارامترهای متعدد صورت گرفت. تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها بر اساس روش‌های استاندارد طراحی آزمایشات تاگوشی انجام شد تا بهترین مقادیر برای پارامترهای کلیدی (مانند نرخ جهش و ترکیب در الگوریتم ژنتیک و نرخ تنظیم حافظه و عرض باند در الگوریتم جستجوی هارمونی) مشخص شوند.

مطالعه موردی و داده‌های تجربی: مدل پیشنهادی در یک مطالعه موردی واقعی از صنعت بسته‌بندی پیاده‌سازی شد. داده‌های مرتبط شامل هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های موجودی، تقاضای مشتریان و مشخصات مراکز تولید از منابع معتبر و داده‌های میدانی گردآوری شد. داده‌های تجربی به منظور ارزیابی عملکرد مدل و مقایسه نتایج بهینه‌سازی الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

ارزیابی عملکرد و مقایسه نتایج: برای ارزیابی کارایی مدل و الگوریتم‌ها، معیارهایی شامل کاهش هزینه‌های کلی زنجیره، هزینه‌های موجودی و حمل‌ونقل، مدت زمان دستیابی به حل بهینه و شاخص‌های همگرایی الگوریتم‌ها در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی هارمونی به صورت کمی و کیفی تحلیل و مقایسه گردید تا برتری و مزایای هر یک از روش‌های بهینه‌سازی مشخص شود.

مدلسازی مسئله

در این مساله مطابق شکل شماره ۱، یکی از کاربردی‌ترین مسائل زنجیره تأمین، یعنی زنجیره تأمین و مصرف کاغذ آورده شده است که هدف زنجیره تأمین، کاهش هزینه‌های وارده بر سیستم می‌باشد.



شکل ۲. شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی مورد مطالعه

فرضیات مسئله

- هزینه سفارش در نظر گرفته نشده است.
- محدودیت حمل و نقل وجود ندارد.
- از مدت زمان حمل و نقل، چشم پوشی شده است.
- درصد ضایعات کارتن، ثابت و مشخص در نظر گرفته شده است.
- کمبود مجاز

اندیس‌ها

مجموعه تأمین کنندگان پیشنهادی	$I: i \in \{1, \dots, I\}$
مجموعه تولیدکنندگان و سازندگان پیشنهادی	$J: j \in \{1, \dots, J\}$
مجموعه مشتریان	$L: l \in \{1, \dots, L\}$
مجموعه مراکز جمع آوری پیشنهادی	$M: m \in \{1, \dots, M\}$
مجموعه مراکز بازیافتی پیشنهادی	$N: n \in \{1, \dots, N\}$
مجموعه محصولات	$P: p \in \{1, \dots, P\}$
دوره‌های زمانی	$T: t \in \{1, \dots, T\}$

پارامترها

هزینه ثابت ایجاد تأمین کننده i ام	F_i
هزینه ثابت ایجاد تولیدکننده ثابت j ام	F_j
هزینه ثابت برآورد نیاز مشتری l ام	F_l
هزینه ثابت ایجاد مرکز جمع آوری m ام	F_m
هزینه ثابت ایجاد مرکز بازیافت n ام	F_n
هزینه واحد حمل و نقل بین تأمین کننده i ام و تولیدکننده کاغذ j به ازای واحد محصول P ام	TSP_{ijp}
هزینه واحد حمل و نقل بین سازنده کاغذ و کارتن j ام و مشتری l ام به ازای واحد محصول P ام	TMC_{jlp}
هزینه واحد حمل و نقل بین سازنده کاغذ و کارتن j ام و مرکز جمع آوری m ام به ازای واحد محصول P ام	TMC_{jmp}
	P ام
هزینه واحد حمل و نقل بین مشتری l ام و مرکز جمع آوری m ام به ازای واحد محصول P ام	TCC_{lmp}
هزینه واحد حمل و نقل بین مرکز جمع آوری m ام و بازیافت کننده n ام به ازای واحد محصول P ام	TGR_{mnp}

TRP _{njp}	ام	هزینه واحد حمل و نقل بین بازیافت کننده n ام و سازنده کاغذ و کارتن ز ام به ازای واحد محصول P
h_{jp}		هزینه نگهداری واحد محصول p ام در سازنده ز ام
h_{tp}		هزینه نگهداری واحد محصول p ام در مشتری ا ام
CAPI _{ip}		ظرفیت تأمین کننده ا برای محصول خام p
CAPJ _{jp}		ظرفیت مرکز تولید ج برای محصول نهائی p
CAPL _{lp}		ظرفیت مشتری ا برای دریافت محصول p
CAP _{mp}		ظرفیت مرکز جمع آوری m برای جمع آوری محصول p
CAP _{np}		ظرفیت مرکز بازیافت n برای جمع آوری بازیافت محصول p
α_{ip}		درصد محصول p برای مشتری ا که به زنجیره تأمین بر نمی گردد
π_{itp}		هزینه کمبود محصول p برای مشتری ا در دوره t
β_{np}		درصد محصول p از مرکز بازیافت n که به زنجیره تأمین باز نمی گردد
c_j		هزینه تولید هر واحد رول کاغذ
c_i		هزینه خرید هر واحد کارتن مشتریان

متغیرهای تصمیم

Z_i	متغیر صفر و یک اگر در مرکز تأمین ا ایجاد شود، یک و در غیر این صورت صفر است.
Z_j	متغیر صفر و یک اگر در مرکز کاغذ و کارتن ز ایجاد شود، یک و در غیر این صورت صفر است.
Z_l	متغیر صفر و یک که همواره برابر یک است زیرا باید تمامی مشتریان انتخاب شوند.
Z_m	متغیر صفر و یک اگر در مرکز جمع آوری m ایجاد شود، یک و در غیر این صورت صفر است.
Z_n	متغیر صفر و یک اگر در مرکز بازیافت n ایجاد شود، یک و در غیر این صورت صفر است.
X_{ijpt}	تعداد محصول p ام جابه جاشده بین تأمین کننده ا ام و سازنده کاغذ و کارتن ز ام در دوره t ام
U_{jtpt}	تعداد محصول p ام جابه جاشده از سازنده کاغذ و کارتن ز ام به مشتری ا ام در دوره t ام
W_{jmpt}	تعداد محصول p ام جابه جاشده بین سازنده کاغذ و کارتن ز ام و مرکز جمع آوری m ام در دوره t ام
V_{lmpt}	تعداد محصول p ام جابه جاشده بین مشتری ا ام و مرکز جمع آوری m ام در دوره t ام
B_{mnp}	تعداد محصول p ام جابه جاشده از مرکز جمع آوری m ام به مرکز بازیافت n ام در دوره t ام
A_{njpt}	تعداد محصول p جابه جاشده از مرکز بازیافت n ام به تولیدکننده ز ام در دوره t ام
INV_{jpt}	موجودی محصول p ام در سازنده کاغذ و کارتن ز ام در دوره t ام
INV_{itp}	موجودی محصول p ام نزد مشتری ا ام در دوره t ام
$DIS1_{itp}$	تعداد محصول p ام از مشتری ا ام که به زنجیره تأمین بر نمی گردد.
SH_{itp}	مقدار کمبود محصول p ام برای مشتری ا ام در دوره t ام
$DIS2_{ntp}$	تعداد محصول p از مرکز بازیافت n که به زنجیره تأمین بر نمی گردد
D_{itp}	مقدار تقاضای محصول p ام برای مشتری ا ام در دوره t ام

$$\begin{aligned}
 \text{Min } f = & \sum_{i=1}^I F_i Z_i + \sum_{j=1}^J F_j Z_j + \sum_{l=1}^L F_l Z_l + \sum_{m=1}^M F_m Z_m + \sum_{n=1}^N F_n Z_n & (1) \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T TSP_{ijp} X_{ijpt} \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T TMC_{jlp} U_{jlpt} \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T TMC_{jmp} W_{jmpt} \\
 & + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T TCC_{lmp} V_{lmpt} \\
 & + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T TCR_{mnp} B_{mnpt} \\
 & + \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T TRP_{njp} A_{njpt} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \pi_{ltp} SH_{ltp} \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^J h_{jp} INV_{jpt} + \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L h_{lp} INV_{ltp}
 \end{aligned}$$

S.T.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T U_{jlpt} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T V_{lmpt} + \sum_{t=1}^T DIS1_{ltp} \quad \forall l, p \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T B_{mnpt} = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T V_{lmpt} + \sum_{i=1}^J \sum_{t=1}^T W_{jmpt} \quad \forall m, t, p \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^J \sum_{t=1}^T A_{njpt} = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T B_{mnpt} - \sum_{t=1}^T DIS2_{ntp} \quad \forall m, p \quad (4)$$

$$INV_{jpt} = INV_{jp(t-1)} + \sum_{i=1}^J X_{ijpt} - \sum_{l=1}^L U_{jlpt} - \sum_{m=1}^M W_{jmpt} \quad \forall j, t, p \quad (5)$$

$$INV_{lpt} = INV_{pl(t-1)} + \sum_{i=1}^J U_{jlpt} - \sum_{m=1}^M V_{lmpt} - DIS1_{ltp} \quad \forall l, t, p \quad (6)$$

$$SH_{ltp} = D_{ltp} - INV_{l(t-1)p} - \sum_{j=1}^J U_{jlpt} \quad (7)$$

$$+ SH_{l(t-1)p} \quad \forall l, t, p \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 & DIS1_{ltp} \\
 & = \alpha_l \left(\sum_{j=1}^J U_{jlpt} \right) \quad \forall l, t, p
 \end{aligned}$$

$$DIS2_{npt} = \beta_n \left(\sum_{m=1}^M B_{mnpt} \right) \quad \forall n, t, p \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^J X_{ijpt} \leq CAPI_i Z_i \quad \forall i, t, p \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^L U_{jlpt} \leq CAPJ_j Z_j \quad \forall j, t, p \quad (11)$$

$$\sum_{l=1}^M V_{lmpt} \leq CAPL_l Z_l \quad \forall l, t, p \quad (12)$$

$$\sum_{n=1}^N B_{mnpt} \leq CAP_m Z_m \quad \forall m, t, p \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^J A_{njpt} \leq CAP_n Z_n \quad \forall n, t, p \quad (14)$$

$$Z_i, Z_j, Z_l, Z_m, Z_n \in [0,1] \quad (15)$$

$$X_{ijpt}, U_{jlpt}, W_{jmpt}, V_{lmpt}, B_{mnpt}, A_{njpt}, INV_{ltp}, INV_{jpt}, DIS_{1ltp}, SH_{ltp}, DIS_{2ntp} \geq 0 \quad (16)$$

رابطه یک نشان دهنده تابع هدف کلی این مسئله می باشد که هدف آن حداقل سازی کل هزینه های زنجیره تأمین است که بر این اساس تابع هدف شامل ۴ قسمت می شود. در بخش نخست به حداقل سازی هزینه های تأسیس پرداخته شده (که هزینه ایجاد مراکز تولید کاغذ و کارتن عملاً به یک مرکز تبدیل شده است) و مجموعه هزینه های ثابت مراکز را به حداقل می رساند، هدف قسمت دوم حداقل کردن هزینه های حمل و نقل بین مراکز مختلف را شامل می شود. قسمت سوم شامل کاهش هزینه های کمبود برای مشتریان نهایی و قسمت چهارم به کاهش هزینه های نگهداری می پردازد. محدودیت های رابطه ۲ تا ۴ کل انتقال مواد خام، محصول نهایی و کالاهای بازیافتی در زنجیره تأمین را نشان می دهد، محدودیت های رابطه ۵ و ۶ سطح موجودی را برای مشتریان و سازندگان در هر دوره نشان می دهد. محدودیت ۷ سطح کمبود را برای مشتریان در هر دوره نشان می دهد. محدودیت های رابطه ۸ و ۹ در مورد درصد محصولاتی هستند که نمی توانند به زنجیره تأمین بازگردند. محدودیت های رابطه ۱۰ تا ۱۴ ظرفیت مراکز زنجیره تأمین را توضیح می دهد و محدودیت های رابطه ۱۵ و ۱۶ محدوده متغیرها را نشان می دهد.

روش انجام آزمایش

رویکرد پیشنهادی برای حل مسئله

طراحی آزمایشات کامل: در روش طراحی آزمایشات کامل، برای هر پارامتر چند سطح تعیین شده و مسأله برای هر ترکیب اجرا می شود تا بهترین سطح هر پارامتر مشخص شود. به عنوان مثال، در الگوریتم جستجوی هارمونی با پنج پارامتر و چهار سطح برای هر پارامتر، تعداد کل محاسبات با توجه به تعداد ترکیبها و دفعات آزمایش محاسبه می شود.

$$\text{Number of calculation} = 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 5 = 4^5 \times 5 = 5120$$

این تعداد زیاد محاسبات نشان می‌دهد که برای تعیین پارامترهای هر الگوریتم به تعداد زیادی آزمایش نیاز است. به همین دلیل، از روش‌هایی برای تعیین تعداد آزمایشات بهینه استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین این روش‌ها، طراحی آزمایشات تاگوچی^۱ است.

تنظیم پارامتر الگوریتم‌های حل

طبق روش تاگوچی برای هر پارامتر سه سطح در نظر گرفته شده و هر سناریو پنج بار اجرا شده و داده‌های بهترین زمان حل تا رسیدن به جواب بهینه جمع‌آوری می‌گردد. در جدول‌های شماره ۱ و ۲ لیست پارامترهای موجود در هر دو الگوریتم و مقادیر آن‌ها بنا به پایان‌نامه تحقیقاتی رستمی ۱۳۹۹ در هر سطح آورده شده است. و تنظیم پارامترها بنا به سطوح موجود در این پژوهش تنظیم گردیده است. در این تحقیق برای تعیین مقادیر بهینه پارامترها در الگوریتم ژنتیک بنا به وجود ۳ سطح و ۴ فاکتور از طرح آرایه‌های متعامد (34) L9 تاگوچی استفاده گردید و برای الگوریتم جستجوی هارمونی بنا به وجود ۴ سطح و ۵ فاکتور از طرح آرایه‌های متعامد (45) L16 استفاده گردید و مدل‌های تاگوچی از نرم‌افزار Minitab 18 استفاده گردیده است.

جدول ۱. پارامترهای مقادیر هر سطح در الگوریتم ژنتیک

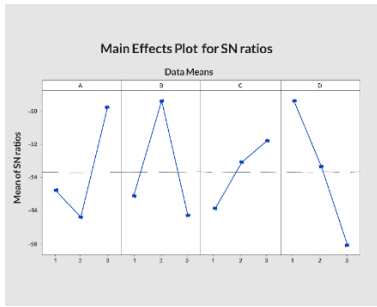
Level	Crossover rate	Mutation rate	Population Size	Number of iterations
I	0.6	0.05	30	300
II	0.7	0.1	50	1000
III	0.8	0.15	100	5000

جدول ۲. پارامترهای مقادیر هر سطح در الگوریتم جستجوی هارمونی

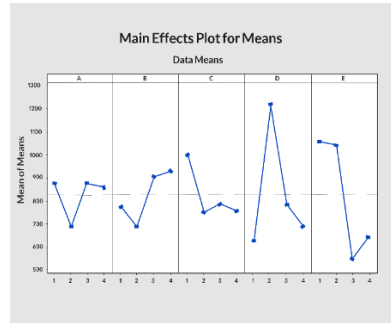
Level	Harmony memory consideration rate	Pitch adjusting rate	Harmony memory size	Number of iterations after best solution	Distance Band Width
I	0.8	0.55	50	50	5
II	0.85	0.65	100	100	10
III	0.9	0.7	150	200	20
IV	0.95	0.8	200	300	50

با توجه به مباحث مطرح شده برای تنظیم پارامترهای دو الگوریتم با یک مثال عددی که شامل دو سفارش هم‌گرید با ۶ عرض رول مورد بود مساله با توجه به پارامترهای ذکر شده در جدول‌های شماره ۱ و ۲ مورد بررسی قرار گرفت. سپس هر سناریو ۵ بار اجرا گردیده است و مقدار تابع هدف و زمان حل‌ها جمع‌آوری گردید. پس از این مرحله داده‌ها وارد نرم‌افزار Minitab 18 گردید و داده‌ها تحلیل شد. داده‌های تنظیم پارامتر در شکل‌های زیر آورده شده است. که در نمودارهای محور افقی سطح پارامتر و محور عمودی میانگین پارامتر و یا معیار S/N می‌باشد.

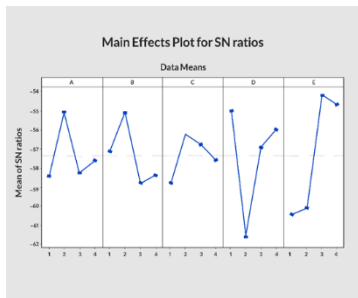
¹ Dr. Genuchi Taguchi



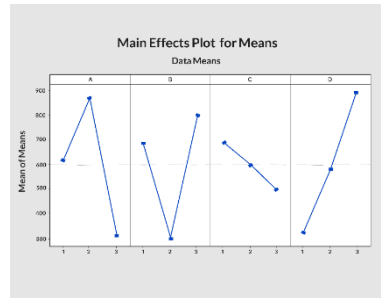
شکل ۴. معیار S/N میانگین جواب‌های الگوریتم ژنتیک



شکل ۳. میانگین جواب‌های الگوریتم ژنتیک



شکل ۶. معیار S/N میانگین جواب‌های الگوریتم جستجوی هارمونی



شکل ۵. میانگین جواب‌های الگوریتم جستجوی هارمونی

با توجه به تحلیل‌های انجام شده سطح بهینه پارامترهای مدل به شرح ذیل می‌باشد،
- الگوریتم ژنتیک:

percentage of crossover (Pc) = 0.8, Percentage of Mutation (Pm) = 0.1, Population size = 100, Number of iterations = 300

- الگوریتم جستجوی هارمونی:

Harmony memory consideration rate = 0.85, Pitch adjusting rate = 0.65, Harmony memory size = 100, Number of iterations after best solution = 50, Distance band width = 20

روش‌شناسی ارائه‌شده در این پژوهش به‌طور جامعی به مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته با رویکرد ادغام عمودی مراکز تولید کاغذ و کارتن پرداخته است. استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک (GA) و جستجوی هارمونی (HSA) امکان دستیابی به نتایج بهینه در کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین و بهبود کارایی فرآیندها را فراهم می‌آورد. در ادامه، نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی مدل و عملکرد این الگوریتم‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند تا تأثیرات رویکردهای بهینه‌سازی ارائه شده بر کارایی و کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین به‌طور دقیق مشخص شود. این ارزیابی‌ها می‌تواند راهکارهای پیشنهادی را برای بهبود سیستم‌های زنجیره تأمین مشابه در صنایع دیگر نیز تعمیم دهد.

نتایج و بحث

بنا به مقاله علیزاده و همکاران تا قبل از ادغام عمودی در قسمت تولیدکنندگان کاغذ و کارتن هزینه‌ها بر اساس جدول شماره ۳ بوده است. که در آن در آن ۴ مرکز مواد اولیه، ۱۰ کاغذ تولیدکننده، ۵ واحد کارتن سازی، ۳۰ مشتری نهایی، ۲۰ مرکز جمع‌آوری و ۱۰ بازیافت‌کننده وجود دارد. حال بنا به ادغام تولیدکنندگان کاغذ و کارتن در یک مدل مورد بررسی و بنا به داده‌های رسمی از سندیکای تولیدکنندگان کاغذ و مقوا ایران، انجمن صنایع کارتن و ورق ایران و اتاق بازرگانی، صنایع، معادن، کشاورزی ایران، در مدل بیان شده ۴ مرکز مواد اولیه، ۱۰ مرکز تولیدکننده کاغذ و کارتن، ۳۰ مشتری نهایی، ۲۰ مرکز جمع‌آوری و ۱۰ بازیافت‌کننده را در نظر خواهیم گرفت و بنا به اطلاعات داده شده به بهینه‌سازی مدل پیشنهادی با استفاده از دو الگوریتم جستجوی هارمونی و ژنتیک خواهیم پرداخت و مقایسات نتایج این دو الگوریتم نیز بنا به جدول شماره ۵ به نمایش درآمده است.

جدول ۳. هزینه وارده بر سیستم زنجیره تامین

2,392,832,283,520,095	هزینه کل زنجیره تامین
613,122,283,520,095	هزینه حمل و نقل
1,320,000,000,000	هزینه تاسیس
340,000,000,000	هزینه کمبود
119,710,000,000	هزینه موجودی

جدول ۴. داده‌های مساله

پارامترها	داده‌های مساله (میلیون تومان)	پارامترها	داده‌های مساله (تن)
F_i	3,000	$CAPI_{ip}$	160,000
F_j	300,000	$CAPI_{jp}$	25,000
F_l	1	$CAPL_{ip}$	6,000
F_m	5,000	CAP_{mp}	10,000
F_n	10,000	CAP_{np}	5,000
TSP_{ijp}	1	α_{ip}	1%
TMC_{jtp}	2.35	π_{itp}	$.1 * CAPI_{ip}$
TMC_{jmp}	1	β_{np}	$.05 * B_{mnp}$
TCC_{lmp}	1.25	h_{jp}	$.15 * c_j$
TCR_{mnp}	1	h_{lp}	$.15 * c_l$
TRP_{njp}	1		
c_j	.018730		
c_l	.033		

حال بر اساس الگوریتم جستجوی هارمونی و ژنتیک قصد بر تحلیل هزینه‌های موجود در زنجیره تامین بعد از ادغام عمودی را داریم بنا به همین مساله جدول تقاضای مشتریان را به صورت قطعی مطابق جدول شماره ۵ در نظر خواهیم گرفت.

جدول ۵. میزان تقاضای مشتریان

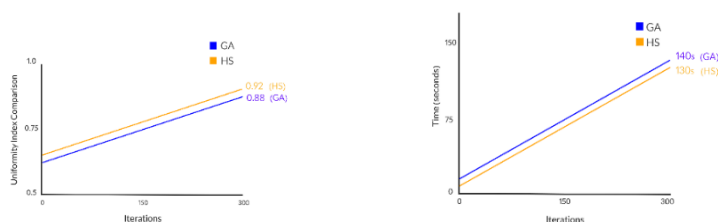
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Customer
19	180	89	80	17	21	43	259	59	20	28	85	29	55	15	Dlpt
30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	Customer
23	38	52	270	56	42	54	46	98	68	380	72	88	94	39	Dlpt

مقایسه

الگوریتم جستجوی هارمونی به طور کلی کاهش بیشتری در هزینه کل زنجیره تأمین (۰،۱۱٪) نسبت به الگوریتم ژنتیک (۰،۱۰٪) نشان داده است. این الگوریتم بهینه‌سازی بهتری در هزینه‌های حمل و نقل، تأسیس، کمبود و موجودی انجام داده است، به ویژه در کاهش هزینه موجودی با ۱۴،۳٪ در مقایسه با ۱۲،۹٪ الگوریتم ژنتیک. در تمامی شاخص‌ها، الگوریتم هارمونی عملکرد بهتری داشته است.

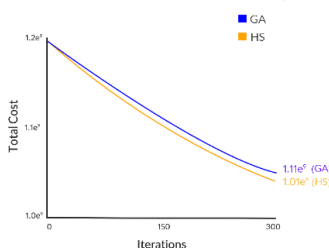
نمودارهای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی

الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) نسبت به سایر الگوریتم‌ها زمان حل کمتری، یکنواختی بیشتری در طول تکرارها و همگرایی سریع‌تری به سمت مقدار بهینه دارد.



شکل ۸. نمودار مقایسه شاخص یکنواختی

شکل ۷. نمودار مقایسه زمان حل



شکل ۹. نمودار مقایسه همگرایی

نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین کاغذ و کارتن پس از ادغام عمودی مراکز تولیدکننده پرداخته است. ادغام عمودی به عنوان یک راهکار استراتژیک جهت کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و بهبود هماهنگی در زنجیره تأمین به کار گرفته شده و از طریق بهینه‌سازی با دو الگوریتم فراابتکاری، یعنی الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) و الگوریتم ژنتیک (GA)، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که الگوریتم

جستجوی هارمونی با کاهش ۱۱ درصدی در هزینه‌های کلی زنجیره، نسبت به الگوریتم ژنتیک برتری داشته و عملکرد بهتری در کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، موجودی و هزینه‌های کلی زنجیره تأمین نشان داده است. این یافته‌ها، برتری استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در کنار استراتژی ادغام عمودی را برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها به وضوح تأیید می‌کند.

مقایسه با تحقیقات پیشین:

مطالعات قبلی عمدتاً به بهینه‌سازی زنجیره تأمین با تمرکز بر الگوریتم‌های فراابتکاری بدون در نظر گرفتن ادغام عمودی پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب استراتژی ادغام عمودی با الگوریتم‌های پیشرفته بهینه‌سازی می‌تواند منجر به بهبودهای چشمگیری در کاهش هزینه‌ها و افزایش پایداری زنجیره تأمین گردد. به‌ویژه، الگوریتم جستجوی هارمونی به دلیل همگرایی سریع‌تر و کاهش قابل توجه هزینه‌ها نسبت به الگوریتم‌های معمول، عملکرد مطلوبی داشته است.

آینده‌نگری و تعمیم‌پذیری:

این پژوهش پیشنهاد می‌کند که برای بهبود بیشتر در عملکرد زنجیره تأمین و افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری مدل‌های ارائه شده، پژوهش‌های آینده به بررسی تأثیر پارامترهای عدم قطعیت مانند نوسانات تقاضا، تغییرات در هزینه‌های عملیاتی و شرایط محیطی بپردازند. همچنین، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر نظیر الگوریتم ازدحام ذرات، کلونی مورچگان یا ترکیب الگوریتم‌ها می‌تواند به بهبود بیشتر مدل‌های بهینه‌سازی و افزایش کارایی سیستم زنجیره تأمین منجر شود. این مسیر پژوهشی می‌تواند به تعمیم نتایج این تحقیق در صنایع مشابه و کاربردهای مختلف منجر گردد، و باعث ارتقای پایداری و بهره‌وری در سیستم‌های زنجیره تأمین حلقه بسته شود.

پیشنهادها

در راستای بهبود و توسعه بهینه‌سازی زنجیره تأمین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی به بررسی و به‌کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری پیشرفته نظیر الگوریتم‌های ازدحام ذرات (PSO) و کلونی مورچگان (ACO) پرداخته شود، که قابلیت‌های بالایی در جستجوی بهینه و حل مسائل پیچیده دارند. این الگوریتم‌ها می‌توانند در بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین نقش مؤثری ایفا کنند. علاوه بر این، مدل‌سازی عدم قطعیت در تقاضا و هزینه‌ها با استفاده از روش‌های احتمالی، فازی یا استوار می‌تواند به تحلیل دقیق‌تر سیستم‌های زنجیره تأمین در مواجهه با نوسانات محیطی و شرایط غیرقطعی کمک نماید. افزودن ملاحظات زیست‌محیطی، از جمله کاهش اثرات کربن و پایش مصرف انرژی، به مدل‌های بهینه‌سازی می‌تواند موجب بهبود پایداری محیط‌زیستی زنجیره تأمین گردد.

در نهایت، بررسی تأثیر فناوری‌های نوین نظیر اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی (AI) و بلاکچین بر بهینه‌سازی زنجیره تأمین و کاهش هزینه‌ها می‌تواند به ارائه راهکارهای نوآورانه برای افزایش شفافیت، کارایی و انعطاف‌پذیری سیستم‌های زنجیره تأمین منجر شود. این فناوری‌ها با ایجاد ارتباطات پی‌شرفته و تسهیل در دسترس‌ی به داده‌ها، می‌توانند نقش مؤثری در مدیریت هوشمندانه زنجیره تأمین ایفا کنند.

References

- [۱] Darvish motevalli, M.H., & Salehi moghadam, S, *A New Model for the four-level multi-product supply chain optimization based on stochastic demand with probability distribution function*. Karafan Journal, (), -. doi: 10.48301/kssa.2024.421665.2742. https://karafan.tvu.ac.ir/article_194504.html ?lang=en. (In Persian). 2024.
- [۲] Shamsi Gooshki, S., & Nami, A, *Identifying, Prioritizing and Determining the Relationships of Supply Chain Agility Components with Fuzzy DEMATEL Approach in Oil and Gas Industry in Khuzestan Province*. Karafan Journal, 20(Special Issue), 693-714. , 2023. doi: 10.48301/kssa.2022.316790.1868 https://karafan.tvu.ac.ir/article_145977.html?lang=en. (In Persian).
- [۳] Diaz-Elsayed, N., Jondral, A., Greinacher, S., Dornfeld, D., & Lanza, G, *Assessment of lean and green strategies by simulation of manufacturing systems in discrete production environments*. CIRP Annals, 62(1), 475-478. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000785061300067X>., 2013.
- [۴] Panahizadeh, V., & Abdolhazadeh, H, *A Hybrid Algorithm based on Differential Evolution, Artificial Immune System and Particle Swarm Algorithms for Selection of Optimal Machining Parameters in Milling Operations*. Karafan Journal, 19(3), 163-185. doi: 10.48301/kssa. 2022.321254. 1914. https://karafan.tvu.ac.ir/article_150645.html?lang=en. (In Persian). 2022.
- [۵] Farooque, M., Zhang, A., Thürer, M., Qu, T., & Huisingh, D, *Circular supply chain management: A definition and structured literature review*. Journal of Cleaner Production, 228. ۶۰۰-۸۸۲, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619314003>., 2019.
- [۶] Hobson, K., *Closing the loop or squaring the circle. Locating generative spaces for the circular economy*. Progress in Human Geography, 40(1), 88-104. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0309132514566342> . 2016.
- [۷] Preston, F., *A global redesign. Shaping the circular economy*. https://www.academia.edu/download/32547802/A_global_redesign_-_shaping_the_circular_economy.pdf., 2012.
- [۸] Guide Jr, V.D.R., & Van Wassenhove, L. N, *Closed-loop supply chains: an introduction to the feature issue (part 1)*. Production and Operations Management, 15(3), 345-350., 2006. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1111/j.1937-5956.2006.tb00156.x>.
- [۹] Toffel, M.W., *Strategic management of product recovery*. California Management Review, 46(2), 120-141, 2004. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.2307/41166214>
- [۱۰] Moula, M.E., Sorvari, J., & Oinas, P, *Constructing a green circular society*. <https://research.aalto.fi/en/publications/constructing-a-green-circular-society>, 2017.
- [۱۱] Weetman, C., *A circular economy handbook for business and supply chains: Repair, remake, redesign, rethink*. Kogan Page Publishers. <https://archive.org/details/circulareconomyh0000weet> . , 2016.
- [۱۲] Babazadeh, R., *Presenting a Comprehensive Mathematical Programming Model for an Integrated Production–Distribution Planning in a Closed-Loop Supply Chain*.

- Advances in Industrial Engineering, 52(2), 149-16.
https://aie.ut.ac.ir/article_71062.html. (In Persian). , 2018.
- [۱۳] Hatefi, S.M., & Jolai, F, *Robust and reliable forward–reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions*. Applied mathematical modelling, 38(9-10), 2630-2647. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X13007191>, 2014.
- [۱۴] Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V, *Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques*. European journal of operational research, 235(3), 594-615. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221713010163>, 2014.
- [۱۵] Duan, W., Li, X., Xu, D., Ma, H., Sai, F., & Lian, X, *ECONOMIC PSYCHOLOGY ANALYSIS OF RECYCLERS'EMOTIONAL STABILITY IN CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN UNDER UNCERTAINTY*. International Journal of Neuropsychopharmacology, 25(Supplement_1), A55-A56. https://academic.oup.com/ijnp/article/25/Supplement_1/A55/6633428 2022.
- [۱۶] Shen, Y., Gao, T., Song, Z., & Ma, J, *Closed-Loop Supply Chain Decision-Making and Coordination Considering Fairness Concerns under Carbon Neutral Rewards and Punishments*. Sustainability, 15(8), 6466. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/8/6466> . 2023.
- [۱۷] Alizadeh Beromi, M., Afshar Kazemi, M. A., Keramati, M., & Toloie Ashlaghi, A , *Design and description of a pricing model in a four-level closed-loop supply chain considering uncertainty in the paper industry*. Management of Development and Transformation. JDEM-2311-3194. <https://sanad.iau.ir /Journal/jdem/Article/949552> . (In Persian). 2024.
- [۱۸] Harrigan, K.R., *Vertical integration and corporate strategy*. Academy of Management journal, 28(2), 397-425. <https://journals.aom.org/doi/abs/10.5465/256208>., 1985.
- [۱۹] Hamilton, J.L., & Mqasqas, I. M, *Direct vertical integration strategies* .Southern Economic Journal, 220-234. <https://www.jstor.org/stable/1061048>, 1997.
- [۲۰] Khanuja, A., & Jain, R. K, *Supply chain integration: a review of enablers, dimensions and performance*. Benchmarking: An international journal, 27(1), 264-301. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/BIJ-07-2018-0217/full/html>, 2019.
- [۲۱] Harahap, A.Z.M.K., & Rahim, M. K. I. A, *Saving Concepts in Supply Chain Management: A Study on Inventory and Transportation Costs*. [https://www.researchgate.net/publication_۳۷۱۳۰۹۸۹۱/Saving_Concepts_in_Supply_Chain_Management_A_Study_on_Inventory_and_Transportation_Costs](https://www.researchgate.net/publication/۳۷۱۳۰۹۸۹۱/Saving_Concepts_in_Supply_Chain_Management_A_Study_on_Inventory_and_Transportation_Costs), 2023.
- [۲۲] Du, X., Shi, G., & Zhao, Y, *The Path of Artificial Intelligence Technology to Reduce Cost and Increase Efficiency of E-Commerce Supply Chain*. In Proceedings of the 2022 6th International Conference on Software and e-Business (pp. 28-32). <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3578997.3579014>, 2022.
- [۲۳] Damodaram, A.K., Reddy, L. V., Davanam, G., & Thejasree, P, *Optimization of End-to-end Supply Chain Costs to Maximize Revenue and Profits From Supply Chain Operations*. <https://www.researchsquare.com /article/rs-1599398/v1>., 2022.

- [۲۴] Ait Laamim, M., Makrizi, A., & Essoufi, E. H, *Application of Genetic Algorithm for Solving Bilevel Linear Programming Problems*. *Bioinspired Heuristics for Optimization*, 123-136. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-95104-1_8, 2019.
- [۲۵] Zhao, Y., Shen, Y., & Yan, J, *Design and application of genetic algorithm based on signal game and newsboy model for optimizing supply chain*. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021, 1-9. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2021/6144258>, 2021.
- [۲۶] Chaharmahali, G., Ghandalipour, D., Jasemi, M., & Molla-Alizadeh-Zavardehi, S, *Modified metaheuristic algorithms to design a closed-loop supply chain network considering quantity discount and fixed-charge transportation*. *Expert Systems with Applications*, 202, 117364. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417422007163>., 2022.
- [۲۷] Abed, A.M., Seddek, L. F., & AlArjani, A, *Enhancing Two-Phase Supply Chain Network Distribution via Three Meta-Heuristic Optimization Algorithms Subsidized by Mathematical Procedures*. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 22(03), 445-476. <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219686723500221>, 2023.
- [۲۸] Firoozi, Z., Ismail, N., Ariaifar, S. H., Tang, S. H., & Ariffin, M. K. M. A, *A genetic algorithm for solving supply chain network design model*. In *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-17906-3_4., 2013. (Vol. 1557, No. 1, pp. 211-214).
- [۲۹] Zhang, F., Hu, Z., Yang, Y., & Ma, X, *Complex dynamics analysis of closed-loop supply chain considering CSR and fairness concerns*. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021, 1-23. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2021/7787420>., 2021.
- [۳۰] Misni, F., Lee, L. S., & Seow, H. V, *Hybrid harmony search-simulated annealing algorithm for location-inventory-routing problem in supply chain network design with defect and non-defect items*. . *Hybrid harmony search-simulated annealing algorithm for location-inventory-routing problem in supply chain network design with defect and non-defect items*. , 2020.
- [۳۱] Zarrinpoor, N., & Omidvari, Z ,*A Robust Optimization Model for the Strategic and Operational Design of the Oil Supply Chain*. *Journal of Industrial Management Perspective*, 10(Issue 4, Winter 2021), 155-191. doi: 10.52547/jimp.10.4.155. https://jimp.sbu.ac.ir/article_87605.html?lang=en .(In Persian). 2020.
- [۳۲] Bányai, T., *Optimisation of multi-level supply chain of automatised production systems with harmony search algorithm*. In *Proceedings of the II. European conference on logistics* (pp. 65-71). https://econpapers.repec.org/article/pczalspcz/v_3a5_3ay_3a2011_3ai_3a1_3ap_3a13-18.htm, 2011.