



Closed-Loop Supply Chain Design in Textile Industry

Mehdi Seifbarghy  *

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran

Shaghayegh Zangeneh 

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran

Abstract

The increasing volume of industrial waste and the environmental pressures caused by non-biodegradable products have highlighted the necessity of redesigning supply chains within the framework of a circular economy. Polyester carpets, as a high-consumption product with a short lifecycle, play a significant role in this challenge. This study presents a mixed-integer linear programming model for the design and optimization of a closed-loop supply chain in the Iranian polyester carpet industry. In the proposed model, forward and reverse flows are integrated across multiple levels, including raw material supply, production, distribution, collection of used products, refurbishment, and recycling. The objectives of the model are to minimize the total network costs and enhance environmental performance through the use of eco-friendly materials and clean technologies. To address the multi-objective nature of the problem, fuzzy programming and goal programming approaches are employed. The model is validated through a case study in the Iranian carpet industry using real-world data. The results show that the fuzzy programming approach provides much better environmental performance than other methods. The environmental index value in this method is equal to 259,658, which shows a significant improvement compared to the value of 54437 of the goal programming method. However, this improvement is naturally accompanied by an increase in the total network costs. Overall, the proposed model creates a favorable trade off between the total network costs and environmental goals.

Accepted: 25/04/2026

Revised: 10/04/2026

Received: 30/01/2026

eISSN: 2476-602X

ISSN: 2251/8029

* Corresponding Author: m.seifbarghy@alzahra.ac.ir

How to Cite: Seifbarghy, M., Zangeneh, SH. (2026). Closed-Loop Supply Chain Design in Textile Industry, *Industrial Management Studies*, 24(80), 1-42.

Introduction

In recent years, increasing environmental concerns and the rapid growth of industrial waste have drawn researchers' attention toward the development of sustainable supply chains and circular economy approaches. In this context, the textile industry, particularly polyester carpet, has become one of the main sources of environmental pollution due to high consumption levels and the non-biodegradable nature of its materials. Despite advantages such as affordability and attractive appearance, these products create significant waste management challenges due to their short lifespan and multilayer structure. Conventional disposal methods such as landfilling and incineration are not only unsustainable but also result in severe environmental impacts, including the release of microplastics and toxic gases. In this regard, closed-loop supply chains have been introduced as an effective solution to integrate forward and reverse flows and reduce environmental impacts. However, there is still a lack of comprehensive models that simultaneously consider both economic and environmental objectives in the carpet industry. Therefore, this study proposes a multi-objective mixed-integer linear programming model for designing a sustainable supply chain in the Iranian polyester carpet industry.

Methodology

In this study, a multi-objective mixed-integer linear programming (MILP) model is developed for designing a closed-loop supply chain network. The network consists of multiple echelons, including suppliers, manufacturing plants, retailers, customer zones, collection centers, refurbishment facilities, recycling centers, and industrial companies. In the forward flow, raw materials are delivered to manufacturing plants, where polyester carpets are produced and distributed to customer zones through retailers. In the reverse flow, used products are collected and classified based on their condition; reusable products are sent to refurbishment centers, while non-reusable items are directed to recycling facilities. The recycling process includes shredding and melt-spinning stages, enabling the recovery of polyester fibers. The proposed model includes two objective functions: minimizing total network cost and maximizing environmental performance through the use of eco-friendly materials and clean technologies. To solve this multi-objective problem, three approaches fuzzy programming, weighted goal programming, and multi-choice goal programming are applied. The model is implemented and solved in GAMS based on a real case study from the Iranian carpet industry.

Results and Discussion

The results indicate that different solution approaches exhibit different behaviors in balancing economic and environmental objectives. The fuzzy programming approach achieves the best environmental performance and provides a satisfactory balance between conflicting objectives, although this comes at the cost of higher total system cost. In contrast, weighted goal programming and multi-choice goal programming approaches, which focus on minimizing deviations from aspiration levels, yield lower costs but weaker environmental performance. The findings also show that refurbishment plays an important role in reducing costs and improving sustainability, while recycling enhances resource efficiency by returning materials to the production cycle. Furthermore, sensitivity analysis indicates that parameters such as demand, return rate, and recycling capacity have a significant impact on system performance, highlighting the importance of their optimal configuration.

Conclusion

This study presents a comprehensive multi-objective framework for designing a sustainable closed-loop supply chain in the polyester carpet industry, enabling simultaneous decision-making based on both economic and environmental criteria. The results show that the fuzzy programming approach achieves the best balance between cost and sustainability, while goal-based approaches are more suitable under strict financial constraints. From a managerial perspective, the development of collection infrastructure, expansion of refurbishment and recycling facilities, and adoption of clean technologies are key strategies for improving system sustainability. Moreover, collaboration among manufacturers, policymakers, and consumers plays a crucial role in the successful implementation of such systems. Ultimately, the findings demonstrate that integrating environmental considerations into supply chain design not only reduces negative environmental impacts but also enhances overall system efficiency and long-term sustainability.

For future research, incorporating uncertainty in key parameters such as demand, return rate, and cost through fuzzy or stochastic approaches can improve model accuracy. In addition, the use of metaheuristic algorithms for solving large-scale problems, the assessment of advanced environmental indicators such as carbon footprint, and the inclusion of social sustainability dimensions such as job creation in collection and recycling centers can further enhance the model's applicability and development under real-world conditions.

Keywords: Closed-Loop Supply Chain, Carpet Refurbishment, Environmental Considerations, Polyester Carpet.



طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت نساجی

مهدی سیف برقی  * گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران

شقایق زنگنه  گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران

چکیده

افزایش حجم پسماندهای صنعتی و فشارهای زیست محیطی ناشی از محصولات غیرقابل تجزیه، ضرورت بازطراحی زنجیره‌های تأمین در چارچوب اقتصاد چرخشی را برجسته ساخته است. فرش‌های پلی‌استر به عنوان یکی از محصولات پرمصرف با چرخه عمر کوتاه، سهم قابل توجهی در این چالش ایفا می‌کنند. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت فرش پلی‌استر ایران ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، جریان‌های مستقیم و معکوس به صورت یکپارچه در سطوح تأمین مواد اولیه، تولید، توزیع، جمع‌آوری محصولات مستعمل، نوسازی و بازیافت در نظر گرفته شده‌اند. اهداف مدل شامل کمینه‌سازی هزینه‌های کل شبکه و ارتقای عملکرد زیست محیطی از طریق استفاده از مواد دوستدار محیط زیست و فناوری‌های پاک است. به منظور حل مسئله چندهدفه، از رویکردهای برنامه‌ریزی فازی و برنامه‌ریزی آرمانی استفاده شده است. اعتبارسنجی مدل از طریق یک مطالعه موردی در صنعت فرش ایران با داده‌های واقعی انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که رویکرد برنامه‌ریزی فازی نسبت به سایر روش‌ها عملکرد زیست محیطی به مراتب بهتری ارائه می‌دهد؛ به طوری که مقدار شاخص زیست محیطی در این روش برابر با ۲۵۹۶۵۸ است که در مقایسه با مقدار ۵۴۴۳۷ در روش برنامه‌ریزی آرمانی، بهبود قابل توجهی را نشان می‌دهد. با این حال، این بهبود طبیعتاً با افزایش هزینه‌های کل شبکه همراه است. در کل مدل پیشنهادی، توازن مناسبی بین هزینه‌های کل شبکه و اهداف زیست محیطی ایجاد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین حلقه بسته، نوسازی فرش، ملاحظات زیست محیطی، فرش پلی‌استر.

مقدمه

صنعت فرش، به عنوان بخشی مهم از صنعت نساجی، تحول چشمگیری را از وابستگی به الیاف طبیعی به سوی استفاده گسترده از الیاف مصنوعی تجربه کرده است. در این میان، پلی استر به عنوان ستون اصلی این تحول، با سهم حدود ۶۰ درصدی از تولید جهانی الیاف، به مهم ترین ماده اولیه تبدیل شده است و پیش بینی می شود محرک اصلی رشد آینده صنعت نساجی باشد. این گذار به دلایل متعددی رخ داده است: ویژگی های مطلوب پلی استر (مانند درخشندگی، جذب رنگ عالی، ضدلک بودن و قیمت مقرون به صرفه) آن را به گزینه ای ایده آل برای تولید فرش های ماشینی با ظاهری شبیه به ابریشم تبدیل کرده است. با این حال، معایبی مانند دوام کمتر نسبت به نایلون و بازگشت پذیری ضعیف (عدم بازگشت فرش به حالت اول پس از فشار) نیز دارد که با روش هایی مانند محدود کردن ارتفاع خاب و تحقیقات برای بهبود ساختار لیف در حال رفع است. چالش بزرگ پیشروی این صنعت، مسئله بازیافت است. عمر مفید محدود فرش ها ۵ تا ۱۰ سال و ساختار چندلایه آن ها (Jain et al., 2012) که با چسب های غیرقابل ذوب (ترموست) به هم متصل شده (Wang et al., 2000)، بازیافت را پرهزینه و دشوار می کند؛ اما یکدست بودن جنس فرش های پلی استر، بازیافت آن ها را نسبت به سایرین آسان تر می سازد و نگرش تولید کنندگان ایرانی برای جمع آوری و بازیافت فرش های کهنه در حال تغییر مثبت است.

از نظر تولید، ایران با سرمایه گذاری در صنعت پتروشیمی، به خود کفایی قابل توجهی در تولید مواد اولیه پلی استر دست یافته و پتانسیل بالایی برای تبدیل شدن به یک تولید کننده و صادر کننده بزرگ در این زمینه دارد. استفاده از پلی استر در فرش های ماشینی ایرانی روندی روبه رشد دارد و آینده روشنی برای این صنعت ترسیم می کند. با این حال فرش های پلی استری به دلایل متعددی به یک معضل زیست محیطی جدی تبدیل شده اند. دفن این فرش ها در زمین (Miraftab, 2018) به تدریج با انتشار مواد شیمیایی سمی نه تنها باعث آلودگی های میکروپلاستیک می شود (Shi et al., 2023) که بر موجودات آبی و انسان ها اثرات منفی دارد (Jessieleena et al., 2023)، بلکه با انتشار مواد شیمیایی سمی و گازهای خطرناک، خاک، هوا و آب های زیرزمینی را برای مدت های طولانی آلوده می کند (Wang, 2010؛ Miraftab, 2018). از سوی دیگر، سوزاندن فرش ها اگرچه راهکاری برای بازیابی انرژی است، اما به دلیل تولید خاکستر حاوی فلزات سنگین و ترکیبات سرطانزا، خطرات جدی برای به ویژه ساکنان مناطق کم درآمد اطراف کارخانه ها دارد (Brent, 2004). بازیافت این فرش ها به عنوان راهکاری بهینه مطرح می شود، زیرا از

آلودگی محیطی جلوگیری می‌کند، محل دفن زباله را کاهش می‌دهد، نیاز به مواد خام را کم می‌کند و با ایجاد فرصت‌های شغلی جدید به اقتصاد چرخشی کمک می‌نماید (Choi, 2017). روش‌های مختلفی برای مدیریت این ضایعات وجود دارد از جمله بازیافت، تبدیل به انرژی (Cunningham et al., 2022) و روش‌های نوین مانند پیرولیز (Serio et al., 2003).

از ضایعات فرش بازیافتی می‌توان در کاربردهای گسترده‌ای همچون تولید عایق‌های ساختمانی (Sotayo et al., 2015)، تقویت بتن (Wang et al., 1994؛ Wang, 1999) تولید مبلمان و پستی فرش (Murray et al., 2000؛ McNeil et al., 2007) و بهبود خاک (El-Hadidy, 2001؛ Sellers, 1998) استفاده کرد.

کلید موفقیت در مدیریت این چالش، همکاری سه‌جانبه تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و دولت‌ها است. تولیدکنندگان با تولید فرش‌های همگن، مصرف‌کنندگان با انتخاب محصولات بازیافتی و دولت‌ها با وضع قوانین مناسب می‌توانند در این زمینه مؤثر باشند (Miraftab et al., 1999). در شرایط کنونی، تشدید چالش‌های زیست‌محیطی در کنار محدودیت‌های اقتصادی، ضرورت بازیافتی در ساختارهای سنتی زنجیره تأمین را برجسته ساخته است. در این چارچوب، طراحی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته و پایدار به عنوان راهکاری مؤثر برای دستیابی به توسعه پایدار مورد توجه قرار گرفته است.

در این راستا پژوهش حاضر که جزئیات آن در بخش بیان مسئله ارائه خواهد شد، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۱ ارائه می‌کند که امکان یکپارچه‌سازی اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را فراهم می‌سازد. مدل پیشنهادی باهدف کاهش هزینه‌های کل شبکه و هم‌زمان افزایش اثرات مثبت زیست‌محیطی از طریق مطلوبیت استفاده از مواد دوستدار محیط‌زیست در کارخانه‌ها و مراکز بازیافت و به‌کارگیری فناوری‌های پاک در فرایند بازیافت طراحی شده است. در این پژوهش، تولید و بازیافت فرش‌های پلی‌استر به عنوان محور اصلی مطالعه انتخاب شده است. این انتخاب مبتنی بر کارایی و مقرون‌به‌صرفه بودن روش‌های بازیافت برای این دسته از محصولات است.

در تبیین نوآوری‌های این پژوهش، باید تأکید نمود که مطالعه حاضر صرفاً به کاربرد یا انطباق یک مدل موجود در قالب یک مطالعه موردی محدود نشده، بلکه با رویکردی توسعه‌محور، در سه سطح اساسی شامل بازطراحی ساختار زنجیره تأمین، توسعه مدل ریاضی متناسب با ساختار پیشنهادی و پیاده‌سازی آن در یک بستر واقعی صنعتی، گسترش یافته است. مبنای نظری این تحقیق برگرفته از یک

1. Mixed-integer Linear programming

مطالعه خارجی در حوزه فرش نایلونی است؛ با این حال، در این پژوهش، با اتکا به مطالعات میدانی و بهره‌گیری از مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان صنعت فرش پلی‌استر (با توجه به غلبه این نوع فرش در بازار ایران)، ساختار زنجیره تأمین به صورت کاملاً بومی بازآرایی و توسعه یافته است. در این راستا، مؤلفه‌هایی نظیر خرده‌فروشی‌ها، مراکز نوسازی و شرکت‌های صنعتی به ساختار پایه افزوده شده و شبکه‌ای منطبق با ویژگی‌های صنعت فرش پلی‌استر کشور شکل گرفته است. علاوه بر این، یک مدل ریاضی دوهدفه متناسب با ساختار توسعه یافته، باهدف بهینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی تدوین شده است. درنهایت، با جمع‌آوری و تحلیل داده‌های واقعی صنعت فرش پلی‌استر ایران، مدل پیشنهادی در قالب یک مطالعه موردی پیاده‌سازی شده و کارایی و قابلیت اجرایی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

ساختار پژوهش در پنج بخش تنظیم شده است بخش دوم ارائه مرور ادبیات نظری و پیشینه تحقیق، بخش سوم بیان مسئله و ارائه مدل ریاضی و روش‌های حل مسئله، بخش چهارم مطالعه موردی و نتایج حل مدل و درنهایت بخش پنجم شامل یافته‌ها، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی است.

پیشینه پژوهش

مطالعات اولیه در حوزه بازیافت فرش عمدتاً بر طراحی و بهینه‌سازی شبکه لجستیک معکوس و تصمیم‌های مکان‌یابی و تخصیص متمرکز بوده‌اند. (Louwers et al., 1999) مدلی چندسطحی و چندمحصولی برای طراحی شبکه جمع‌آوری و توزیع مجدد ضایعات فرش ارائه کردند. هم‌زمان، (Realff et al., 1999) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چند دوره‌ای برای بهینه‌سازی فرایندهای جمع‌آوری و بازتولید توسعه دادند. در همین سال، (Miraftab et al., 1999) با تحلیل میزان ضایعات در صنعت فرش بریتانیا، نشان دادند که ۷٪ از درآمد این صنعت به دلیل ضایعات از بین می‌رود و بر راهکارهای مدیریتی مانند استفاده مجدد تأکید کردند. (Realff et al., 2000) این روند را با ارائه یک مدل چند دوره‌ای و چندسطحی برای طراحی استراتژیک سیستم‌های تولید معکوس ادامه دادند. سپس، (Realff et al., 2004) با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مقاوم، به طراحی شبکه لجستیک معکوس تحت شرایط عدم اطمینان پرداختند.

(Realff et al., 2005) در مطالعه‌ای جامع، دلایل شکست پروژه‌های بازیافت فرش در ایالات متحده را نبود بازار پایدار و عدم هماهنگی عرضه و تقاضا شناسایی کرد. (Wang, 2006) به بررسی فناوری‌های مختلف بازیافت؛ مانند تفکیک مکانیکی و تجزیه شیمیایی پرداخت، درحالی‌که (Helms

(and Hervani, 2006) چالش‌های اقتصادی و زیست‌محیطی لجستیک معکوس در این صنعت را بررسی کردند.

(Biehl et al., 2007) بر عملکرد و عدم قطعیت در طراحی این سیستم‌ها تمرکز کردند نتیجه گرفتند که بدون سیاست‌های قانونی حمایتی، جریان بازگشتی فرش در کوتاه‌مدت پاسخگوی تقاضا نخواهد بود. در ادامه، (Bucci, 2009) با در نظر گرفتن اقتصاد مقیاس، مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات را ارائه دادند. (Lu et al., 2011) با استفاده از تحلیل چرخه عمر، طراحی محصولاتی با مواد بازیافتی را برای کاهش مصرف انرژی پیشنهاد کردند.

(Jain et al., 2012) روشی نوین برای تبدیل ضایعات فرش به کامپوزیت‌های مهندسی ابداع کردند. (Bucci et al., 2014) مجدداً بر مزایای مراکز بازیافت در مقیاس بزرگ تأکید نمودند. (Sas et al., 2015) یک چارچوب جامع برای لجستیک معکوس در صنعت فرش ایالات متحده ارائه دادند و نشان دادند طراحی شبکه کارآمد برای کاهش فاصله حمل و نقل کلیدی است. (Sotayo et al., 2015) و (Cline et al., 2015) به ترتیب بر مزایای زیست‌محیطی بازیافت و اهمیت همکاری صنعت و دولت تأکید کردند. (Butar et al., 2016) اندازه‌گیری عملکرد زنجیره تأمین معکوس را مطالعه کردند.

(Swift and Sanchez, 2017) یک مدل برای پیش‌بینی تقاضای بازار فرش توسعه دادند. (Sas et al., 2018) و (Miraftab, 2018) به ترتیب به طراحی شبکه جمع‌آوری و دسته‌بندی روش‌های مدیریت ضایعات پرداختند. (Chaudhuri, 2018) به تحلیل ویژگی‌های الیاف و تأثیر آن بر دوام فرش پرداخت. در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها به سمت مدل‌های پیشرفته‌تر و کاربردهای نوین حرکت کرده‌اند. (Thoney et al., 2020) یک مدل چندسطحی برای مکان‌یابی بهینه مراکز بازیافت ارائه دادند. (Ghanbarzadeh et al., 2022) یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه فازی برای برنامه‌ریزی تولید همراه با لجستیک معکوس تحت عدم قطعیت توسعه دادند. (Abdelwahab et al., 2022) روشی نوین برای بازیافت ضایعات و ترکیب آن با پلی‌آمید ۶ از طریق اکستروژن واکنشی ارائه کردند.

(Cunningham et al., 2022) یک مدل جامع برای ارزیابی جریان مواد در چارچوب اقتصاد چرخشی ایجاد کردند. (Franco et al., 2023) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه دادند. (Simon et al., 2023) استفاده از الیاف بازیافتی در بتن را برای کاهش انتشار کربن بررسی کردند. در جدیدترین تحقیقات، (Adenle et al., 2024) رویکرد c2c را

برای ایجاد زنجیره تأمین حلقه بسته ترویج کردند.

(Yasin et al., 2024) و (Azarfam et al., 2024) به ترتیب بر توسعه کامپوزیت‌های میکرو فیبری برای کاهش میکروپلاستیک‌ها و تولید کامپوزیت‌های مهندسی سازه‌ای از پلی پروپیلن بازیافتی متمرکز شدند. سرانجام، (Abbas et al., 2025) به طراحی عایق‌های حرارتی از ضایعات فرش پرداختند. در جدول (۱) خلاصه مطالعات پیشینه پژوهشی ارائه شده است.

باوجود توسعه گسترده مدل‌های زنجیره تأمین حلقه بسته، همچنان فقدان چارچوبی یکپارچه که بتواند ویژگی‌های خاص صنعت فرش را همراه با اهداف چندگانه اقتصادی و زیست‌محیطی به‌طور هم‌زمان پوشش دهد، مشاهده می‌شود. بخش عمده‌ای از مطالعات موجود، جریان‌های مواد را به‌صورت مجزا بررسی کرده و تمرکز اصلی آن‌ها بر بهینه‌سازی اقتصادی بوده است، درحالی‌که ادغام هم‌زمان اهداف زیست‌محیطی در قالب یک مدل تصمیم‌گیری یکپارچه کمتر مشاهده می‌شود. این پژوهش با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه، این خلأ را پوشش داده و با در نظر گرفتن هم‌زمان جریان‌های مستقیم و معکوس، امکان بهینه‌سازی توأمان عملکرد اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی زنجیره تأمین را فراهم می‌سازد.

جدول ۱. مطالعات کلیدی در زمینه بازیافت فرش

ردیف	نویسندگان	چند دوره‌ای	چند محصولی	چند سطحی	اقتصادی	زیست محیطی	غیر قطعی			مطالعه موردی	مدل‌سازی
							فازی	احتمالی	استوار		
۱	لورز و همکاران (۱۹۹۹)		✓	✓	✓		✓			✓	NLP
۲	رنالف و همکاران (۱۹۹۹)		✓	✓	✓		✓			✓	MILP
۳	رنالف و همکاران (۲۰۰۰)	✓	✓	✓	✓				✓	✓	MILP
۴	رنالف و همکاران (۲۰۰۴)	✓	✓	✓	✓				✓	✓	MILP
۵	بیل و همکاران (۲۰۰۷)	✓		✓	✓			✓			شبیه‌سازی
۶	دی‌لو و همکاران (۲۰۱۱)					✓	✓			✓	LP

ردیف	نویسندگان	چند دوره‌ای	چند محصولی	چند سطحی	اقتصادی	زیست محیطی	قطعی	غیر قطعی			مطالعه موردی	مدل سازی
								فازی	احتمالی	استوار		
۷	بوچی و همکاران (۲۰۱۴)			✓	✓		✓				✓	MINLP
۸	سوئیفت و سانچز (۲۰۱۷)	✓			✓		✓				✓	ARX
۹	ساس و همکاران (۲۰۱۸)				✓		✓				✓	MILP
۱۰	ثونی و همکاران (۲۰۲۰)			✓	✓		✓				✓	MILP
۱۱	قنبرزاده و همکاران (۲۰۲۲)	✓	✓	✓	✓	✓		✓			✓	MILP
۱۲	کانینگهام و همکاران (۲۰۲۲)	✓	✓			✓	✓				✓	شبیه سازی
۱۳	فرانکو و همکاران (۲۰۲۳)	✓	✓	✓	✓		✓				✓	MILP
۱۴	پژوهش حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	MILP

*NLP: Non-linear Programming; MILP: Mixed Integer Linear Programming; LP: Linear Programming; MINLP: Mixed Integer Non-linear Programming; ARX: Autoregressive Exogenous Input

بیان مسئله و مدل پیشنهادی

در این بخش، مسئله طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار برای صنعت فرش پلی استر مورد بررسی قرار می گیرد. در این راستا، ساختار کلی شبکه، اجزای تشکیل دهنده زنجیره، جریان‌های مستقیم و معکوس محصولات و نحوه تعامل میان سطوح مختلف زنجیره تأمین تشریح شده و در ادامه مدل ریاضی توسعه یافته ارائه می شود.

بیان مسئله

پژوهش حاضر یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط را باهدف بهینه سازی هم زمان اهداف اقتصادی و زیست محیطی در زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه می دهد. مسئله مورد بررسی شامل یک شبکه چند محصولی، چند دوره ای و چند سطحی است که تمامی ذی نفعان اصلی مانند تأمین کنندگان مواد اولیه،

کارخانه‌ها، خرده‌فروش‌ها، نواحی مشتری، مراکز جمع‌آوری، مراکز نوسازی، مراکز بازیافت، شرکت‌های صنعتی را در بر می‌گیرد.

در جریان مستقیم، ابتدا تأمین‌کنندگان، الیاف پلی‌استر خام را فراهم کرده و آن‌ها را در اختیار کارخانه‌ها قرار می‌دهند. کارخانه‌ها با بهره‌گیری از این مواد اولیه، فرش‌های نو تولید کرده و محصولات را به خرده‌فروش‌ها منتقل می‌کنند. خرده‌فروش‌ها به‌عنوان واسطه‌ای کلیدی میان تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، وظیفه توزیع کالاهای نو را بر عهده دارند و هم‌زمان در عرضه محصولات نوسازی شده نیز مشارکت می‌کنند. درنهایت، محصولات نو از طریق خرده‌فروش‌ها به نواحی مشتری رسیده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نقطه، پایان جریان مستقیم و آغاز جریان معکوس است.

پس از مرحله مصرف، جریان معکوس آغاز می‌شود. نواحی مشتری، فرش‌های مستعمل خود را به مراکز جمع‌آوری بازمی‌گردانند. این مراکز به‌عنوان حلقه آغازین در فرایند بازگشت، کالاهای دریافت‌شده را ارزیابی و بر اساس قابلیت استفاده، آن‌ها را به دو مسیر متفاوت هدایت می‌کنند.

دسته نخست، محصولاتی هستند که امکان نوسازی و تعمیر دارند. این دسته از محصولات به مراکز نوسازی ارسال شده و پس از طی فرایند احیا و نوسازی، مجدداً به خرده‌فروش‌ها منتقل می‌شوند تا در کنار محصولات نو به بازار عرضه گردند.

دسته دوم شامل محصولاتی است که دیگر قابلیت نوسازی ندارند و صرفاً از طریق فرایند بازیافت قابل استفاده هستند. این محصولات به مراکز بازیافت فرستاده می‌شوند و در آنجا به مواد اولیه قابل مصرف تبدیل می‌گردند. بخشی از الیاف بازیافتی دوباره به کارخانه‌ها بازگردانده می‌شود تا در تولید فرش‌های نو مورد استفاده قرار گیرد و ضایعات بازیافتی به شرکت‌های صنعتی واگذار می‌گردد تا در تولید محصولات صنعتی باکیفیت پایین‌تر به کار گرفته شوند.

فرایند بازیافت فرش‌های پلی‌استر به‌صورت دو مرحله متوالی انجام می‌شود که در آن ابتدا عملیات خردکردن و سپس مرحله ذوب‌ریسی مورد اجرا قرار می‌گیرد.

در مرحله نخست، فرایند مکانیکی به‌منظور کاهش ابعاد قطعات بزرگ فرش به قطعات کوچک‌تر انجام می‌شود. در یک فرایند معمول، مواد اولیه توسط یک درام چرخشی مجهز به تیغه‌های سخت شده برش داده می‌شوند. طراحی ویژه این خردکن‌ها (باله‌های تیز و فاصله کم بین تیغه‌ها) از پیچیدن الیاف جلوگیری می‌کند و استفاده از گشتاور بالا همراه با سرعت چرخش پایین، مانع از گرم‌شدن و ذوب‌شدن

ناخواسته پلیمرها می‌گردد (Sharer, 1996; Hawn, 2001; Strzelecki, 2004). این ماشین‌آلات با کارایی بالا و هزینه نگهداری کم، گزینه‌ای بهینه برای پردازش زباله‌های نساجی به شمار می‌روند (Sferrazza et al., 1996; Deschamps, 1998; Bacon et al., 1999; Rowe, 2000; White, 2000; Yamamoto et al., 1996).

در مرحله بعد، فرایند ذوب‌ریسی به‌عنوان روشی متداول برای تولید الیاف جدید از مواد بازیافتی انجام می‌پذیرد. پلی‌استر به‌عنوان یک پلیمر گرمانرم، قابلیت ذوب و شکل‌دهی مجدد را دارد (Schumann, 2007؛ نوری، ۱۴۰۲؛ Wang, 2006) و اکسترودر یک دستگاه صنعتی محفظه و ماردون‌دار است که نقش اصلی را در مرحله ذوب و هموژن‌سازی بر عهده دارد. در این دستگاه، مواد گرانولی بازیافتی (خرده‌های فرش) با اعمال نیروی مکانیکی و حرارت ذوب‌شده و به‌صورت مذاب یکنواختی درمی‌آیند. این مذاب سپس تحت فشار از صافی‌های مخصوص (فیلتر) عبور کرده تا ناخالصی‌ها و ژل‌های پلیمری آن جدا شود (Ishikawa, 2007).

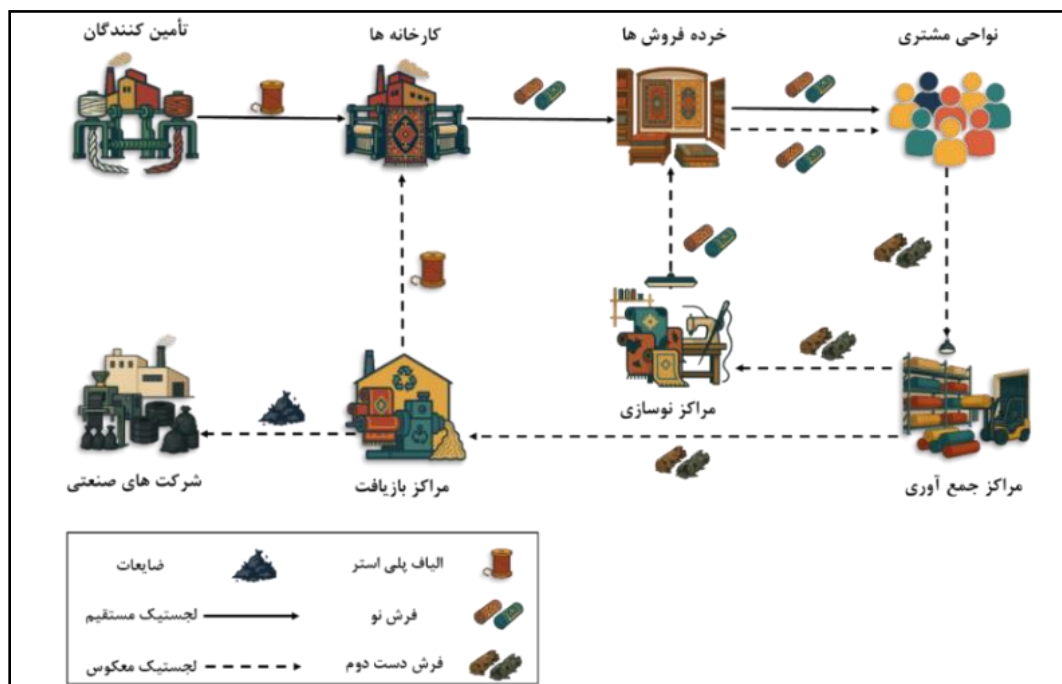
مذاب پالایش‌شده، پس از عبور از یک مخلوط‌کن ایستا برای یکنواخت‌تر شدن، به سمت صفحه رشته‌ساز هدایت می‌شود تا به‌صورت فیلامنت‌های نازک درآید. این فیلامنت‌ها بلافاصله سرد و منجمد شده و درنهایت تحت کشش قرار می‌گیرند تا به استحکام و قطر مطلوب برسند. محصول نهایی می‌تواند به‌صورت فیلامنت‌های پیوسته یا الیاف بریده‌شده (استیپل^۱) در طول‌های استاندارد تولید شود (Schumann, 2007؛ عیوض‌زاده، ۱۳۹۲). در این چارچوب، اکسترودرهای متداول در صنعت به دودسته اصلی تک‌ماردونه و دوماردونه تقسیم‌بندی می‌شوند که انتخاب هر یک با توجه به ویژگی‌های مواد ورودی و کیفیت مورد انتظار محصول نهایی صورت می‌پذیرد.

مفروضات مسئله به شرح زیر است:

- مدل پیشنهادی چندمحصولی، چند دوره‌ای و چندسطحی است.
- پارامترهای مدل پیشنهادی قطعی هستند.
- *مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه برای احداث تسهیلات، از قبل تعریف‌شده و قطعی است.
- تعداد و مکان‌های تأمین‌کنندگان، خرده‌فروش‌ها، نواحی مشتری و شرکت‌های صنعتی ثابت و از پیش تعیین شده است.
- هزینه‌های احداث برای هر نوع تسهیل در این مکان‌ها قابل‌پیش‌بینی و مشخص است.

- ظرفیت تسهیلات ثابت و از قبل تعیین شده است و محدودیت ظرفیت وجود دارد.
- تنها یک نوع وسیله نقلیه برای حمل محصولات در شبکه وجود دارد.
- هزینه حمل و نقل میان سطوح شبکه بر اساس میزان محصول منتقل شده و فواصل بین تسهیلات مرتبط محاسبه می گردد.
- تنها درصدی از محصولات فروخته شده بازمی گردند.
- فرش های دست دوم مجدد به نواحی مشتری ارسال می شوند.
- محصولات جمع آوری شده با نسبت های مشخصی به مراکز نوسازی و مراکز بازیافت ارسال می شوند.

شکل ۱. طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته فرش



مدل پیشنهادی برای زنجیره تأمین حلقه بسته

در این قسمت اندیس ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل به صورت زیر ارائه می شوند:

شاخص ها (اندیس ها)

$S \in S$ مجموعه مکان های ثابت تأمین کنندگان مواد اولیه

$f \in F$	مجموعه مکان‌های بالقوه برای استقرار کارخانه‌ها
$r \in R$	مجموعه مکان‌های ثابت خرده‌فروش‌ها
$c \in C$	مجموعه مکان‌های ثابت نواحی مشتری
$l \in L$	مجموعه مکان‌های بالقوه برای استقرار مراکز جمع‌آوری
$u \in U$	مجموعه مکان‌های بالقوه برای استقرار مراکز نوسازی
$e \in E$	مجموعه مکان‌های بالقوه برای استقرار مراکز بازیافت
$a \in A$	مجموعه مکان‌های ثابت شرکت‌های صنعتی
$p \in P$	مجموعه محصولات
$t \in T$	مجموعه دوره‌های زمانی

پارامترها

FF_f	هزینه ثابت راه‌اندازی کارخانه f
FU_u	هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز نوسازی u
FL_l	هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز جمع‌آوری l
FE_e	هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز بازیافت e
TS_{sf}	هزینه حمل هر واحد الیاف پلی‌استر از تأمین‌کننده s تا کارخانه f
TF_{pfr}	هزینه حمل هر واحد محصول p از کارخانه f تا خرده‌فروش r
TR_{prc}	هزینه حمل هر واحد محصول p از خرده‌فروش r تا نواحی مشتری c
TC_{pcl}	هزینه حمل هر واحد محصول p از نواحی مشتری c تا مرکز جمع‌آوری l
TL_{plu}	هزینه حمل هر واحد محصول p از مرکز جمع‌آوری l تا مرکز نوسازی u
TE_{ple}	هزینه حمل هر واحد محصول p از مرکز جمع‌آوری l تا مرکز بازیافت e
TU_{pur}	هزینه حمل هر واحد محصول p از مرکز نوسازی u تا خرده‌فروش r
TN_{ef}	هزینه حمل هر واحد الیاف پلی‌استر از مرکز بازیافت e تا کارخانه f
TA_{ea}	هزینه حمل هر واحد مواد بازیافتی از مرکز بازیافت e تا شرکت‌های صنعتی a
CS_{st}	ظرفیت تأمین‌کننده s برای تأمین الیاف پلی‌استر در دوره زمانی t
CF_{pft}	ظرفیت کارخانه f برای تولید محصول p در دوره زمانی t

ظرفیت نوسازی محصول p در مرکز نوسازی u دوره زمانی t	CU_{put}
ظرفیت جمع آوری محصول p در مرکز جمع آوری l در دوره زمانی t	CL_{plt}
ظرفیت مرکز بازیافت e در دوره زمانی t برای بازیافت محصولات مختلف	CE_{et}
وزن هر یک از محصولات p	GK_p
درصد بازگشتی محصول p از نواحی مشتری c	GV_{pc}
درصد تبدیل محصول p به الیاف پلی استر در هر مرکز بازیافت	GH_p
درصدی از محصول جمع آوری شده p که از مرکز جمع آوری l به مراکز نوسازی ارسال می شود	B_{pl}
تقاضای نواحی مشتری c از محصول p در دوره زمانی t	DP_{pct}
فاصله بین تأمین کننده s تا کارخانه f	VS_{sf}
فاصله بین کارخانه f تا خرده فروش r	VF_{fr}
فاصله بین خرده فروش r تا نواحی مشتری c	VR_{rc}
فاصله بین نواحی مشتری c تا مرکز جمع آوری l	VC_{cl}
فاصله بین مرکز جمع آوری l تا مرکز نوسازی u	VL_{lu}
فاصله بین مرکز جمع آوری l تا مرکز بازیافت e	VE_{le}
فاصله بین مرکز نوسازی u تا خرده فروش r	VU_{ur}
فاصله بین مرکز بازیافت e تا کارخانه f	VN_{ef}
فاصله بین مرکز بازیافت e تا شرکت های صنعتی a	VA_{ea}
مطلوبیت استفاده از هر تن مواد دوستدار محیط زیست توسط کارخانه f در تولید محصول p در دوره t	M_{pft}
مطلوبیت استفاده از تکنولوژی پاک در مرکز بازیافت e برای انجام عملیات تولید محصول p در دوره t	N_{pet}

متغیرهای تصمیم

اگر کارخانه f ایجاد شود، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت ۰ است.	XF_f
اگر مرکز نوسازی u ایجاد شود، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت ۰ است.	XU_u
اگر مرکز جمع آوری l ایجاد شود، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت ۰ است.	XL_l

XE_e	اگر مرکز بازیافت e ایجاد شود، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت ۰ است.
YS_{sft}	مقدار الیاف پلی استر ارسالی از تأمین کننده s به کارخانه f در دوره زمانی t
YF_{pfrt}	مقدار محصول p ارسالی از کارخانه f به خرده فروش r در دوره زمانی t
YR_{prct}	مقدار محصول p ارسالی از خرده فروش r به نواحی مشتری c در دوره زمانی t
YC_{pclt}	مقدار محصول p ارسالی از نواحی مشتری c به مرکز جمع آوری l در دوره زمانی t
YL_{plut}	مقدار محصول p ارسالی از مرکز جمع آوری l به مرکز نوسازی u در دوره زمانی t
YE_{plet}	مقدار محصول p ارسالی از مرکز جمع آوری l به مرکز بازیافت e در دوره زمانی t
YU_{purt}	مقدار محصول p ارسالی از مرکز نوسازی u به خرده فروش r در دوره زمانی t
YN_{eft}	مقدار الیاف پلی استر ارسالی از مرکز بازیافت e به کارخانه f در دوره زمانی t
YA_{eat}	مقدار مواد بازیافتی ارسالی از مرکز بازیافت e به شرکت های صنعتی a در دوره زمانی t

باتوجه به نمادهای تعریف شده، مدل ریاضی این پژوهش به صورت زیر خواهد بود:

توابع هدف مسئله

Minimize $Z_1 =$

$$\begin{aligned}
 & \sum_f FF_f \times XF_f + \sum_u FU_u \times XU_u + \sum_l FL_l \times XL_l + \sum_e FE_e \times XE_e \\
 & + \sum_{sft} TS_{sf} \times YS_{sft} \times VS_{sf} + \sum_{pfrt} TF_{pfr} \times YF_{pfrt} \times VF_{fr} \\
 & + \sum_{prct} TR_{prc} \times YR_{prct} \times VR_{rc} + \sum_{pclt} TC_{pcl} \times YC_{pclt} \times VC_{cl} \\
 & + \sum_{plut} TL_{plu} \times YL_{plut} \times VL_{lu} + \sum_{purt} TU_{pur} \times YU_{purt} \times VU_{ur} \\
 & + \sum_{plet} TE_{ple} \times YE_{plet} \times VE_{le} + \sum_{eft} TN_{ef} \times YN_{eft} \times VN_{ef} \\
 & + \sum_{eat} TA_{ea} \times YA_{eat} \times VA_{ea}
 \end{aligned} \tag{۱}$$

Maximize $Z_2 =$

$$\sum_{pft} M_{pft} \times \left(\sum_r YF_{pfrt} + \sum_e YN_{eft} \right) + \sum_{pet} N_{pet} \times \sum_l YE_{plet} \quad (2)$$

محدودیت‌های مسئله

$$\sum_f YS_{sft} \leq CS_{st} \quad \forall s, t \quad (3)$$

$$\sum_r YF_{pfrt} \leq CF_{pft} \times XF_f \quad \forall p, f, t \quad (4)$$

$$\sum_c YC_{pclt} \leq CL_{plt} \times XL_l \quad \forall p, l, t \quad (5)$$

$$\sum_l YI_{plut} \leq CU_{put} \times XU_u \quad \forall p, u, t \quad (6)$$

$$\sum_{pl} YE_{plet} \leq CE_{et} \times XE_e \quad \forall e, t \quad (7)$$

$$\sum_r YR_{prct} + \sum_{ur} YU_{purt} \geq DP_{pct} \quad \forall p, c, t \quad (8)$$

$$\sum_e YN_{ef1} = 0 \quad \forall f \quad (9)$$

$$\sum_s YS_{sft} + \sum_e YN_{eft} = \sum_{pr} YF_{pfrt} \times GK_p \quad \forall f, t = 2, 3, \dots T \quad (10)$$

$$\sum_u YU_{pur1} = 0 \quad \forall p, r \quad (11)$$

$$\sum_f YF_{pfrt} + \sum_u YU_{purt} = \sum_c YR_{prct} \quad \forall p, r, t = 2, 3, \dots T \quad (12)$$

$$GV_{pc} \times \sum_r YR_{prct} = \sum_l YC_{pclt} \quad \forall p, c, t \quad (13)$$

$$\sum_c YC_{pclt} = \sum_u YL_{plut} + \sum_e YE_{plet} \quad \forall p, l, t \quad (14)$$

$$\sum_u YL_{plut} = B_{pl} \times \sum_c YC_{pclt} \quad \forall p, l, t \quad (15)$$

$$\sum_l YL_{plut} = \sum_r YU_{pur(t+1)} \quad \forall p, u, t \quad (16)$$

$$\sum_e YE_{plet} = (1 - B_{pl}) \times \sum_c YC_{pclt} \quad \forall p, l, t \quad (17)$$

$$\sum_{pl} YE_{plet} \times GK_p = \sum_f YN_{ef(t+1)} + \sum_a YA_{eat} \quad \forall e, t \quad (18)$$

$$\sum_{pl} YE_{plet} \times GK_p \times GH_p = \sum_f YN_{ef(t+1)} \quad \forall e, t \quad (19)$$

$$\sum_{pl} YE_{plet} \times GK_p \times (1 - GH_p) = \sum_a YA_{eat} \quad \forall e, t \quad (20)$$

$$XF_f, XU_u, XL_l, XE_e \in \{0, 1\} \quad (21)$$

$$YS_{sft}, YF_{pfrt}, YR_{prct}, YC_{pclt}, YL_{plut}, YE_{plet}, YU_{pur}, YN_{eft}, YA_{eat} \geq 0 \quad (22)$$

مدل ریاضی توسعه یافته دارای دو تابع هدف است. تابع هدف (۱) به کمینه سازی هزینه های شبکه زنجیره تأمین اختصاص دارد؛ به گونه ای که هزینه های ثابت احداث تسهیلات و هزینه های متغیر حمل و نقل بین سطوح مختلف شبکه را در بر می گیرد. تابع هدف (۲) بر ارتقای عملکرد زیست محیطی شبکه متمرکز است و باهدف مطلوبیت استفاده از مواد اولیه دوستدار محیط زیست در کارخانه ها و مراکز بازیافت و به کارگیری فناوری های پاک صرفاً در فرایند بازیافت تعریف شده است.

لازم به ذکر است منظور از «ارتقای عملکرد زیست محیطی» بهبود وضعیت زیست محیطی کل زنجیره تأمین نسبت به حالتی است که از مواد و فناوری های دوستدار محیط زیست و تکنولوژی های پاک استفاده نشده است. درواقع مدل با انتخاب مواد سازگار با محیط زیست و بهره گیری از فناوری های پاک، اثرات منفی زیست محیطی را کاهش داده و عملکرد زیست محیطی شبکه را به سطح بالاتری می رساند.

محدودیت‌های (۳) تا (۷) به عنوان محدودیت‌های ظرفیت برای سطوح مختلف شبکه از جمله تأمین کنندگان، کارخانه‌ها، مراکز جمع‌آوری، مراکز نوسازی و مراکز بازیافت تعریف شده‌اند. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که تقاضای هر ناحیه مشتری تأمین شود؛ به گونه‌ای که این تقاضا می‌تواند از طریق محصولات جدید یا محصولات نوسازی شده برآورده گردد.

مجموعه محدودیت‌های (۹) تا (۲۰) به عنوان محدودیت‌های تعادل جریان عمل کرده و توازن میان جریان‌های ورودی و خروجی را در تسهیلات مختلف شامل کارخانه‌ها، خرده‌فروش‌ها، مراکز جمع‌آوری، مراکز نوسازی، مراکز بازیافت و شرکت‌های صنعتی برقرار می‌سازند و بدین ترتیب مسیر حرکت محصولات نو، مستعمل، نوسازی شده، مواد بازیافتی و ضایعات را تعیین می‌کنند. در نهایت، محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) دامنه متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کنند.

۳-۳- روش حل مسائل چندهدفه

مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه زمانی مطرح می‌شوند که چندین هدف متعارض، از جمله اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، باید به طور هم‌زمان در یک چارچوب تصمیم‌گیری واحد لحاظ شوند. در چنین شرایطی، بهینه‌سازی یک هدف معمولاً منجر به کاهش عملکرد سایر اهداف می‌شود؛ از این رو، به کارگیری رویکردهای مناسب برای ایجاد توازن میان اهداف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، به منظور ادغام این اهداف، از سه رویکرد حل شامل برنامه‌ریزی فازی^۱، برنامه‌ریزی آرمانی ساده^۲ و برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای^۳ استفاده شده است.

برنامه‌ریزی خطی فازی

در برنامه‌ریزی فازی هم اهداف و هم محدودیت‌ها به عنوان مجموعه‌های فازی در نظر گرفته می‌شوند. جواب بهینه درواقع نقطه‌ای است که در آن اهداف فازی و محدودیت‌های فازی به بهترین شکل ممکن باهم تلاقی می‌کنند و دیگر تفاوتی بین هدف و محدودیت وجود ندارد و هر دو به یک اندازه اهمیت پیدا می‌کنند (Zimmermann, 1975).

این روش با تشکیل جدول بازده آغاز می‌شود که در آن هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه

1. Fuzzy Programming

2. Goal Programming

3. Multi-Choice Goal Programming

و با در نظر گرفتن کلیه محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی می‌شوند تا مقادیر ایده‌آل (Z_k^{PIS}) و ضد ایده‌آل (Z_h^{NIS}) هر هدف مشخص گردد.

سپس با تعریف توابع عضویت فازی برای هر هدف، درجه رضایتمندی از عملکرد آن‌ها به صورت کمی سنجیده می‌شود. برای اهداف کمینه‌سازی، تابع عضویت به صورت نزولی طراحی می‌شود که در مقدار ایده‌آل برابر با رضایت کامل و در مقدار ضد ایده‌آل برابر با عدم رضایت است، در حالی که برای اهداف بیشینه‌سازی این رابطه به صورت صعودی برقرار می‌شود:

$$\mu_k(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_k(x) < Z_k^{PIS} \\ \frac{Z_k^{NIS} - Z_k(x)}{Z_k^{NIS} - Z_k^{PIS}} & \text{if } Z_k^{PIS} \leq Z_k(x) \leq Z_k^{NIS} \\ 0 & \text{if } Z_k(x) > Z_k^{NIS} \end{cases} \quad (23)$$

در نهایت، با معرفی متغیر (λ) که نشان‌دهنده حداقل میزان رضایت از بین تمامی اهداف است، مدل فازی به یک مدل برنامه‌ریزی خطی قطعی تبدیل می‌شود. در این مدل، $(\mu_k(x))$ تابع عضویت مربوط به هر هدف و (S) مجموعه محدودیت‌های اصلی مسئله است. مدل نهایی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} & \text{Max } \lambda \\ & \text{S.t:} \\ & x \in S \\ & \lambda \leq \mu_k(x) \quad k = 1, 2, \dots, K \\ & 0 \leq \lambda \leq 1 \end{aligned} \quad (24)$$

برنامه‌ریزی آرمانی وزنی

برنامه‌ریزی آرمانی وزنی به عنوان یکی از روش‌های کلاسیک و پرکاربرد در حل مسائل چندهدفه، نخستین بار توسط (Charnes and Cooper, 1957) معرفی شد. در این روش، برای هر هدف سطح آرمانی مشخصی تعیین می‌شود و هدف مدل، کمینه‌سازی مجموع این انحرافات با در نظر گرفتن اولویت‌ها و وزن‌های تعیین شده توسط تصمیم‌گیرنده است.

به این ترتیب، مسئله چندهدفه به یک مدل تک‌هدفه تبدیل می‌شود که تابع هدف آن، مجموع وزن‌های انحرافات از مقادیر آرمانی است. وزن‌های اختصاص داده شده بیانگر اهمیت نسبی هر هدف‌اند. نکته کلیدی در اینجا، تعیین انحراف نامطلوب بر اساس نوع هدف است؛ در اهداف کمینه‌سازی، انحراف مثبت نامطلوب است (افزایش هزینه)، در حالی که در اهداف بیشینه‌سازی، انحراف منفی (کاهش عملکرد) نامطلوب محسوب می‌شود. مدل پایه ریاضی برنامه‌ریزی آرمانی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I w_i (d_i^+ + d_i^-)$$

S.t:

$$f_i(x) - d_i^+ + d_i^- = g_i \quad i=1,2,...,I$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad i=1,2,...,I$$

$$x \in F \quad (25)$$

در این مدل، $(f_i(x))$ نمایانگر تابع هدف i ام و (g_i) سطح آرمانی متناظر با آن است و (d_i^+) و (d_i^-) به ترتیب میزان انحراف مثبت و منفی از این سطح را بیان می کنند. همچنین (w_i) وزن اهمیت هر هدف از دید تصمیم گیرنده می باشد و محدودیت $(X \in F)$ نشان دهنده کلیه محدودیت های عادی مسئله موردنظر می باشد که در این تحقیق در روابط (۳) تا (۲۲) قابل مشاهده است.

برنامه ریزی آرمانی چندگزینه ای

برنامه ریزی آرمانی چندگزینه ای به عنوان جایگزین انعطاف پذیرتری برای روش کلاسیک توسط (Chang, 2007) معرفی شده است. در این روش، به جای تعیین یک سطح آرمانی ثابت برای هر هدف، یک بازه آرمانی (یک کران بالا $(g_{i,max})$ و یک کران پایین $(g_{i,min})$) تعریف می شود. سپس مدل به دنبال کمینه کردن انحرافات از این بازه است.

در نسخه بازنگری شده (Chang, 2008)، سطح آرمانی (y_i) خود به عنوان یک متغیر پیوسته در نظر گرفته می شود که می تواند در بازه تعیین شده $(g_{i,min} \leq y_i \leq g_{i,max})$ توسط تصمیم گیرنده تغییر کند. بر اساس این اصلاحات، دو حالت برای توابع هدف قابل تعریف هستند: اگر تابع هدف از نوع بیشینه سازی باشد در محدودیت دوم $g_{i,max}$ و اگر از نوع کمینه سازی باشد، $g_{i,min}$ قرار داده می شود.

مدل ریاضی برنامه ریزی آرمانی چندگزینه ای به صورت زیر بیان می شود:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^I [w_i (d_i^+ + d_i^-) + \alpha_i (e_i^+ + e_i^-)]$$

S.t:

$$f_i(x) - d_i^+ + d_i^- = y_i \quad i=1,2,...,I$$

$$y_i - e_i^+ + e_i^- = g_{i,max} \quad i=1,2,...,I$$

$$g_{i,min} \leq y_i \leq g_{i,max} \quad i=1,2,...,I$$

$$d_i^+, d_i^-, e_i^+, e_i^- \geq 0 \quad i=1,2,...,I$$

$$X \in F \quad (26)$$

در این ساختار، (d_i^-) و (d_i^+) به ترتیب بیانگر انحراف مثبت و منفی از هدف i ام هستند و (e_i^+) و (e_i^-) بیانگر انحراف مثبت و منفی از سطح آرمانی محسوب (y_i) می شوند. همچنین، ضرایب ساده (α_i) و (w_i) برای کنترل اهمیت نسبی انحرافات آن در نظر گرفته می شوند. محدودیت $(X \in F)$ نشان دهنده کلیه محدودیت های عادی مسئله مورد نظر می باشد که در این تحقیق در روابط (۳) تا (۲۲) قابل مشاهده است.

مطالعه موردی و نتایج حل مدل

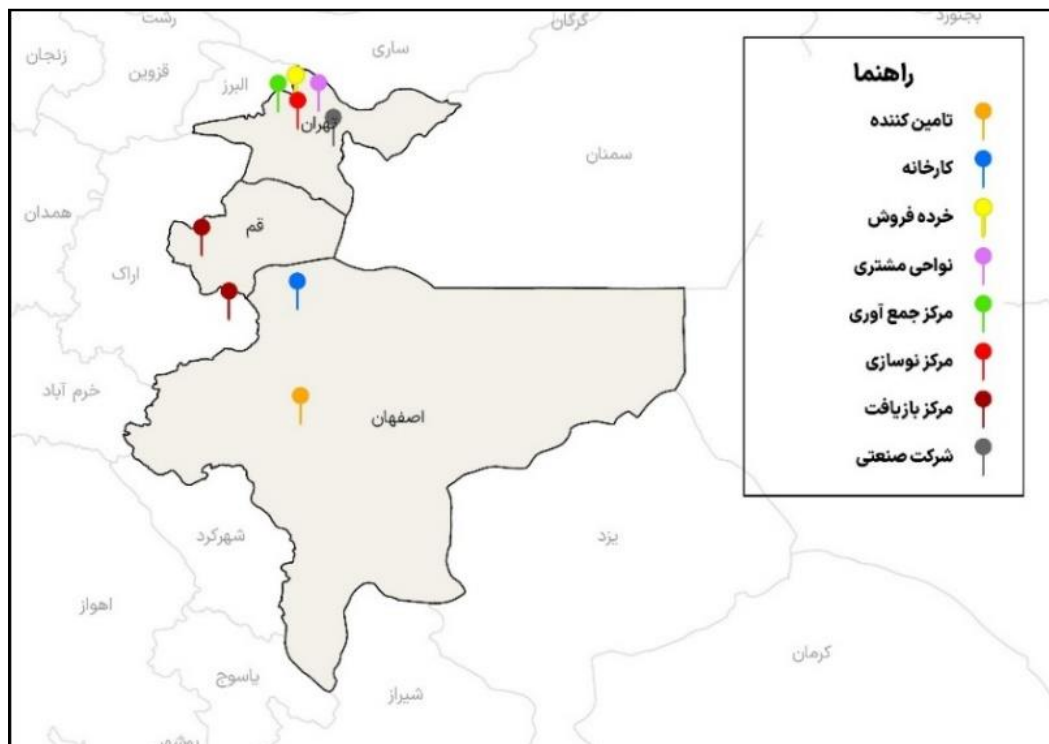
ایران با پیشینه غنی در تولید فرش، هم اکنون با گسترش تولید فرش های پلی استر با چالش مدیریت پایدار چرخه عمر این محصولات روبرو شده است. این مطالعه باهدف طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته در چهار شهر اصلی (اصفهان، تهران، قم، اراک) انجام شده است. مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش، با به کارگیری داده های ورودی توصیف شده و توسط حل کننده سیمپلکس در محیط نرم افزار گمز^۱ نسخه ۲۴،۱،۲ حل گردید. این مدل بر روی رایانه ای با پردازنده ۵-۱۲۳۵ Intel Core i U با سرعت ۱،۳۰ گیگاهرتز و حافظه دسترسی تصادفی ۸ گیگابایت اجرا شد و با شکاف ۰ در مدت زمان بسیار کوتاه ۰،۰۵ ثانیه به جواب بهینه دست یافت.

در مدل ارائه شده، دو تأمین کننده اصلی شامل پلی اکریل ایران و زر لیف آریا در اصفهان مستقر هستند که مواد اولیه را برای چهار کارخانه تولیدی واقع در شهرک های صنعتی قطب راوندی، هلال، سلیمان صباحی و امیرکبیر در کاشان و آران و بیدگل تأمین می کنند. محصولات تولیدی از کاشان و آران و بیدگل به شبکه توزیع تهران متشکل از شش خرده فروش اصلی شامل بازار بزرگ فرش، بازار فرش شوش، بازار فرش مولوی، بازار فرش ولیعصر، بازار فرش هفت تیر و بازار فرش شاه عباسی ارسال می گردند. این شبکه توزیع، دوازده ناحیه مشتری در مناطق مختلف شهری تهران شامل مناطق ۱۴، ۸، ۱۸، ۳، ۲۰، ۱۰، ۱۱، ۷، ۱۷، ۱۹، ۶ و ۱۶ را پوشش می دهد. در مرحله پس از مصرف، سیستم جمع آوری متشکل از پنج مرکز در مناطق ۱، ۲، ۴، ۵ و ۱۵ تهران، فرش های مستعمل را گردآوری نموده و پس از بررسی، محصولات واجد شرایط به پنج مرکز نوسازی در مناطق ۱۱ و ۱۲ تهران و محصولات باقی مانده به چهار مرکز بازیافت مستقر در شهرک های صنعتی سلفچگان و شکوهیه در قم، دلیجان در اراک انتقال می یابند. الیاف بازیافتی حاصل از فرایند بازیافت در مراکز قم و اراک، به چرخه تولید در کارخانه های

کاشان و آران و بیدگل بازگردانده شده و ضایعات نیز به سه شرکت صنعتی واقع در شهرک‌های صنعتی شمس آباد و عباس آباد تهران ارسال می‌شوند.

جداول مربوط به مقادیر پارامترهای مورد استفاده در پیوست الف ارائه شده است. شکل (۲) مکان تسهیلات در مطالعه موردی را با بهره‌گیری از نرم‌افزار جی‌آی‌اس^۱ نشان می‌دهد.

شکل ۲. مکان تسهیلات در مطالعه موردی



در گام نخست، هر یک از توابع هدف اقتصادی (Z_1)، زیست محیطی (Z_2) به طور جداگانه بهینه‌سازی شدند. مقادیر بهینه به دست آمده برای هر تابع هدف، به همراه حدود حداقل و حداکثر شاخص‌های مربوطه، در جدول (۲) ارائه شده است. این مقادیر مبنای تعیین سطوح آرمانی در رویکردهای برنامه‌ریزی چندهدفه قرار گرفته‌اند. در ادامه، مدل ریاضی توسعه یافته با استفاده از سه رویکرد حل شامل برنامه‌ریزی فازی (λ)، برنامه‌ریزی آرمانی ساده (GP) و برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای (MCGP)، حل شد. در رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی، سطوح آرمانی هر یک از توابع هدف بر اساس مقادیر ایده‌آل حاصل از جدول بازده تعیین گردید و به عنوان مقادیر مطلوب برای تصمیم گیرنده در نظر گرفته شد. همچنین، با

توجه به اهمیت هم‌زمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در چارچوب پایداری، وزن‌های این اهداف به‌صورت برابر و معادل ۵۰ درصد با در نظر گرفتن میزان بزرگی مقادیر هر هدف در نظر گرفته شدند تا تعادل مناسبی میان آن‌ها برقرار گردد. نتایج عددی به‌دست آمده از هریک از این رویکردها به‌صورت خلاصه در جدول (۳) گزارش شده است.

جدول ۲. نتایج جدول بازده

توابع هدف	اقتصادی	زیست‌محیطی
اقتصادی	$۷,۷۷۸۳۴E+۱۴$	۵۴۲۱۴
زیست‌محیطی	$۷,۵۶۵۸۶۴E+۱۴$	۴۵۷۱۷۷
MAX	$۷,۵۶۵۸۶۴E+۱۴$	۴۵۷۱۷۷
MIN	$۷,۷۷۸۳۴E+۱۴$	۵۴۲۱۴

جدول ۳. جزییات نتایج حاصل از روش‌های حل

توابع هدف	λ	GP	MCGP
اقتصادی	$۴,۱۰۵۰۹E+۱۴$	$۸,۲۲۲۳۶E+۱۳$	$۸,۱۹۰۲۳E+۱۳$
زیست‌محیطی	۲۵۹۶۵۸	۵۴۴۳۷	۵۴۲۱۴
روش حل	۰,۵۰۹۸	۰,۵۰۳۰	۰,۳۰۴۲

تحلیل نتایج حاصل از حل مسئله نشان می‌دهد که هر یک از رویکردهای حل، رفتار متفاوتی در مواجهه با اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی دارند. بر اساس جدول (۳)، روش برنامه‌ریزی فازی (λ) بیشترین مقدار را برای شاخص زیست‌محیطی را ارائه می‌دهد که بیانگر توانایی این روش در ایجاد تعادل میان اهداف متعارض است. در مقابل، روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی ساده (GP) و چندگزینه‌ای (MCGP) با تمرکز بیشتر بر حداقل‌سازی انحرافات از سطوح آرمانی، منجر به کاهش قابل توجه هزینه‌های کل شبکه شده‌اند، اما درعین حال عملکرد زیست‌محیطی پایین‌تری نسبت به روش فازی دارند.

این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب روش حل، تأثیر مستقیمی بر ساختار تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین دارد؛ به گونه‌ای که اگر هدف اصلی تصمیم‌گیر، دستیابی به پایداری زیست‌محیطی باشد، استفاده از رویکرد فازی گزینه مناسب‌تری خواهد بود، درحالی‌که در شرایط محدودیت‌های اقتصادی، روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی می‌توانند انتخاب بهینه‌تری محسوب شوند.

تحلیل حساسیت

به منظور سنجش پایداری ساختاری و قابلیت اتکای نتایج مدل، تحلیل حساسیت جامعی بر روی چهار پارامتر کلیدی GP_{pct} ، CE_{et} ، B_{pI} ، GV_{pc} انجام شده است. در این تحلیل، اثر تغییرات هم‌زمان این پارامترها بر خروجی‌های مدل با استفاده از سه رویکرد حل شامل برنامه‌ریزی فازی، برنامه‌ریزی آرمانی ساده و برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌ها در چارچوب بیشینه‌سازی (λ) و کمینه‌سازی انحرافات (GP/MCGP) صورت گرفته است.

تحلیل حساسیت پارامتر DP_{pct}

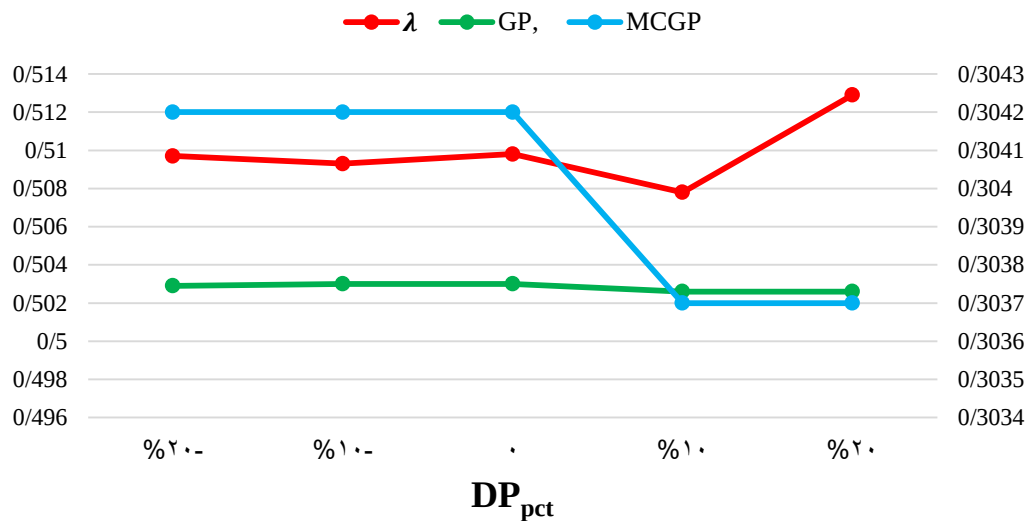
بررسی حساسیت پارامتر DP_{pct} نشان می‌دهد که مسیر تغییرات در روش λ ساختاری غیرخطی و غیریکنواخت دارد؛ به گونه‌ای که خروجی ابتدا تا حوالی نقطه مبنا افزایش می‌یابد، در ادامه دامنه کاهش را تجربه می‌کند و در انتهای بازه مجدداً نشانه‌های بهبود بروز می‌دهد. در مقابل، مسیر GP پس از یک جابه‌جایی محدود در ابتدای دامنه، به سمت وضعیت همگرا و کم‌نوسان میل می‌کند؛ درحالی‌که MCGP با یک افت اولیه، در تراز پایین‌تر و پایدارتر تثبیت می‌شود.

جدول ۴. نتایج تحلیل حساسیت پارامتر DP_{pct}

توابع هدف		λ	GP	MCGP
-۲۰٪	اقتصادی	4.02726E+14	6.65142E+13	6.62571E+13
	زیست‌محیطی	254271	43550	43371
	روش حل	0.5097	0.5029	0.3042
-۱۰٪	اقتصادی	4.07335E+14	7.43689E+13	7.40797E+13
	زیست‌محیطی	256775	48993	48792
	روش حل	0.5093	0.5030	0.3042
۰	اقتصادی	4.10509E+14	8.22236E+13	8.19023E+13
	زیست‌محیطی	259658	54437	54214
	روش حل	0.5098	0.5030	0.3042
+۱۰٪	اقتصادی	4.15918E+14	9.00783E+13	8.97249E+13
	زیست‌محیطی	261492	59881	59635
	روش حل	0.5078	0.5026	0.3037
+۲۰٪	اقتصادی	4.17133E+14	9.79331E+13	9.75475E+13

توابع هدف	λ	GP	MCGP
زیست محیطی	266188	65325	65056
روش حل	0.5129	0.5026	0.3037

شکل ۳. مقایسه و تحلیل عملکرد روش های حل در برابر تغییرات پارامتر DP_{pct}



تحلیل حساسیت پارامتر CE_{et}

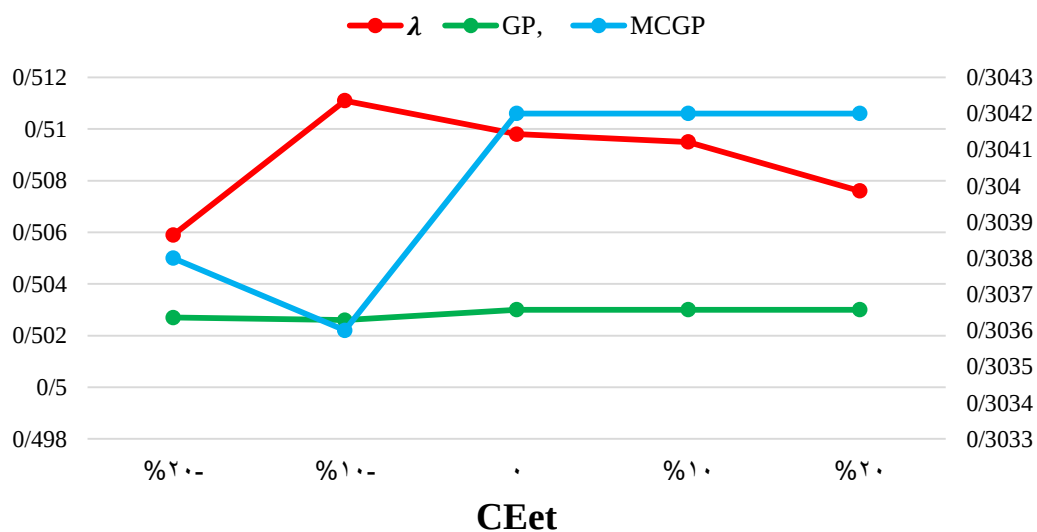
نتایج مربوط به CE_{et} حاکی از آن است که منحنی روش λ ساختاری قله دار دارد؛ یعنی در بخش آغازین دامنه روندی صعودی مشاهده می شود، سپس پس از دستیابی به مقدار اوج، با ادامه تغییرات پارامتر، نزول تدریجی غالب می شود. این رفتار می تواند بیانگر آن باشد که در سطحی از ظرفیت، شبکه به ترکیب بهینه ای از جریان های بازگشتی و تخصیص به نوسازی یا بازیافت می رسد و افزایش بیشتر ظرفیت الزاماً موجب بهبود هم زمان اهداف نمی شود. در سوی دیگر، پاسخ های GP و MCGP از منظر تغییرپذیری، هموارتر بوده و پس از گذار اولیه، نوسان اندکی نشان می دهند.

جدول ۵. نتایج تحلیل حساسیت پارامتر CE_{et}

توابع هدف	λ	GP	MCGP
اقتصادی	3.95226E+14	8.22237E+13	8.19024E+13
زیست محیطی	246560	54437	54214
روش حل	0.5059	۰٫۵۰۲۷	0.3038
اقتصادی	4.10330E+14	8.22236E+13	8.19023E+13

توابع هدف		λ	GP	MCGP
	زیست محیطی	260159	54437	54214
	روش حل	0.5111	0.5026	0.3036
	اقتصادی	4.10509E+14	8.22236E+13	8.19023E+13
۰	زیست محیطی	259658	54437	54214
	روش حل	0.5098	0.5030	0.3042
	اقتصادی	4.11771E+14	8.22236E+13	8.19023E+13
+٪۱۰	زیست محیطی	۲۵۹۵۲۳	54437	54214
	روش حل	0.5095	0.5030	۰,۳۰۴۲
	اقتصادی	4.12207E+14	8.22236E+13	8.19023E+13
+٪۲۰	زیست محیطی	۲۵۸۷۵۶	54437	54214
	روش حل	0.5076	0.5030	۰,۳۰۴۲

شکل ۴. مقایسه و تحلیل عملکرد روش های حل در برابر تغییرات پارامتر CEet



تحلیل حساسیت پارامتر B_{PI}

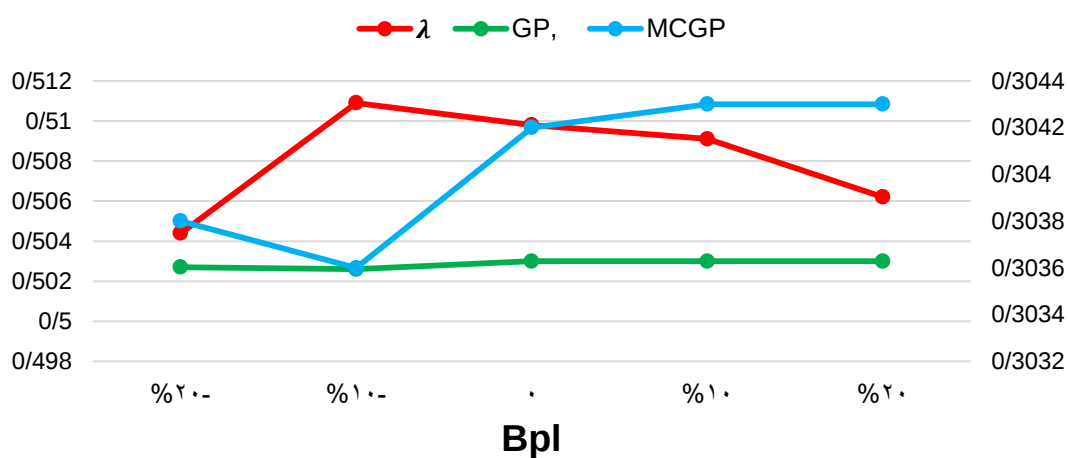
برای پارامتر B_{PI} ، رفتار روش λ را می توان به عنوان یک الگوی اوج میانی تبیین کرد: خروجی ابتدا تقویت شده و پس از رسیدن به بیشینه، وارد فاز کاهشی می شود. این روند نشان می دهد افزایش سهم نوسازی لزوماً به معنی بهبود هم زمان اهداف نیست؛ زیرا هرچه B_{PI} بزرگ تر شود، فشار بیشتری بر ظرفیت مراکز نوسازی و همچنین هزینه های حمل و نقل یا نوسازی وارد شده و ممکن است کارایی کلی شبکه را

کاهش دهد. در مقابل، GP و MCGP تغییرات محدود و پایدارتر دارند که نشان‌دهنده انعطاف کمتر (اما ثبات بیشتر) در پاسخ به تغییر سیاست تفکیک بین نوسازی و بازیافت است.

جدول ۶. نتایج تحلیل حساسیت پارامتر B_{pl}

توابع هدف		λ	GP	MCGP
-۲۰٪	اقتصادی	4.10612E+14	9.41285E+13	9.38651E+13
	زیست محیطی	261102	64739	64554
	روش حل	0.5044	۰.5027	0.3038
-۱۰٪	اقتصادی	4.18045E+14	8.75372E+13	8.74556E+13
	زیست محیطی	267745	۵9090	59033
	روش حل	0.5109	۰.5026	۰.3036
۰	اقتصادی	4.10509E+14	8.22236E+13	8.19023E+13
	زیست محیطی	259658	54437	54214
	روش حل	0.5098	0.5030	0.3042
+۱۰٪	اقتصادی	4.05293E+14	7.71923E+13	7.69987E+13
	زیست محیطی	251777	50062	49928
	روش حل	0.5091	۰.5030	0.3043
+۲۰٪	اقتصادی	3.99918E+14	7.29535E+13	7.26717E+13
	زیست محیطی	243129	46320	46113
	روش حل	0.5062	۰.5030	۰.3043

شکل ۵. مقایسه و تحلیل عملکرد روش‌های حل در برابر تغییرات پارامتر B_{pl}



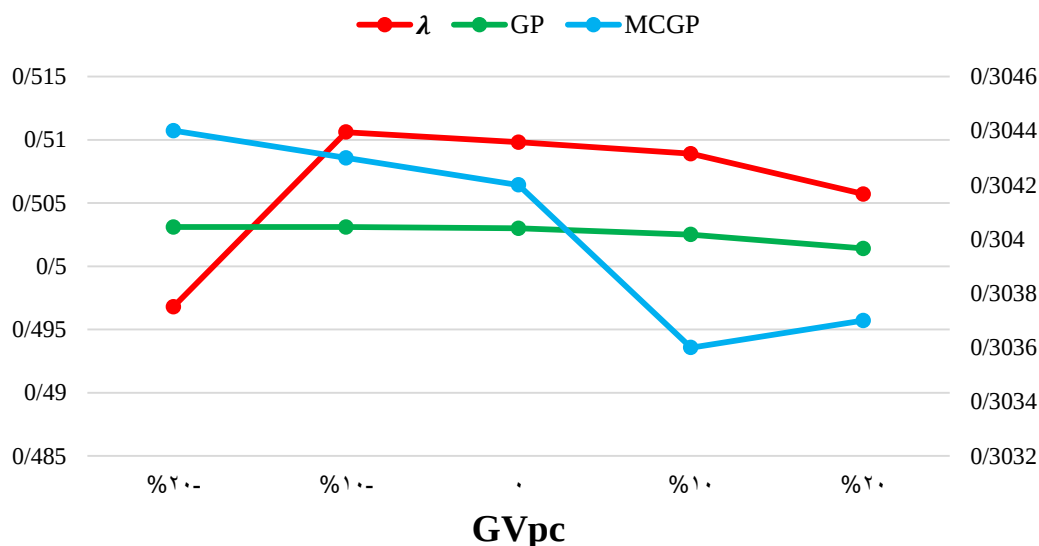
تحلیل حساسیت پارامتر GV_{pc}

تحلیل حساسیت GV_{pc} نشان می‌دهد پاسخ روش λ دارای روند افزایشی - کاهشی است: در ابتدا رشد خروجی مشاهده می‌شود، اما پس از عبور از نقطه اوج، با افزایش بیشتر پارامتر، افت تدریجی رخ می‌دهد. این الگو نشان می‌دهد که افزایش بازگشت تا حدی به بهبود عملکرد کمک می‌کند، اما پس از آن احتمالاً هزینه‌های جمع‌آوری یا انتقال و محدودیت ظرفیت مراکز پایین‌دستی باعث می‌شود افزایش بازگشت به بار اضافی برای شبکه تبدیل شود. در مقابل، GP و MCGP پس از مرحله گذار، به سمت رفتاری نسبتاً پایدار حرکت می‌کنند و در کل دامنه در سطوح پایین‌تری نسبت به λ باقی می‌مانند.

جدول ۷. نتایج تحلیل حساسیت پارامتر GV_{pc}

توابع هدف	λ	GP	MCGP
-۲۰٪	اقتصادی	4.14314E+14	9.01508E+13
	زیست‌محیطی	247925	58924
	روش حل	0.4968	0.3044
-۱۰٪	اقتصادی	4.07558E+14	8.55465E+13
	زیست‌محیطی	256401	56343
	روش حل	۰.5106	0.3043
۰	اقتصادی	4.10509E+14	8.19023E+13
	زیست‌محیطی	259658	54214
	روش حل	0.5098	0.3042
+۱۰٪	اقتصادی	4.14373E+14	7.89363E+13
	زیست‌محیطی	۲63222	52553
	روش حل	0.5089	0.3036
+۲۰٪	اقتصادی	4.03344E+14	7.73985E+13
	زیست‌محیطی	254581	51967
	روش حل	۰.5057	0.3037

شکل ۶. مقایسه و تحلیل عملکرد روش‌های حل در برابر تغییرات پارامتر GVpc



بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه، چندمحصولی، چند دوره‌ای و چندسطحی، چارچوبی جامع برای طراحی و مدیریت شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار در صنعت فرش پلی‌استر ایران فراهم کرده است. مدل پیشنهادی با یکپارچه‌سازی جریان‌های مستقیم و معکوس و در نظر گرفتن هم‌زمان ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی پایداری، امکان اتخاذ تصمیم‌های راهبردی مبتنی بر واقعیت‌های صنعتی را فراهم می‌سازد. نتایج حاصل از مطالعه موردی و حل مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی قادر است ضمن کاهش هزینه‌های کل شبکه، عملکرد زیست‌محیطی سیستم را از طریق افزایش مطلوبیت استفاده از مواد دوستدار محیط‌زیست در کارخانه‌ها و مراکز بازیافت و به‌کارگیری فناوری‌های پاک در فرایند بازیافت بهبود بخشد.

این نتایج بیانگر آن است که ادغام سیاست‌های زیست‌محیطی در طراحی زنجیره تأمین نه تنها مانعی برای دستیابی به اهداف اقتصادی نیست، بلکه می‌تواند به بهبود هم‌زمان کارایی اقتصادی و پایداری منجر شود.

از نوآوری‌های کلیدی این پژوهش می‌توان به توسعه ساختار زنجیره تأمین فرش پلی‌استر با در نظر گرفتن عناصر خرده‌فروشی، مراکز نوسازی و شرکت‌های صنعتی برای کشور ایران اشاره کرد. همچنین

توسعه مدل ریاضی دو هدفه با اهداف زیست محیطی و هزینه برای این ساختار صورت گرفته است و نهایتاً با جمع آوری داده‌های لازم، مدل یادشده در صنعت فرش پلی‌استر ایران پیاده‌سازی شده است. شایان‌ذکر است که چارچوب مبنای این پژوهش، پیش‌تر در زمینه زنجیره تأمین فرش نایلونی و در خارج از ایران توسعه یافته و در این مطالعه، با بومی‌سازی و انطباق با شرایط داخلی، مورد بهره‌برداری و گسترش قرار گرفته است. با این حال، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نظیر نبود زیرساخت‌های عملیاتی کافی برای مراکز جمع‌آوری و بازیافت، دشواری دسترسی به برخی داده‌های واقعی و نیاز به تخمین آن‌ها و کمبود مطالعات پیشین در صنعت فرش ایران مواجه است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از حل مدل و تحلیل‌های انجام‌شده، می‌توان نشان داد که توسعه مراکز جمع‌آوری در نواحی با حجم تقاضای بالا، نقش مؤثری در افزایش نرخ بازگشت محصولات و بهبود کارایی جریان معکوس دارد. همچنین، با توجه به تأثیر قابل توجه فرآیند نوسازی در کاهش هزینه‌های کل و بهبود عملکرد زیست محیطی، پیشنهاد می‌شود تولیدکنندگان و سیاست‌گذاران، زیرساخت‌های لازم برای توسعه مراکز نوسازی را تقویت نمایند. از سوی دیگر، استفاده از مواد بازیافتی در فرآیند تولید می‌تواند ضمن کاهش وابستگی به مواد اولیه، به بهبود شاخص‌های زیست محیطی منجر شود.

در کنار این موارد، در جهت توسعه پژوهش‌های آتی، می‌توان عدم قطعیت پارامترهای کلیدی نظیر قیمت مواد اولیه، نرخ بازگشت محصولات مستعمل و نوسانات تقاضا را با بهره‌گیری از رویکردهای فازی و تصادفی در مدل لحاظ کرد. علاوه بر این، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی برای حل مسائل بزرگ مقیاس، محاسبه ردپای کربن در مراحل مختلف تولید و بازیافت و افزودن بعد اجتماعی پایداری با شاخص‌هایی نظیر ایجاد اشتغال در مراکز جمع‌آوری و بازیافت، می‌تواند به افزایش کارایی و کاربردپذیری مدل در صنعت فرش ایران منجر شود.

تعارض منافع

نویسندگان مقاله هیچ گونه تعارض منافی ندارند.

ORCID

Mehdi Seifbarghy



<http://orcid.org/0000-0002-0772-4509>

Shaghayegh Zangeneh



<http://orcid.org/0009-0009-1672-8198>

پیوست الف

در این بخش، مقادیر پارامترهای مدل که در بخش سوم معرفی شدند، به طور کامل و با جزئیات ارائه می گردند. جدول (۸) مقادیر عددی برخی از پارامترهای کلیدی مدل را نشان می دهد. در جدول (۹) وزن هریک از محصولات p (فرش های ۶،۹،۱۲ متری ۷۰۰ شانه با تراکم ۳۰۰۰) بر حسب تن ارائه شده است. جدول های (۱۰) تا (۲۷)، فواصل و هزینه حمل و نقل بین تسهیلات مرتبط با یکدیگر را ارائه می دهند. مسافت بین مراکز مختلف در زنجیره تأمین بر اساس فاصله مستقیم بین آنها محاسبه شده است و هزینه حمل و نقل بین تسهیلات مختلف بر اساس مقدار محصول جابه جاشده و مسافت طی شده محاسبه می شود. وسیله نقلیه اصلی برای انجام جابه جایی ها، کامیون جفت در نظر گرفته شده است که ظرفیت حمل بار آن در محدوده ۱۵ تا ۲۰ تن تعریف شده است. نرخ پایه حمل و نقل ۱۸، ۰۰۰ تومان به ازای هر تن - کیلومتر بوده و برای مسافت های کمتر از ۲۰۰ کیلومتر، مبلغ ثابت ۳، ۰۰۰، ۰۰۰ تومان به عنوان تعرفه اضافی (بر اساس تعرفه باربری ۱۴۰۳) در نظر گرفته می شود.

جدول ۸. مقادیر مربوط به پارامترهای مدل

پارامتر	مقدار پارامتر	پارامتر	مقدار پارامتر	پارامتر	مقدار پارامتر
CSst	۹۰۰۰ تن	FFf	۹۰۰ میلیارد	GVpc	٪۳۰
CFpft	۹۰۰۰ تن	FUu	۸۰ میلیارد	GHp	٪۹۰
CUput	۵۰۰۰ تن	FLI	۵۰ میلیارد	Bpl	٪۶۰
CLplt	۷۲۰۰ تن	FEE	۶۰۰ میلیارد	Mpft	۰،۷
CEet	۴۶۰۰ تن	DPpct	۱۰۰۰ تن	Npet	۱

جدول ۹. مقادیر مربوط به وزن محصولات

وزن محصول	محصول
۰،۰۲۱۶	P1
۰،۰۳۱۴	P2
۰،۰۴۳۲	P3

جدول ۱۰. فاصله بین تأمین کنندگان و کارخانه ها

D(S,F)	F1	F2	F3	F4
S1	258	253	233	250
S2	183	178	158	175

طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت نساجی؛ سیف برقی و زنگنه | ۳۳

جدول ۱۱. هزینه حمل و نقل بین تأمین کنندگان و کارخانه‌ها

C(S,F)	F1	F2	F3	F4
S1	4,644,000	4,554,000	4,194,000	4,500,000
S2	6,294,000	6,204,000	5,844,000	6,150,000

جدول ۱۲. فاصله بین کارخانه‌ها و خرده‌فروش‌ها

D(F,R)	R1	R2	R3	R4	R5	R6
F1	235	234	241	249	241	237
F2	248	247	254	261	254	250
F3	266	264	272	279	272	268
F4	248	247	254	262	254	251

جدول ۱۳. هزینه حمل و نقل بین کارخانه‌ها و خرده‌فروش‌ها

C(F,R)	R1	R2	R3	R4	R5	R6
F1	4,230,000	4,212,000	4,338,000	4,482,000	4,338,000	4,266,000
F2	4,464,000	4,446,000	4,572,000	4,698,000	4,572,000	4,500,000
F3	4,788,000	4,752,000	4,896,000	5,022,000	4,896,000	4,824,000
F4	4,464,000	4,446,000	4,572,000	4,716,000	4,572,000	4,518,000

جدول ۱۴. فاصله بین خرده‌فروش‌ها و نواحی مشتری

D(R,C)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
R1	10	15	19	9.6	13	4.5	5.2	9.9	14	9.4	6.4	8.3
R2	9.8	15	21	6.9	19	7.9	8.6	13	10	6	10	4.5
R3	8.6	11	15	16	9.5	2.8	2	6.4	13	11	2.1	12
R4	19	18	28	26	6.9	17	16	12	25	23	14	23
R5	9.8	7.4	19	15	6	6.7	5.9	2.1	11	14	3	13
R6	6.1	8.2	16	20	8.5	3.6	2.7	5.6	10	11	2.7	9.4

جدول ۱۵. هزینه حمل و نقل بین خرده‌فروش‌ها و نواحی مشتری

C(R,C)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
R1	3,180,000	3,270,000	3,342,000	3,172,800	3,234,000	3,081,000	3,093,600	3,178,200	3,252,000	3,169,200	3,115,200	3,149,400
R2	3,176,400	3,270,000	3,378,000	3,124,200	3,342,000	3,142,200	3,154,800	3,234,000	3,180,000	3,108,000	3,180,000	3,081,000
R3	3,154,800	3,198,000	3,270,000	3,288,000	3,171,000	3,050,400	3,036,000	3,115,200	3,234,000	3,198,000	3,037,800	3,216,000

C(R, C)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
R4	3,342,000	3,324,000	3,504,000	3,468,000	3,124,200	3,306,000	3,288,000	3,216,000	3,450,000	3,414,000	3,252,000	3,414,000
R5	3,176,400	3,133,200	3,342,000	3,270,000	3,108,000	3,120,600	3,106,200	3,037,800	3,198,000	3,252,000	3,054,000	3,234,000
R6	3,109,800	3,147,600	3,288,000	3,360,000	3,153,000	3,064,800	3,048,600	3,100,800	3,180,000	3,198,000	3,048,600	3,169,200

جدول ۱۶. فاصله بین نواحی مشتری و مراکز جمع‌آوری

D(C,L)	L1	L2	L3	L4	L5
C1	۳۲	18	9.9	21	6.4
C2	24	18	4.1	22	15
C3	53	9.1	35	11	13
C4	41	24	23	26	13
C5	28	12	12	17	14
C6	37	6.9	15	10	8.7
C7	36	6.3	14	9.5	8.9
C8	29	10	7.4	15	10
C9	27	22	12	32	7.9
C10	45	16	24	18	9.3
C11	36	7.8	13	12	9.2
C12	41	14	21	16	6.7

جدول ۱۷. هزینه حمل‌ونقل بین نواحی مشتری و مراکز جمع‌آوری

C(C,L)	L1	L2	L3	L4	L5
C1	3,576,000	3,324,000	3,178,200	3,378,000	3,115,200
C2	3,432,000	3,324,000	3,073,800	3,396,000	3,270,000
C3	3,954,000	3,163,800	3,630,000	3,198,000	3,234,000
C4	3,738,000	3,432,000	3,414,000	3,468,000	3,234,000
C5	3,504,000	3,216,000	3,216,000	3,306,000	3,252,000
C6	3,666,000	3,124,200	3,270,000	3,180,000	3,156,600
C7	3,648,000	3,113,400	3,252,000	3,171,000	3,160,200
C8	3,522,000	3,180,000	3,133,200	3,270,000	3,180,000
C9	3,486,000	3,396,000	3,216,000	3,576,000	3,142,200
C10	3,810,000	3,288,000	3,432,000	3,324,000	3,167,400
C11	3,648,000	3,140,400	3,234,000	3,216,000	3,165,600
C12	3,738,000	3,252,000	3,378,000	3,288,000	3,120,600

طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت نساجی؛ سیف برقی و زنگنه | ۳۵

جدول ۱۸. فاصله بین مراکز جمع‌آوری و مراکز نوسازی

D(L,U)	U1	U2	U3	U4	U5
L1	34	34	39	42	37
L2	12	12	15	11	10
L3	12	12	17	19	15
L4	15	15	16	13	11
L5	3.7	3.7	3.9	6.7	9

جدول ۱۹. هزینه حمل‌ونقل بین مراکز جمع‌آوری و مراکز نوسازی

C(L,U)	U1	U2	U3	U4	U5
L1	3,612,000	3,612,000	3,702,000	3,756,000	3,666,000
L2	3,216,000	3,216,000	3,270,000	3,198,000	3,180,000
L3	3,216,000	3,216,000	3,306,000	3,342,000	3,270,000
L4	3,270,000	3,270,000	3,288,000	3,234,000	3,198,000
L5	3,066,600	3,066,600	3,070,200	3,120,600	3,162,000

جدول ۲۰. فاصله بین مراکز نوسازی و خرده‌فروش‌ها

D(U,R)	R1	R2	R3	R4	R5	R6
U1	۱/۴	3.7	1	20	8.9	3.6
U2	1.4	3.7	1	20	8.9	3.6
U3	3.5	2.8	5.7	19	10	7.2
U4	4.3	5.6	8.5	20	9.3	6.5
U5	4.7	7.7	6.1	18	7.2	4.3

جدول ۲۱. هزینه حمل‌ونقل بین مراکز نوسازی و خرده‌فروش‌ها

C(U,R)	R1	R2	R3	R4	R5	R6
U1	3,066,600	3,018,000	3,360,000	3,160,200	3,160,200	3,064,800
U2	3,066,600	3,018,000	3,360,000	3,160,200	3,160,200	3,064,800
U3	3,050,400	3,102,600	3,342,000	3,180,000	3,180,000	3,129,600
U4	3,100,800	3,153,000	3,360,000	3,167,400	3,167,400	3,117,000
U5	3,138,600	3,109,800	3,324,000	3,129,600	3,129,600	3,077,400

جدول ۲۲. فاصله بین مراکز جمع‌آوری و مراکز بازیافت

D(L,E)	E1	E2	E3	E4
L1	224	160	279	160
L2	195	131	250	131
L3	206	142	263	142
L4	197	133	251	133
L5	193	129	247	129

جدول ۲۳. هزینه حمل و نقل بین مراکز جمع آوری و مراکز بازیافت

C(L,E)	E1	E2	E3	E4
L1	4,032,000	5,880,000	5,022,000	5,880,000
L2	6,510,000	5,358,000	4,500,000	5,358,000
L3	3,708,000	5,556,000	4,734,000	5,556,000
L4	6,546,000	5,394,000	4,518,000	5,394,000
L5	6,474,000	5,322,000	4,446,000	5,322,000

جدول ۲۴. فاصله بین مراکز بازیافت و شرکت های صنعتی

D(E,A)	A1	A2	A3
E1	152	193	196
E2	88	129	160
E3	209	250	244
E4	88	129	161

جدول ۲۵. هزینه حمل و نقل بین مراکز بازیافت و شرکت های صنعتی

C(E,A)	A1	A2	A3
E1	5,736,000	6,474,000	3,528,000
E2	4,584,000	5,322,000	5,880,000
E3	3,762,000	4,500,000	4,392,000
E4	4,584,000	5,322,000	5,898,000

جدول ۲۶. فاصله بین مراکز بازیافت و کارخانه ها

D(E,F)	F1	F2	F3	F4
E1	154	157	185	167
E2	115	128	146	129
E3	75	88	96	88
E4	116	128	146	129

جدول ۲۷. هزینه حمل و نقل بین مراکز بازیافت و کارخانه ها

C(E,F)	F1	F2	F3	F4
E1	5,772,000	5,826,000	6,330,000	6,006,000
E2	5,070,000	5,304,000	5,628,000	5,322,000
E3	4,350,000	4,584,000	4,728,000	4,584,000
E4	5,088,000	5,304,000	5,628,000	5,322,000

منابع

۱. شومان، د.؛ هاینز - دیتز، ک.؛ تیلز، د. اولریش. (۱۳۸۶). کارخانه‌های تولید پلی‌استر: اصول فرایند و تکنولوژی تولید (شاهین کاظمی و سپهدار انصاری نیک، مترجمان). تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی امیرکبیر.
۲. عیوض‌زاده، الهه. (۱۳۹۲). گزارش وضعیت الیاف پلی‌استر در ایران و جهان. ایرانیکو.
۳. نوری، م. (۱۴۰۲). ساختمان شیمیایی و فیزیکی الیاف نساجی. تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی امیرکبیر.

References

1. Abbas, A., Jamshaid, H., & Munir, R. (2025). Thermal liners engineering using carpet industry's 100% waste wool and acrylic fibers; A sustainable life cycle with energy preservation. *Journal of Thermal Science and Engineering Progress*, 59, 103256. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103256>
2. Abdelwahab, M. A., Chang, B. P., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2022). Waste valorization in sustainable engineering materials: Reactive processing of recycled carpets waste with polyamide 6. *Journal of Polymer Testing*, 114, 107681. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107681>
3. Adenle, Y. A., Haideri, S., & Sandouka, I. (2024). Understanding the best practices of cradle to cradle in furnishings, carpet, and textile industries—A case studies analysis and conceptual model. *Journal of Cleaner and Circular Bioeconomy*, 8, 100088. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100088>
4. Azarfam, M. Y., Maheshwari, A., Blum, F. D., Chaudhari, S., Switzer, C., Vaidyanathan, R., ... & Bandla, S. (2024). Recycled carpet-reinforced composites from post-consumer polypropylene carpet and recycled HDPE resin. *Journal of Resources, Conservation and Recyclin.* <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107298>
5. Bacon, F. C., Holland, W. R., & Holland, L. H. (1999). U.S. Patent No. 5,897,066. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
6. Biehl, M., Prater, E., & Realff, M. J. (2007). Assessing performance and uncertainty in developing carpet reverse logistics systems. *Journal of Computers & Operations Research*, 34(2), 443-463. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.008>
7. Brent, R. L. (2004). Environmental causes of human congenital malformations: the pediatrician's role in dealing with these complex clinical problems caused by a multiplicity of environmental and genetic factors. *Pediatrics*, 113(Supplement_3), 957-968. <https://doi.org/10.1542/peds.113.S3.957>
8. Bucci, M. J. (2009). Solution procedures for logistic network design models with economies of scale. North Carolina State University.
9. Bucci, M. J., Woolard, R., Joines, J., Thoney, K., & King, R. E. (2014). Incorporating economies of scale into facility location problems in carpet recycling. *Journal of The Textile Institute*, 105(12), 1300-1311. <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.890833>

10. Butar Butar, M., Sanders, D., & Frei, R. (2016). Measuring performance of reverse supply chains in a carpet manufacturer. *Journal of Advanced Management Science*, 4(2), 152-158. <https://doi.org/10.12720/joams.4.2.152-158>
11. Chang, C. T. (2007). Multi-choice goal programming. *Journal of Omega*, 35(4), 389-396. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.07.009>
12. Charnes, A., & Cooper, W. W. (1957). Management models and industrial applications of linear programming. *Management science*, 4(1), 38-91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1.2.138>
13. Chaudhuri, S. K. (2018). Structure and properties of carpet fibres and yarns. *Journal of Advances in carpet manufacture* (pp. 17-34). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101131-7.00002-2>
14. Choi, T. (2017). Environmental impact of voluntary extended producer responsibility: The case of carpet recycling. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 127, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.020>
15. Chou, S. Y., & Chang, Y. H. (2008). A decision support system for supplier selection based on a strategy-aligned fuzzy SMART approach. *Journal of Expert Systems with Applications*, 34(4), 2241-2253. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.03.001>
16. Cline, A., LeMay, S., & Helms, M. M. (2015). A framework for reverse logistics: the case of post-consumer carpet in the US. *Journal of Commerce and Management*, 25(4), 466-489. <https://doi.org/10.1108/ijcoma-02-2013-0013>
17. Cunningham, P. R., & Miller, S. A. (2022). A material flow analysis of carpet in the United States: Where should the carpet go?. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133243>
18. Deschamps, M. (1998). U.S. Patent No. 5,829,690. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
19. Hawn, K. (۲۰۰۱). An overview of commercial recycling technologies and textile applications for the products. Presentation at the ۹th Annual Conference on Recycling of Polymer, *Journal of Textile and Carpet Waste*, Dalton, GA, April ۲۰–May ۱.
20. El-Hadidy, A. M. A. (2001). Structure of New Types of Filter Bags out of Textile Waste. *Journal of MEJ-Mansoura Engineering*, 15(2), 97-110.
21. Franco, A., Marchetti, P. A., Méndez, C. A., & Zeballos, L. J. (2023). Supply chain design and planning for the carpet industry considering recycling processes. *Journal of Computers & Chemical Engineering*, 179, 108456. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108456>
22. Ghanbarzadeh-Shams, M., Yaghin, R. G., & Sadeghi, A. H. (2022). A hybrid fuzzy multi-objective model for carpet production planning with reverse logistics under uncertainty. *Journal of Socio-Economic Planning Sciences*, 83, 101344. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101344>
23. Helms, M. M., & Hervani, A. A. (2006). Reverse logistics for recycling: challenges facing the carpet industry. *Journal of In Greening the supply chain* (pp. 117-

- 135).https://doi.org/10.1007/1-84628-299-3_7
24. Ishikawa, S. (2007). Raw Materials-High efficiency and long on-stream life polymer filters. *Journal of Chemical Fibers International*, 57(1), 26.
25. Jain, A., Pandey, G., Singh, A. K., Rajagopalan, V., Vaidyanathan, R., & Singh, R. P. (2012). Fabrication of structural composites from waste carpet. *Journal of Advances in Polymer Technology*, 31(4), 380-389. <https://doi.org/10.1002/adv.20261>
26. Jessieleena, A., Rathinavelu, S., Velmaiel, K. E., John, A. A., & Nambi, I. M. (2023). Residential houses—a major point source of microplastic pollution: insights on the various sources, their transport, transformation, and toxicity behaviour. *Journal of Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26918-1>
27. Louwers, D., Kip, B. J., Peters, E., Souren, F., & Flapper, S. D. P. (1999). A facility location allocation model for reusing carpet materials. *Journal of Computers & industrial engineering*, 36(4), 855-869. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00168-0](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00168-0)
28. Lu, D., Overcash, M., & Realff, M. J. (2011). A mathematical programming tool for LCI-based product design and case study for a carpet product. *Journal of Cleaner Production*, 19(12), 1347-1355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.004>
29. McNeil, S. J., Sunderland, M. R., & Zaitseva, L. I. (2007). Closed-loop wool carpet recycling. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 51(1), 220-224. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.09.006>
30. MirafTAB, M., Horrocks, R., & Woods, C. (1999). Carpet waste, an expensive luxury we must do without!. *Journal of Woodhead Publishing Series in Textiles*, 1(1), 1-7. <https://doi.org/10.1533/9780857092991.3.173>
31. MirafTAB, M. (2018). Recycling carpet materials. *Journal of Advances in Carpet Manufacture* (pp. 65-77). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101131-7.00005-8>
32. Murray, J. J., Frost, J. D., & Wang, Y. (2000). Behavior of a sandy silt reinforced with discontinuous recycled fiber inclusions. *Journal of Transportation research record*, 1714(1), 9-17. <https://doi.org/10.3141/1714-02>
33. Realff, M. J., Ammons, J. C., & Newton, D. (1999). Carpet recycling: determining the reverse production system design. *Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 38(3), 547-567. <https://doi.org/10.1080/03602559909351599>
34. Realff, M. J., Ammons, J. C., & Newton, D. (2000). Strategic design of reverse production systems. *Journal of Computers & Chemical Engineering*, 24(2-7), 991-996. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(00\)00418-X](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00418-X)
35. Realff, M. J., Ammons, J. C., & Newton, D. J. (2004). Robust reverse production system design for carpet recycling. *IEEE Transactions*, 36(8), 767-776. <https://dx.doi.org/10.1080/07408170490458580>
36. Realff, M. J., Lemieux, P., Lucero, S., Mulholland, J., & Smith, P. B. (2005, May). Characterization of transient puff emissions from the burning of carpet waste charges in a rotary kiln combustor. In *Conference Record Cement Industry Technical Conference*.

- <https://doi.org/10.1109/CITCON.2005.1516363>
37. Rowe, R. G. (2000). U.S. Patent No. 6,061,876. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
 38. Sas, I., Joines, J. A., Thoney, K. A., & King, R. E. (2019). Logistics of carpet recycling in the US: designing the collection network. *Journal of The TextileInstitute*, 110(3), 328-337. <https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1480101>
 39. Sas, I., Thoney, K. A., Joines, J. A., King, R. E., & Woolard, R. (2015). Reverse logistics of US carpet recycling. *Journal of Sustainable fashion supply chain management*. (pp. 3-30). https://doi.org/10.1007/978-3-319-12703-3_1
 40. Sellers, K. O. (1998). Reduce, Reuse, Recycle in the Carpet Industry. *Text. World*, 148(9), 75.
 41. Shi, Y., Tian, G., Ni, R., Zhang, L., Hu, W., & Zhao, Y. (2023). Facile and green lyocell/feather nonwovens with in-situ growth of ZIF-8 as adsorbent for physicochemical CO₂ capture. *Journal of Separation and Purification Technology*, 322, 124356. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124356>
 42. Simon, A., Tripathi, A., Surehali, S., & Neithalath, N. (2023). Carpet fiber recycling in regular-use concrete mixtures and associated life cycle analysis. *Journal of Waste Management Bulletin*, 1(3), 103-114. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.07.005>
 43. Serio, M. A., Kroo, E., & Wójtowicz, M. A. (2003). Biomass pyrolysis for distributed energy generation. *Prepr. Pap. Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem*, 48(2), 584-589.
 44. Sferrazza, R. A., Handermann, A. C., Atwell, C. H., & Yamamoto, D. K. (1996). U.S. Patent No. 5,535,945. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
 45. Sharer, P. C. (1996). Method of recycling carpet forming components from waste carpet. *Journal of Cleaner Production*, 3(4), 234.
 46. Sotayo, A., Green, S., & Turvey, G. (2015). Carpet recycling: a review of recycled carpets for structural composites. *Journal of Environmental Technology&Innovation*, 3, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2015.02.004>
 47. Strzelecki, C. (2004). Modern solutions for shredding, grinding and repelletizing post-industrial fiber, nonwovens and carpet scrap.
 48. Swift, K., & Sanchez, E. (2017). The US carpet industry: history, industry dynamics, and a simple model for short-term forecasting. *Business Economics*, 52(1), 57-67.
 49. Thoney, K. A., Sas, I., Joines, J. A., & King, R. E. (2020). Logistics of carpet recycling in the US: designing the recycling network. *Journal of The TextileInstitute*, 111(12), 1724-1734. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1723257>
 50. Wang, Y., Zureick, A. H., Cho, B. S., & Scott, D. E. (1994). Properties of fibre reinforced concrete using recycled fibres from carpet industrial waste. *Journal of materials science*, 29(16), 4191-4199. <https://doi.org/10.1007/BF00414198>
 51. Wang, Y. (1999). Utilization of recycled carpet waste fibers for reinforcement of concrete and soil. *Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 38(3), 533-546. <https://doi.org/10.1080/03602559909351598>
 52. Wang, Y. (2006). Carpet recycling technologies. *Journal of Recycling in textiles*, 58-70. <https://doi.org/10.1533/9781845691424.1.58>
 53. Wang, Y. (2010). Fiber and textile waste utilization. *Journal of Waste and biomass*

- valorization, 1(1), 135-143. <https://doi.org/10.1007/s12649-009-9005-y>
54. Wang, Y., Wu, H. C., & Li, V. C. (2000). Concrete reinforcement with recycled fibers. *Journal of materials in civil engineering*, 12(4), 314-319. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:4\(314\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:4(314))
55. White, D. W. (2000). U.S. Patent No. 6,029,916. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
56. Yamamoto, D. K., & Viveen, P. (1996). U.S. Patent No. 5,516,050. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
57. Yasin, S., Hussain, M., Uddin, A., Zheng, Q., Shi, J., & Song, Y. (2024). Recycling of binary polymer (PET/SBR) carpet into microfibrillar composites: A life cycle perspective with microplastics quantification. *Journal of Sustainable Materials and Technologies*, 40, <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00988>
58. Zimmermann, H. J. (1975). Optimale Entscheidungen bei unscharfen Problembeschreibungen. *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 27, 785-796.

References [In Persian]

59. Schumann, Dr. H. D. & Thiele, Dr. U. K. (2007). *Polyester Producing Plants: Principles and Technology* (Shahin Kazemi & Sepahdar Ansari Nik, Translated). Tehran: Jihad Daneshgahi, Amirkabir University Press.
60. Eivazadeh, E. (2013). *Report on the Status of Polyester Fibers in Iran and the World*. Iranico.
61. Nouri, M. (2022). *Chemical and physical structure of textile fibers*. Amir Kabir University of Technology, Jihad Daneshgahi

استناد به این مقاله: سیف برقی، مهدی، زنگنه، شقایق. (۱۴۰۵). طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت نساجی، مدیریت صنعتی،

DOI: 10.22054/jims.2026.91219.3016 ۴۲-۱، (۱۰) ۲۴



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.