

Closed-Loop Supply Chain Design in Textile Industry

Mehdi Seifbarghy *

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

Shaghayegh Zangeneh 

MSc, 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; so that the environmental index value in this method is equal to 259658, 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 good trade off between the total network costs and environmental goals.

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

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

Received:

Accepted:

ISSN:

eISSN:

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 is capable of providing 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



فصلنامه علمی مطالعات مدیریت صنعتی
دوره ۹، شماره ۹، نام فصل، سال، ص ص
jims.atu.ac.ir
DOI: JIMS-2601-3016 (R1)

طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت نساجی

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

شقایق زنگنه  کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهرا، 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 به‌عنوان 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 به‌صورت 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 محیط‌زیست و فناوری‌های پاک است. به‌منظور 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 به‌مراتب 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

* نویسنده مسئول: m.seifbarghy@alzahra.ac.ir

مقدمه

صنعت فرش، به‌عنوان بخشی مهم از صنعت نساجی، تحول چشمگیری را از وابستگی به الیاف طبیعی به‌سوی استفاده گسترده از الیاف مصنوعی تجربه کرده است. در این میان، پلی‌استر به‌عنوان ستون اصلی این تحول، با سهم حدود ۶۰ درصدی از تولید جهانی الیاف، به‌مهم‌ترین ماده اولیه تبدیل شده است و پیش‌بینی می‌شود محرک اصلی رشد آینده صنعت نساجی باشد. این گذار به دلایل متعددی رخ داده است: ویژگی‌های مطلوب پلی‌استر (مانند درخشندگی، جذب رنگ عالی، ضدلک بودن و قیمت مقرون‌به‌صرفه) آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای تولید فرش‌های ماشینی با ظاهری شبیه به ابریشم تبدیل کرده است. با این حال، معایبی مانند دوام کمتر نسبت به نایلون و بازگشت‌پذیری ضعیف (عدم بازگشت فرش به حالت اول پس از فشار) نیز دارد که با روش‌هایی 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 فرش‌ها ۵ تا ۱۰ سال و ساختار چندلایه آنها (Jain et al., 2012) که با چسب‌های غیر قابل ذوب (ترموست) به هم متصل شده (Wang et al., 2000)، بازیافت را پرهزینه و دشوار می‌کند؛ اما یک‌دست بودن جنس فرش‌های پلی‌استر، بازیافت آن‌ها را نسبت به سایرین آسان‌تر می‌سازد و نگرش تولیدکنندگان ایرانی برای جمع‌آوری و بازیافت فرش‌های کهنه در حال تغییر مثبت است.

از نظر تولید، ایران با سرمایه‌گذاری در صنعت پتروشیمی، به خودکفایی قابل توجهی در تولید مواد اولیه پلی‌استر دست‌یافته و پتانسیل بالایی برای تبدیل شدن به یک تولیدکننده و صادرکننده بزرگ در این زمینه دارد. استفاده از پلی‌استر در فرش‌های ماشینی ایرانی روندی روبه‌رشد دارد و آینده روشنی برای این صنعت ترسیم می‌کند. با این حال فرش‌های پلی‌استری به دلایل متعددی به یک معضل زیست‌محیطی جدی تبدیل شده‌اند. دفن این فرش‌ها در زمین (Miraftab, 2018) به تدریج با انتشار مواد شیمیایی سمی نه تنها باعث آلودگی‌های میکروپلاستیک می‌شود (Shi et al., 2023) که بر موجودات آبی و انسان‌ها اثرات منفی دارد (Jessieleena et al., 2023)، بلکه با انتشار مواد شیمیایی سمی و گازهای خطرناک، خاک، هوا و آب‌های زیرزمینی را برای مدت‌های طولانی آلوده می‌کند (Miraftab, 2018)؛ از سوی دیگر، سوزاندن فرش‌ها اگرچه راهکاری برای بازیابی انرژی است، اما به دلیل تولید خاکستر حاوی فلزات سنگین و ترکیبات سرطان‌زا، خطرات جدی برای به‌ویژه ساکنان مناطق کم‌درآمد اطراف کارخانه‌ها دارد (Brent, 2004). بازیافت این

فرش‌ها به‌عنوان راهکاری بهینه مطرح می‌شود، 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, 1999؛ Wang et al., ۱۹۹۴) تولید مبلمان و پشتی فرش (Sellers, 1998؛ El-Hadidy, 2001) و بهبود خاک (Murray et al., 2000؛ McNeil et al., 2007) 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 بازنگری در ساختارهای سنتی زنجیره تأمین را برجسته ساخته است. در این چارچوب، طراحی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته و پایدار به‌عنوان 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 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 به‌عنوان 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

توسعه محور، 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 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، با هدف بهینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی تدوین شده است. در نهایت، 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 در نهایت 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 محصولات 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 حمل‌ونقل 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 پلی آمید 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 برنامه ریزی 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 c۲c 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.

با وجود 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 به طور هم‌زمان پوشش دهد، مشاهده می‌شود. بخش عمده‌ای از مطالعات موجود، جریان‌های مواد را به صورت مجزا بررسی کرده و تمرکز اصلی آن‌ها بر بهینه‌سازی اقتصادی بوده است، در حالی که ادغام هم‌زمان اهداف زیست‌محیطی در قالب یک تصمیم‌گیری یکپارچه کمتر مشاهده می‌شود. این پژوهش با توسعه یک مدل برنامه ریزی 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 بازایافت فرش

مدل‌سازی	مطالعه موردی	غیر قطعی			قطعی	زیست‌محیطی	اقتصادی	چندسطحی	چندمحصولی	چند دوره‌ای	نویسندگان	ردیف
		استوار	احتمالی	فازی								
NLP	✓				✓		✓	✓	✓		لورز و همکاران (۱۹۹۹)	۱
MILP	✓				✓		✓	✓	✓		رتالف و همکاران (۱۹۹۹)	۲
MILP	✓	✓					✓	✓	✓	✓	رتالف و همکاران (۲۰۰۰)	۳
MILP	✓	✓					✓	✓	✓	✓	رتالف و همکاران (۲۰۰۴)	۴
شبیه سازی			✓				✓	✓		✓	بیل و همکاران (۲۰۰۷)	۵
LP	✓				✓	✓					دی لو و همکاران (۲۰۱۱)	۶
MINLP	✓				✓		✓	✓			بوچی و همکاران (۲۰۱۴)	۷
ARX	✓				✓		✓			✓	سوئیفت و سانچز (۲۰۱۷)	۸
MILP	✓				✓		✓				ساس و همکاران (۲۰۱۸)	۹
MILP	✓				✓		✓	✓			ثونی و همکاران (۲۰۲۰)	۱۰
MILP	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	قنبرزاده و همکاران (۲۰۲۲)	۱۱
شبیه سازی	✓				✓	✓			✓	✓	کانینگهام و همکاران (۲۰۲۲)	۱۲
MILP	✓				✓		✓	✓	✓	✓	فرانکو و همکاران (۲۰۲۳)	۱۳
MILP	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓	پژوهش حاضر	۱۴

*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، جریان های 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، کارخانه ها، خرده فروش ها، نواحی مشتری، مراکز جمع آوری، مراکز نوسازی، مراکز بازیافت، شرکت های صنعتی را در بر می گیرد.

در جریان مستقیم، ابتدا تأمین کنندگان، الیاف پلی استر خام را فراهم کرده و آن ها را در اختیار کارخانه ها قرار می دهند. کارخانه ها با بهره گیری از این مواد اولیه، فرش های نو تولید کرده و محصولات را به خرده فروش ها منتقل می کنند. خرده فروش ها به عنوان واسطه ای کلیدی میان تولید کنندگان و مصرف کنندگان، وظیفه توزیع کالاهای نو را بر عهده دارند و هم زمان در عرضه محصولات نوسازی شده نیز مشارکت می کنند. در نهایت، محصولات نو از طریق خرده فروش ها به نواحی مشتری رسیده و مورد استفاده قرار می گیرد. این نقطه، پایان جریان مستقیم و آغاز جریان معکوس است.

پس از مرحله مصرف، جریان معکوس آغاز می شود. نواحی مشتری، فرش های مستعمل خود را به مراکز جمع آوری بازمی گردانند. این مراکز به عنوان حلقه آغازین در فرایند بازگشت، کالاهای دریافت شده را ارزیابی و بر اساس قابلیت استفاده، آن ها را به دو مسیر متفاوت هدایت می کنند.

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 خرده فروش ها منتقل می شوند 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 می شوند و در آنجا به

مواد اولیه قابل مصرف تبدیل می گردند. بخشی از الیاف بازیافتی دوباره به کارخانه‌ها بازگردانده می شود تا در تولید فرش‌های نو مورد استفاده قرار گیرد و ضایعات بازیافتی به شرکت‌های صنعتی واگذار می گردد تا در تولید محصولات صنعتی باکیفیت پایین تر به کار گرفته شوند.

فرایند بازیافت فرش‌های پلی استر به صورت دو مرحله متوالی انجام می شود که در آن ابتدا عملیات خرد کردن و سپس مرحله ذوب ریزی مورد اجرا قرار می گیرد. در مرحله نخست، فرایند مکانیکی به منظور کاهش ابعاد قطعات بزرگ فرش به قطعات کوچک تر انجام می شود. در یک فرایند معمول، مواد اولیه توسط یک درام چرخشی مجهز به تیغه‌های سخت شده برش داده می شوند. طراحی ویژه این خردکن‌ها (با لبه‌های تیز و فاصله کم بین تیغه‌ها) از پیچیدن الیاف جلوگیری می کند و استفاده از گشتاور بالا همراه با سرعت چرخش پایین، مانع از گرم شدن و ذوب شدن ناخواسته پلیمرها می گردد (Sharer, 1996؛ Hawn, 2001؛ Strzelecki, 2004). این ماشین آلات با کارایی بالا و هزینه نگهداری کم، گزینه‌ای بهینه برای پردازش زباله‌های نساجی به شمار می روند (Rowe, 2000؛ White, 2000؛ Bacon et al., 1999؛ Deschamps, 1998؛ Yamamoto et al., 1996؛ Sferrazza et al., 1996).

در مرحله بعد، فرایند ذوب ریزی به عنوان روشی متداول برای تولید الیاف جدید از مواد بازیافتی انجام می پذیرد. پلی استر به عنوان یک پلیمر گرمانرم، قابلیت ذوب و شکل دهی مجدد را دارد (Schumann, 2007؛ نوری، ۱۴۰۲؛ Wang, 2006) و اکسترودر یک دستگاه صنعتی محفظه و ماردون دار است که نقش اصلی را در مرحله ذوب و هموژن سازی بر عهده دارد. در این دستگاه، مواد گرانولی بازیافتی (خرده‌های فرش) با اعمال نیروی مکانیکی و حرارت ذوب شده و به صورت مذاب یکنواختی در می آیند. این مذاب سپس تحت فشار از صافی‌های مخصوص (فیلتر) عبور کرده تا ناخالصی‌ها و ژل‌های پلیمری آن جدا شود (Ishikawa, 2007).

مذاب پالایش شده، پس از عبور از یک مخلوط کن ایستا برای یکنواخت تر شدن، به سمت صفحه رشته ساز هدایت می شود تا به صورت فیلامنت‌های نازک در آید. این فیلامنت‌ها بلافاصله سرد و منجمد شده و در نهایت تحت کشش قرار می گیرند تا به استحکام و قطر مطلوب برسند. محصول نهایی می تواند به صورت فیلامنت‌های پیوسته یا الیاف بریده شده

(استیپل) 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 موردانتظار 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 تعریف شده 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.

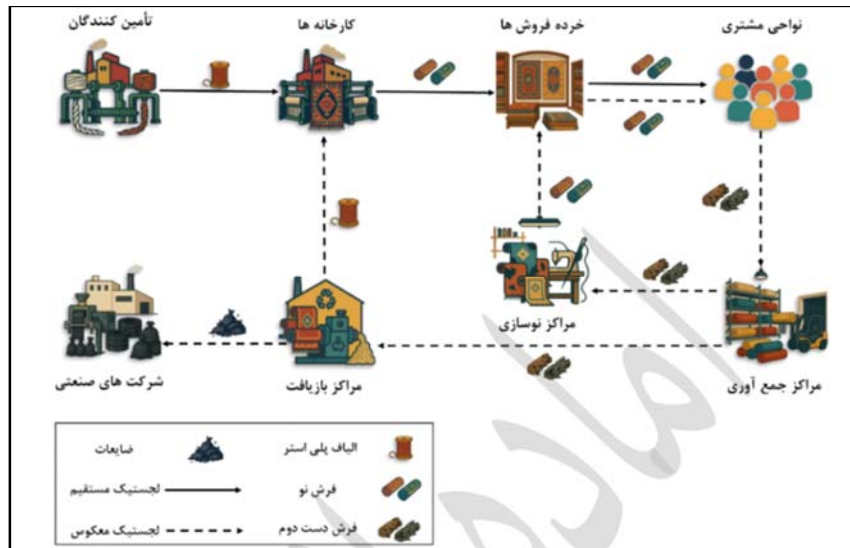
* هزینه حمل‌ونقل میان سطوح شبکه بر اساس میزان محصول منتقل شده و فواصل بین تسهیلات مرتبط محاسبه می‌گردد.

* تنها درصدی از محصولات فروخته‌شده بازمی‌گردند.

* فرش‌های دست‌دوم مجدد به نواحی مشتری ارسال می‌شوند.

* محصولات جمع‌آوری‌شده با نسبت‌های مشخصی به مراکز نوسازی و مراکز بازیافت ارسال می‌شوند.

شکل ۱. طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته فرش



مدل پیشنهادی برای زنجیره تأمین حلقه بسته

در این قسمت اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل به صورت زیر ارائه می‌شوند:

شاخص‌ها (اندیس‌ها)

- $s \in S$ مجموعه مکان‌های ثابت تأمین‌کنندگان 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 _{pf}	هزینه حمل هر واحد محصول p از کارخانه f تا خرده‌فروش r
TR _{pr}	هزینه حمل هر واحد محصول p از خرده‌فروش r تا نواحی مشتری c
TC _{pel}	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 _{pf}	ظرفیت کارخانه f برای تولید محصول p در دوره زمانی t
CU _{put}	ظرفیت نوسازی محصول p در مرکز نوسازی u در دوره زمانی t
CL _{plt}	ظرفیت جمع‌آوری محصول p در مرکز جمع‌آوری l در دوره زمانی t
CE _{et}	ظرفیت مرکز بازیافت e در دوره زمانی t برای بازیافت محصولات مختلف
GK _p	وزن هر یک از محصولات p
GV _{pc}	درصد بازگشتی محصول p از نواحی مشتری c

GH _p	درصد تبدیل محصول p به الیاف پلی استر در هر مرکز بازیافت
B _{pl}	درصدی از محصول جمع آوری شده p که از مرکز جمع آوری l به مراکز نوسازی ارسال می شود
DP _{pct}	تقاضای نواحی مشتری c از محصول p در دوره زمانی t
VS _{sf}	فاصله بین تأمین کننده s تا کارخانه f
VF _{fr}	فاصله بین کارخانه f تا خرده فروش r
VR _{rc}	فاصله بین خرده فروش r تا نواحی مشتری c
VC _{cl}	فاصله بین نواحی مشتری c تا مرکز جمع آوری l
VL _{lu}	فاصله بین مرکز جمع آوری l تا مرکز نوسازی u
VE _{le}	فاصله بین مرکز جمع آوری l تا مرکز بازیافت e
VU _{ur}	فاصله بین مرکز نوسازی u تا خرده فروش r
VN _{ef}	فاصله بین مرکز بازیافت e تا کارخانه f
VA _{ea}	فاصله بین مرکز بازیافت e تا شرکت های صنعتی a
M _{pft}	مطلوبیت استفاده از هر تن مواد دوستدار محیط زیست توسط کارخانه f در تولید محصول p در دوره t
N _{pet}	مطلوبیت استفاده از تکنولوژی پاک در مرکز بازیافت e برای انجام عملیات تولید محصول p در دوره t

متغیرهای تصمیم

XF _f	اگر کارخانه f ایجاد شود، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت ۰ است.
XU _u	اگر مرکز نوسازی u ایجاد شود، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت ۰ است.
XL _l	اگر مرکز جمع آوری l ایجاد شود، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت ۰ است.
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

مقدار محصول p ارسالی از کارخانه f به خرده‌فروش r در دوره زمانی t	YF_{pfrt}
مقدار محصول p ارسالی از خرده‌فروش r به نواحی مشتری c در دوره زمانی t	YR_{prct}
مقدار محصول p ارسالی از نواحی مشتری c به مرکز جمع‌آوری l در دوره زمانی t	YC_{pclt}
مقدار محصول p ارسالی از مرکز جمع‌آوری l به مرکز نوسازی u در دوره زمانی t	YL_{plut}
مقدار محصول p ارسالی از مرکز جمع‌آوری l به مرکز بازیافت e در دوره زمانی t	YE_{plet}
مقدار محصول p ارسالی از مرکز نوسازی u به خرده‌فروش r در دوره زمانی t	YU_{purt}
مقدار الیاف پلی‌استر ارسالی از مرکز بازیافت e به کارخانه f در دوره زمانی t	YN_{eft}
مقدار مواد بازیافتی ارسالی از مرکز بازیافت e به شرکت‌های صنعتی a در دوره زمانی t	YA_{eat}

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

توابع هدف مسئله

Minimize $Z_1 =$

$$\begin{aligned} & \sum_f FF_f \times XF_f + \sum_u FU_u \times XU_u + \sum_l FL_l \times XL_l + \sum_e FE_e \times XE_e \\ & + \sum_{sft} TS_{sf} \times YS_{sft} \times VS_{sf} + \sum_{pfrt} TF_{pfr} \times YF_{pfrt} \times VF_{fr} \\ & + \sum_{prct} TR_{prc} \times YR_{prct} \times VR_{rc} + \sum_{pclt} TC_{pcl} \times YC_{pclt} \times VC_{cl} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{\text{plut}} \text{TL}_{\text{plu}} \times \text{YL}_{\text{plut}} \times \text{VL}_{\text{lu}} + \sum_{\text{purt}} \text{TU}_{\text{pur}} \times \text{YU}_{\text{purt}} \times \text{VU}_{\text{ur}} \\
& + \sum_{\text{plet}} \text{TE}_{\text{ple}} \times \text{YE}_{\text{plet}} \times \text{VE}_{\text{le}} + \sum_{\text{eft}} \text{TN}_{\text{ef}} \times \text{YN}_{\text{eft}} \times \text{VN}_{\text{ef}} \\
& + \sum_{\text{eat}} \text{TA}_{\text{ea}} \times \text{YA}_{\text{eat}} \times \text{VA}_{\text{ea}} \tag{1}
\end{aligned}$$

Maximize $Z_{\gamma} =$

$$\sum_{\text{pft}} \text{M}_{\text{pft}} \times \left(\sum_{\text{r}} \text{YF}_{\text{pfrt}} + \sum_{\text{e}} \text{YN}_{\text{eft}} \right) + \sum_{\text{pet}} \text{N}_{\text{pet}} \times \sum_{\text{l}} \text{YE}_{\text{plet}} \tag{2}$$

محدودیت‌های مسئله

$$\sum_{\text{f}} \text{YS}_{\text{sft}} \leq \text{CS}_{\text{st}} \quad \forall \text{ s, t} \tag{3}$$

$$\sum_{\text{r}} \text{YF}_{\text{pfrt}} \leq \text{CF}_{\text{pft}} \times \text{XF}_{\text{f}} \quad \forall \text{ p, f, t} \tag{4}$$

$$\sum_{\text{c}} \text{YC}_{\text{pclt}} \leq \text{CL}_{\text{plt}} \times \text{XL}_{\text{l}} \quad \forall \text{ p, l, t} \tag{5}$$

$$\sum_{\text{l}} \text{YL}_{\text{plut}} \leq \text{CU}_{\text{put}} \times \text{XU}_{\text{u}} \quad \forall \text{ p, u, t} \tag{6}$$

$$\sum_{\text{pl}} \text{YE}_{\text{plet}} \leq \text{CE}_{\text{et}} \times \text{XE}_{\text{e}} \quad \forall \text{ e, t} \tag{7}$$

$$\sum_{\text{r}} \text{YR}_{\text{prct}} + \sum_{\text{ur}} \text{YU}_{\text{purt}} \geq \text{DP}_{\text{pct}} \quad \forall \text{ p, c, t} \tag{8}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$Y_{Sft}, Y_{Fpfrt}, Y_{Rprct}, Y_{Cpclt}, Y_{Lplut}, Y_{Eplet}, Y_{Uput}, Y_{Neft}, Y_{Aeat} \geq 0$$

(۲۲)

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 با هدف 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. در واقع 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.

محدودیت های (۳) تا (۷) به عنوان محدودیت های ظرفیت برای سطوح مختلف شبکه از جمله تأمین کنندگان، کارخانه ها، مراکز جمع آوری، مراکز نوسازی و مراکز بازیافت تعریف شده اند. محدودیت (۸) تضمین می کند که تقاضای هر ناحیه مشتری تأمین شود؛ به گونه ای که این تقاضا می تواند از طریق محصولات جدید یا محصولات نوسازی شده برآورده گردد. مجموعه محدودیت های (۹) تا (۲۰) به عنوان محدودیت های تعادل جریان عمل کرده و توازن میان جریان های ورودی و خروجی را در تسهیلات مختلف شامل کارخانه ها، خرده فروش ها، مراکز جمع آوری، مراکز نوسازی، مراکز بازیافت و شرکت های صنعتی برقرار می سازند و بدین ترتیب مسیر حرکت محصولات نو، مستعمل، نوسازی شده، مواد بازیافتی و ضایعات را تعیین می کنند. در نهایت، محدودیت های (۲۱) و (۲۲) دامنه متغیرهای تصمیم را مشخص می کنند.

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 به‌عنوان مجموعه‌های فازی در نظر گرفته می‌شوند. جواب بهینه در واقع نقطه‌ای است که در آن اهداف فازی و محدودیت‌های فازی به بهترین شکل ممکن با هم 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 به‌صورت جداگانه 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 به‌صورت کمی سنجیده می‌شود. برای اهداف کمینه‌سازی، تابع عضویت به‌صورت 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 به‌صورت صعودی برقرار می‌شود:

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

^۱ Fuzzy Programming

^۲ Goal Programming

^۳ Multi-Choice Goal Programming

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:

Max λ

S.t:

$$x \in S$$

$$\lambda \leq \mu_k(x) \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$0 \leq \lambda \leq 1 \quad (۲۴)$$

برنامه‌ریزی آرمانی وزنی

برنامه‌ریزی آرمانی وزنی به‌عنوان 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:

$$\begin{aligned}
f_i(x) - d_i^+ + d_i^- &= g_i & i=1,2,\dots,I \\
d_i^+, d_i^- &\geq 0 & i=1,2,\dots,I \\
x &\in F & (25)
\end{aligned}$$

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 مورد نظر 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:

$$\begin{aligned}
f_i(x) - d_i^+ + d_i^- &= y_i & i=1,2,\dots,I \\
y_i - e_i^+ + e_i^- &= g_{i,max} & i=1,2,\dots,I
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& g_{i,\min} \leq y_i \leq g_{i,\max} & i=1,2,\dots,I \\
& d_i^+, d_i^-, e_i^+, e_i^- \geq 0 & i=1,2,\dots,I \\
& X \in F & (26)
\end{aligned}$$

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 (y_i) محسوب 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 محدودیتهای عادی مسئله مورد نظر می باشد که در این تحقیق در روابط (۳) تا (۲۲) قابل مشاهده است.

مطالعه موردی و نتایج حل مدل

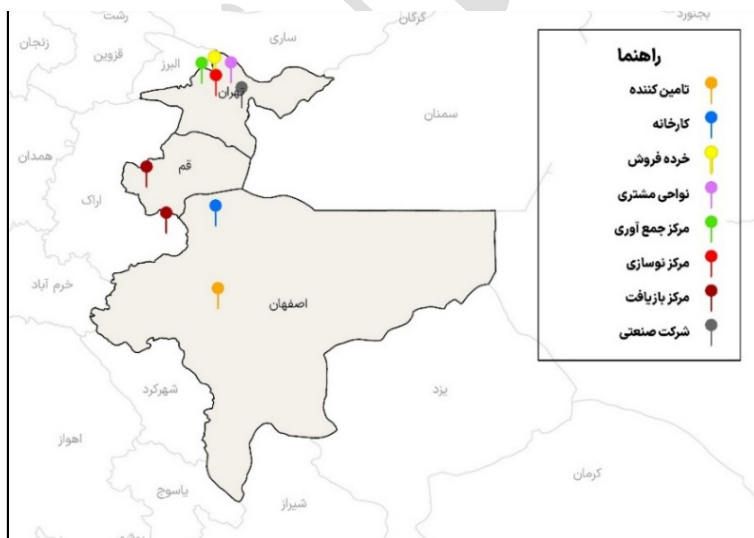
ایران با پیشینه غنی در تولید فرش، هم‌اکنون با گسترش تولید فرش‌های پلی‌استر با چالش مدیریت پایدار چرخه عمر این محصولات روبرو شده است. این مطالعه باهدف طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته در چهار شهر اصلی (اصفهان، تهران، قم، اراک) انجام شده است. مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش، با به کارگیری داده‌های ورودی توصیف شده و توسط حل‌کننده سیمپلکس در محیط نرم‌افزار گمز نسخه ۲،۱،۲۴ حل گردید. این مدل بر روی رایانه‌ای با پردازنده ۵-۱۲۳۵-U Intel Core i با سرعت ۱،۳۰ گیگاهرتز و حافظه دسترسی تصادفی ۸ گیگابایت اجرا شد و با شکاف ۰ در مدت‌زمان بسیار کوتاه ۰،۰۵ ثانیه به جواب بهینه دست یافت.

در مدل ارائه‌شده، دو تأمین‌کننده اصلی شامل پلی‌اکریل ایران و زریف آریا در اصفهان مستقر هستند که مواد اولیه را برای چهار کارخانه تولیدی واقع در شهرک‌های صنعتی قطب راوندی، هلال، سلیمان صباحی و امیرکبیر در کاشان و آران و بیدگل تأمین می‌کنند. محصولات تولیدی از کاشان و آران و بیدگل به شبکه توزیع تهران متشکل از شش خرده‌فروش اصلی شامل بازار بزرگ فرش، بازار فرش شوش، بازار فرش مولوی، بازار فرش ولیعصر، بازار فرش هفت‌تیر و بازار فرش شاه‌عباسی ارسال می‌گردند. این شبکه توزیع، دوازده ناحیه مشتری در مناطق مختلف شهری تهران شامل مناطق ۱۴، ۸، ۱۸، ۲۰، ۳، ۱۰،

۱۱، ۷، ۱۷، ۱۹، ۶ و ۱۶ را پوشش می‌دهد. در مرحله پس از مصرف، سیستم جمع‌آوری متشکل از پنج مرکز در مناطق ۱، ۲، ۴، ۵ و ۱۵ تهران، فرش‌های مستعمل را گردآوری نموده و پس از بررسی، محصولات واجد شرایط به پنج مرکز نوسازی در مناطق ۱۱ و ۱۲ تهران و محصولات باقی‌مانده به چهار مرکز بازیافت مستقر در شهرک‌های صنعتی سلفچگان و شکوهیه در قم، دلیجان در اراک انتقال می‌یابند. الیاف بازیافتی حاصل از فرایند بازیافت در مراکز قم و اراک، به چرخه تولید در کارخانه‌های کاشان و آران و بیدگل بازگردانده شده و ضایعات نیز به سه شرکت صنعتی واقع در شهرک‌های صنعتی شمس‌آباد و عباس‌آباد 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)، زیست‌محیطی (Z_2) به طور جداگانه بهینه‌سازی شدند. مقادیر بهینه به‌دست‌آمده 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 به‌عنوان مقادیر مطلوب برای تصمیم‌گیرنده 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 هر یک از این رویکردها به‌صورت خلاصه در جدول (۳) گزارش شده است.

جدول ۲. نتایج جدول بازده

توابع هدف	اقتصادی	زیست‌محیطی
اقتصادی	$7,77834E+14$	۵۴۲۱۴
زیست‌محیطی	$7,565864E+14$	۴۵۷۱۷۷
MAX	$7,565864E+14$	۴۵۷۱۷۷
MIN	$7,77834E+14$	۵۴۲۱۴

جدول ۳. جزئیات نتایج حاصل از روش‌های حل

توابع هدف	λ	GP	MCGP
اقتصادی	$4,10509E+14$	$8,22236E+13$	$8,19023E+13$
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 در عین 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، در حالی که 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 GV_{pc} ، B_{pl} ، CE_{et} و DP_{pct} 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.

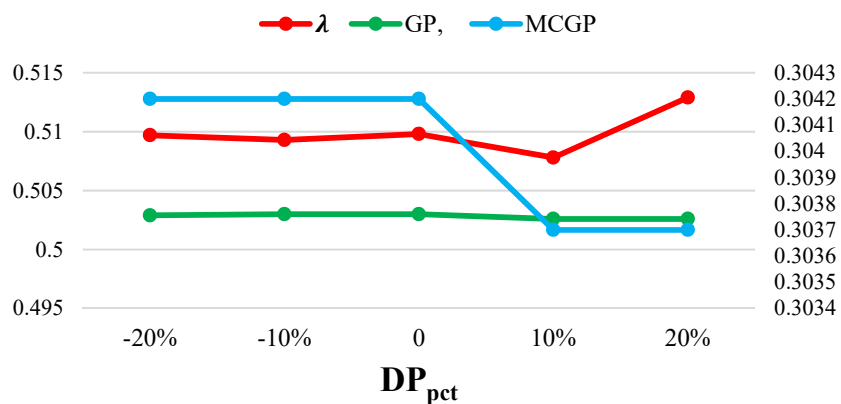
تحلیل حساسیت پارامتر DP_{pct}

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 DPpct

توابع هدف	λ	GP	MCGP
اقتصادی	۴.۰۲۷۲۶۰+۱۴	۶.۶۵۱۴۲۰+۱۳	۶.۶۲۵۷۱۰+۱۳
زیست محیطی	۲۵۴۲۷۱	۴۳۵۵۰	۴۳۳۷۱
روش حل	۰.۵۰۹۷	۰.۵۰۲۹	۰.۳۰۴۲
اقتصادی	۴.۰۷۳۳۵۰+۱۴	۷.۴۳۶۸۹۰+۱۳	۷.۴۰۷۹۷۰+۱۳
زیست محیطی	۲۵۶۷۷۵	۴۸۹۹۳	۴۸۷۹۲
روش حل	۰.۵۰۹۳	۰.۵۰۳۰	۰.۳۰۴۲
اقتصادی	۴.۱۰۵۰۹۰+۱۴	۸.۲۲۲۳۶۰+۱۳	۸.۱۹۰۲۳۰+۱۳
زیست محیطی	۲۵۹۶۵۸	۵۴۴۳۷	۵۴۲۱۴
روش حل	۰.۵۰۹۸	۰.۵۰۳۰	۰.۳۰۴۲
اقتصادی	۴.۱۵۹۱۸۰+۱۴	۹.۰۰۷۸۳۰+۱۳	۸.۹۷۲۴۹۰+۱۳
زیست محیطی	۲۶۱۴۹۲	۵۹۸۸۱	۵۹۶۳۵
روش حل	۰.۵۰۷۸	۰.۵۰۲۶	۰.۳۰۳۷
اقتصادی	۴.۱۷۱۳۳۰+۱۴	۹.۷۹۳۳۱۰+۱۳	۹.۷۵۴۷۵۰+۱۳
زیست محیطی	۲۶۶۱۸۸	۶۵۲۲۵	۶۵۰۵۶
روش حل	۰.۵۱۲۹	۰.۵۰۲۶	۰.۳۰۳۷

شکل ۳. مقایسه و تحلیل عملکرد روش های حل در برابر تغییرات پارامتر DPpct



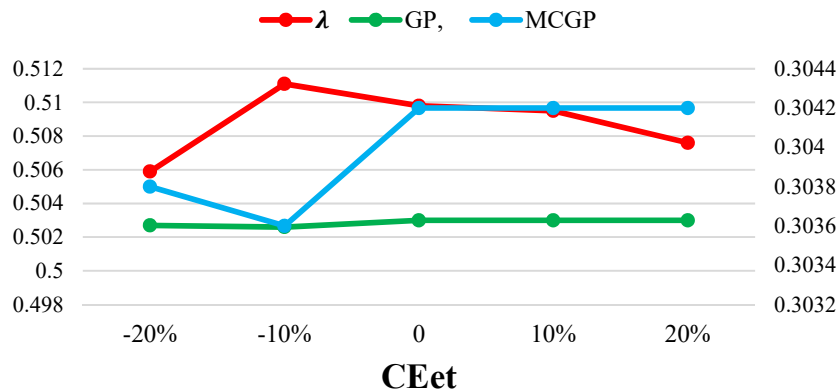
تحلیل حساسیت پارامتر CEet

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 می‌شود، سپس پس از دستیابی به مقدار اوج، با ادامه تغییرات پارامتر، نزول تدریجی غالب می‌شود. این رفتار می‌تواند بیانگر آن باشد که در سطحی از ظرفیت، شبکه به ترکیب بهینه‌ای از جریان‌های بازگشتی و تخصیص به نوسازی یا بازیافت می‌رسد و افزایش بیشتر ظرفیت الزاماً موجب بهبود هم‌زمان اهداف نمی‌شود. در سوی دیگر، پاسخ‌های GP و MCGP از منظر تغییرپذیری، هموارتر بوده و پس از گذار اولیه، نوسان اندکی نشان می‌دهند.

جدول ۵. نتایج تحلیل حساسیت پارامتر CE_{et}

توابع هدف	λ	GP	MCGP
اقتصادی	۳.۹۵۲۲۶۰+۱۴	۸.۲۲۲۳۷۰+۱۳	۸.۱۹۰۲۴۰+۱۳
زیست محیطی	۲۴۶۵۶۰	۵۴۴۳۷	۵۴۲۱۴
روش حل	۰.۵۰۵۹	۰.۵۰۲۷	۰.۳۰۳۸
اقتصادی	۴.۱۰۳۳۰۰+۱۴	۸.۲۲۲۳۶۰+۱۳	۸.۱۹۰۲۳۰+۱۳
زیست محیطی	۲۶۰۱۵۹	۵۴۴۳۷	۵۴۲۱۴
روش حل	۰.۵۱۱۱	۰.۵۰۲۶	۰.۳۰۳۶
اقتصادی	۴.۱۰۵۰۹۰+۱۴	۸.۲۲۲۳۶۰+۱۳	۸.۱۹۰۲۳۰+۱۳
زیست محیطی	۲۵۹۶۵۸	۵۴۴۳۷	۵۴۲۱۴
روش حل	۰.۵۰۹۸	۰.۵۰۳۰	۰.۳۰۴۲
اقتصادی	۴.۱۱۷۷۱۰+۱۴	۸.۲۲۲۳۶۰+۱۳	۸.۱۹۰۲۳۰+۱۳
زیست محیطی	۲۵۹۵۲۳	۵۴۴۳۷	۵۴۲۱۴
روش حل	۰.۵۰۹۵	۰.۵۰۳۰	۰.۳۰۴۲
اقتصادی	۴.۱۲۲۰۷۰+۱۴	۸.۲۲۲۳۶۰+۱۳	۸.۱۹۰۲۳۰+۱۳
زیست محیطی	۲۵۸۷۵۶	۵۴۴۳۷	۵۴۲۱۴
روش حل	۰.۵۰۷۶	۰.۵۰۳۰	۰.۳۰۴۲

شکل ۴. مقایسه و تحلیل عملکرد روش‌های حل در برابر تغییرات پارامتر CE_{et}



تحلیل حساسیت پارامتر B_{PI}

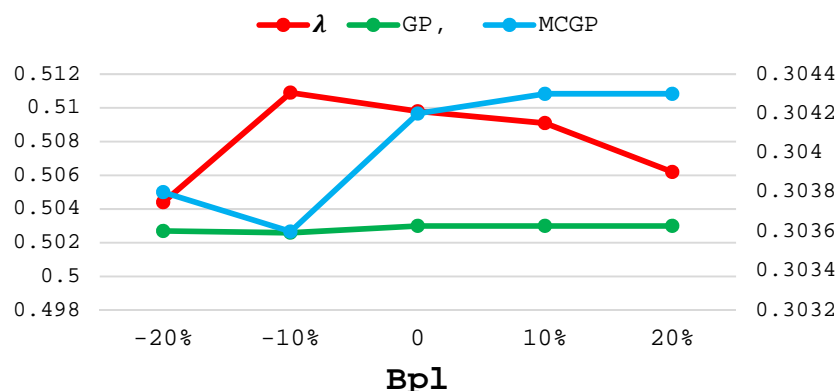
برای پارامتر B_{PI} ، رفتار روش λ را می‌توان به‌عنوان یک الگوی اوج میانی تبیین کرد: خروجی ابتدا تقویت شده و پس از رسیدن به بیشینه، وارد فاز کاهشی می‌شود. این روند نشان می‌دهد افزایش سهم نوسازی لزوماً به معنی بهبود هم‌زمان اهداف نیست؛ زیرا هرچه B_{PI} بزرگ‌تر شود، فشار بیشتری بر ظرفیت مراکز نوسازی و همچنین هزینه‌های 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_{PI}

توابع هدف	λ	GP	MCGP
اقتصادی	۴.۱۰۶۱۲۰+۱۴	۹.۴۱۲۸۵۰+۱۳	۹.۳۸۶۵۱۰+۱۳
زیست‌محیطی	۲۶۱۱۰۲	۶۴۷۳۹	۶۴۵۵۴
روش حل	۰.۵۰۴۴	۰.۵۰۲۷	۰.۳۰۳۸
اقتصادی	۴.۱۸۰۴۵۰+۱۴	۸.۷۵۳۷۲۰+۱۳	۸.۷۴۵۵۶۰+۱۳
زیست‌محیطی	۲۶۷۷۴۵	۵۹۰۹۰	۵۹۰۳۳
روش حل	۰.۵۱۰۹	۰.۵۰۲۶	۰.۳۰۳۶
اقتصادی	۴.۱۰۵۰۹۰+۱۴	۸.۲۲۲۳۶۰+۱۳	۸.۱۹۰۲۳۰+۱۳
زیست‌محیطی	۲۵۹۶۵۸	۵۴۴۳۷	۵۴۲۱۴

توابع هدف	λ	GP	MCGP
روش حل	۰.۵۰۹۸	۰.۵۰۳۰	۰.۳۰۴۲
اقتصادی	۴.۰۵۲۹۲۰+۱۴	۷.۷۱۹۲۳۰+۱۳	۷.۶۹۹۸۷۰+۱۳
زیست محیطی	۲۵۱۷۷۷	۵۰۰۶۲	۴۹۹۲۸
روش حل	۰.۵۰۹۱	۰.۵۰۳۰	۰.۳۰۴۳
اقتصادی	۳.۹۹۹۱۸۰+۱۴	۷.۲۹۵۳۵۰+۱۳	۷.۲۶۷۱۷۰+۱۳
زیست محیطی	۲۴۳۱۲۹	۴۶۳۲۰	۴۶۱۱۳
روش حل	۰.۵۰۶۲	۰.۵۰۳۰	۰.۳۰۴۳

شکل ۵. مقایسه و تحلیل عملکرد روش‌های حل در برابر تغییرات پارامتر Bpl



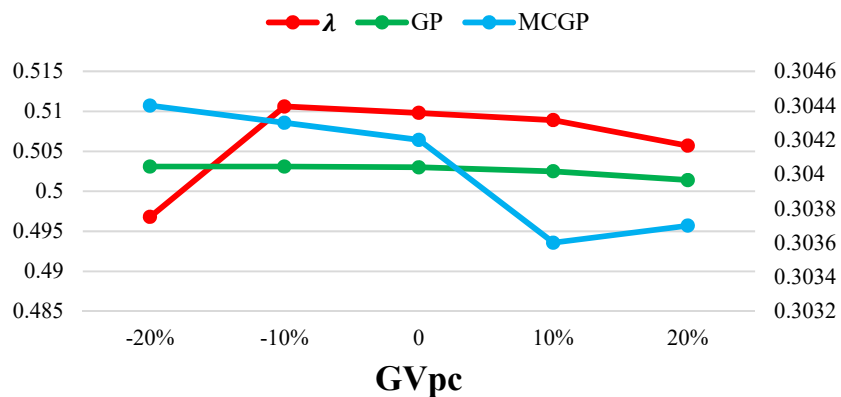
تحلیل حساسیت پارامتر GV_{pc}

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 پایین دستی 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 پایین تری نسبت به λ باقی می‌مانند.

جدول ۷. نتایج تحلیل حساسیت پارامتر GVpc

توابع هدف	λ	GP	MCGP
اقتصادی	۴.۱۴۳۱۴۰+۱۴	۹.۰۱۵۰۸۰+۱۳	۸.۹۸۷۳۳۰+۱۳
زیست محیطی	۲۴۷۹۲۵	۵۹۱۱۴	۵۸۹۲۴
روش حل	۰.۴۹۶۸	۰.۵۰۳۱	۰.۳۰۴۴
اقتصادی	۴.۰۷۵۵۸۰+۱۴	۸.۵۸۴۸۶۰+۱۳	۸.۵۵۴۶۵۰+۱۳
زیست محیطی	۲۵۶۴۰۱	۵۶۵۵۲	۵۶۳۴۳
روش حل	۰.۵۱۰۶	۰.۵۰۳۱	۰.۳۰۴۳
اقتصادی	۴.۱۰۵۰۹۰+۱۴	۸.۲۲۲۳۶۰+۱۳	۸.۱۹۰۲۳۰+۱۳
زیست محیطی	۲۵۹۶۵۸	۵۴۴۳۷	۵۴۲۱۴
روش حل	۰.۵۰۹۸	۰.۵۰۳۰	۰.۳۰۴۲
اقتصادی	۴.۱۴۳۷۳۰+۱۴	۷.۹۴۵۴۷۰+۱۳	۷.۸۹۳۶۳۰+۱۳
زیست محیطی	۲۶۳۲۲۲	۵۲۹۳۴	۵۲۵۵۳
روش حل	۰.۵۰۸۹	۰.۵۰۲۵	۰.۳۰۳۶
اقتصادی	۴.۰۳۳۴۴۰+۱۴	۸.۳۹۳۷۸۰+۱۳	۷.۷۳۹۸۵۰+۱۳
زیست محیطی	۲۵۴۵۸۱	۵۶۸۹۸	۵۱۹۶۷
روش حل	۰.۵۰۵۷	۰.۵۰۱۴	۰.۳۰۳۷

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



بحث و نتیجه گیری

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 زیست‌محیطی و هزینه برای این ساختار صورت گرفته است و نهایتاً با جمع‌آوری داده‌های لازم، مدل یاد شده در صنعت فرش پلی‌استر ایران پیاده‌سازی شده است. شایان ذکر 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 به‌دست‌آمده 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 زیست‌محیطی، 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 زیست‌محیطی 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 بزرگ‌مقیاس، 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 هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

پیوست الف

در این بخش، مقادیر پارامترهای مدل که در بخش سوم معرفی شدند، به طور کامل و با جزئیات ارائه می‌گردند. جدول (۸) مقادیر عددی برخی از پارامترهای کلیدی مدل رانشان می‌دهد. در جدول (۹) وزن هریک از محصولات p (فرش‌های ۶،۹،۱۲ متری ۷۰۰ شانه با تراکم ۳۰۰۰) بر حسب تن ارائه شده است. جدول‌های (۱۰) تا (۲۷)، فواصل و هزینه حمل‌ونقل بین تسهیلات مرتبط با یکدیگر را ارائه می‌دهند. مسافت بین مراکز مختلف در زنجیره تأمین بر اساس فاصله مستقیم بین آن‌ها محاسبه شده است و هزینه حمل‌ونقل بین تسهیلات مختلف بر اساس مقدار محصول جابه‌جا شده و مسافت طی شده محاسبه می‌شود. وسیله نقلیه اصلی برای انجام جابه‌جایی‌ها، کامیون جفت در نظر گرفته شده است که ظرفیت حمل بار آن در محدوده ۱۵ تا ۲۰ تن تعریف شده است. نرخ پایه حمل‌ونقل ۱۸،۰۰۰ تومان به‌ازای هر تن - کیلومتر بوده و برای مسافت‌های کمتر از ۲۰۰ کیلومتر، مبلغ ثابت ۳،۰۰۰،۰۰۰ تومان به‌عنوان تعرفه اضافی (بر اساس تعرفه باربری ۱۴۰۳) در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۸. مقادیر مربوط به پارامترهای مدل

مقدار پارامتر	پارامتر	مقدار پارامتر	پارامتر	مقدار پارامتر	پارامتر
---------------	---------	---------------	---------	---------------	---------

CSst	تن ۹۰۰۰	FFf	۹۰۰ میلیارد	GVpc	٪۳۰
CFpft	تن ۹۰۰۰	FUu	۸۰ میلیارد	GHp	٪۹۰
CUput	تن ۵۰۰۰	FLl	۵۰ میلیارد	Bpl	٪۶۰
CLplt	تن ۷۲۰۰	FEe	۶۰۰ میلیارد	Mpft	۰,۷
CEet	تن ۴۶۰۰	DPpct	تن ۱۰۰۰	Npet	۱

جدول ۹. مقادیر مربوط به وزن محصولات

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

جدول ۱۰. فاصله بین تأمین کنندگان و کارخانه‌ها

D(S,F)	F1	F2	F3	F4
S1	۲۵۸	۲۵۳	۲۳۳	۲۵۰
S2	۱۸۳	۱۷۸	۱۵۸	۱۷۵

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

C(S,F)	F1	F2	F3	F4
S1	۴,۶۴۴,۰۰۰	۴,۵۵۴,۰۰۰	۴,۱۹۴,۰۰۰	۴,۵۰۰,۰۰۰
S2	۶,۲۹۴,۰۰۰	۶,۲۰۴,۰۰۰	۵,۸۴۴,۰۰۰	۶,۱۵۰,۰۰۰

جدول ۱۲. فاصله بین کارخانه‌ها و خرده‌فروش‌ها

D(F,R)	R1	R2	R3	R4	R5	R6
F1	۲۳۵	۲۳۴	۲۴۱	۲۴۹	۲۴۱	۲۳۷
F2	۲۴۸	۲۴۷	۲۵۴	۲۶۱	۲۵۴	۲۵۰
F3	۲۶۶	۲۶۴	۲۷۲	۲۷۹	۲۷۲	۲۶۸
F4	۲۴۸	۲۴۷	۲۵۴	۲۶۲	۲۵۴	۲۵۱

جدول ۱۳. هزینه حمل و نقل بین کارخانه‌ها و خرده‌فروش‌ها

C(F,R)	R1	R2	R3	R4	R5	R6
F1	۴,۲۳۰,۰۰۰	۴,۲۱۲,۰۰۰	۴,۳۳۸,۰۰۰	۴,۴۸۲,۰۰۰	۴,۳۳۸,۰۰۰	۴,۲۶۶,۰۰۰
F2	۴,۴۶۴,۰۰۰	۴,۴۴۶,۰۰۰	۴,۵۷۲,۰۰۰	۴,۶۹۸,۰۰۰	۴,۵۷۲,۰۰۰	۴,۵۰۰,۰۰۰
F3	۴,۷۸۸,۰۰۰	۴,۷۵۲,۰۰۰	۴,۸۹۶,۰۰۰	۵,۰۲۲,۰۰۰	۴,۸۹۶,۰۰۰	۴,۸۲۴,۰۰۰
F4	۴,۴۶۴,۰۰۰	۴,۴۴۶,۰۰۰	۴,۵۷۲,۰۰۰	۴,۷۱۶,۰۰۰	۴,۵۷۲,۰۰۰	۴,۵۱۸,۰۰۰

جدول ۱۴. فاصله بین خرده‌فروش‌ها و نواحی مشتری

D(R,C)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
R1	۱۰	۱۵	۱۹	۹.۶	۱۳	۴.۵	۵.۲	۹.۹	۱۴	۹.۴	۶.۴	۸.۳
R2	۹.۸	۱۵	۲۱	۶.۹	۱۹	۷.۹	۸.۶	۱۳	۱۰	۶	۱۰	۴.۵
R3	۸.۶	۱۱	۱۵	۱۶	۹.۵	۲.۸	۲	۶.۴	۱۳	۱۱	۲.۱	۱۲
R4	۱۹	۱۸	۲۸	۲۶	۶.۹	۱۷	۱۶	۱۲	۲۵	۲۳	۱۴	۲۳
R5	۹.۸	۷.۴	۱۹	۱۵	۶	۶.۷	۵.۹	۲.۱	۱۱	۱۴	۳	۱۳
R6	۶.۱	۸.۲	۱۶	۲۰	۸.۵	۳.۶	۲.۷	۵.۶	۱۰	۱۱	۲.۷	۹.۴

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	۳,۱۸۰,۰۰۰	۳,۲۷۰,۰۰۰	۳,۳۴۲,۰۰۰	۳,۱۷۲,۸۰۰	۳,۲۳۴,۰۰۰	۳,۰۸۱,۰۰۰	۳,۰۹۳,۶۰۰	۳,۱۷۸,۲۰۰	۳,۲۵۲,۰۰۰	۳,۱۶۹,۲۰۰	۳,۱۱۵,۲۰۰	۳,۱۴۹,۴۰۰
R2	۳,۱۷۶,۴۰۰	۳,۲۷۰,۰۰۰	۳,۳۷۸,۰۰۰	۳,۱۲۴,۲۰۰	۳,۳۴۲,۰۰۰	۳,۱۴۲,۲۰۰	۳,۱۵۴,۸۰۰	۳,۲۳۴,۰۰۰	۳,۱۸۰,۰۰۰	۳,۱۰۸,۰۰۰	۳,۱۸۰,۰۰۰	۳,۰۸۱,۰۰۰
R3	۳,۱۵۴,۸۰۰	۳,۱۹۸,۰۰۰	۳,۲۷۰,۰۰۰	۳,۲۸۸,۰۰۰	۳,۱۷۱,۰۰۰	۳,۰۵۰,۴۰۰	۳,۰۳۶,۰۰۰	۳,۱۱۵,۲۰۰	۳,۲۳۴,۰۰۰	۳,۱۹۸,۰۰۰	۳,۰۳۷,۸۰۰	۳,۲۱۶,۰۰۰
R4	۳,۳۴۲,۰۰۰	۳,۳۲۴,۰۰۰	۳,۵۰۴,۰۰۰	۳,۴۶۸,۰۰۰	۳,۱۲۴,۲۰۰	۳,۳۰۶,۰۰۰	۳,۲۸۸,۰۰۰	۳,۲۱۶,۰۰۰	۳,۴۵۰,۰۰۰	۳,۴۱۴,۰۰۰	۳,۲۵۲,۰۰۰	۳,۴۱۴,۰۰۰
R5	۳,۱۷۶,۴۰۰	۳,۱۳۳,۲۰۰	۳,۳۴۲,۰۰۰	۳,۲۷۰,۰۰۰	۳,۱۰۸,۰۰۰	۳,۱۲۰,۶۰۰	۳,۱۰۶,۲۰۰	۳,۰۳۷,۸۰۰	۳,۱۹۸,۰۰۰	۳,۲۵۲,۰۰۰	۳,۰۴۴,۰۰۰	۳,۲۳۴,۰۰۰
R6	۳,۱۰۹,۸۰۰	۳,۱۴۷,۶۰۰	۳,۲۸۸,۰۰۰	۳,۳۶۰,۰۰۰	۳,۱۵۳,۰۰۰	۳,۰۶۴,۸۰۰	۳,۰۴۸,۶۰۰	۳,۱۰۰,۸۰۰	۳,۱۸۰,۰۰۰	۳,۱۹۸,۰۰۰	۳,۰۴۸,۶۰۰	۳,۱۶۹,۲۰۰

جدول ۱۶. فاصله بین نواحی مشتری و مراکز جمع‌آوری

D(C,L)	L1	L2	L3	L4	L5
C1	۳۲	۱۸	۹.۹	۲۱	۶.۴
C2	۲۴	۱۸	۴.۱	۲۲	۱۵
C3	۵۳	۹.۱	۳۵	۱۱	۱۳
C4	۴۱	۲۴	۲۳	۲۶	۱۳
C5	۲۸	۱۲	۱۲	۱۷	۱۴
C6	۳۷	۶.۹	۱۵	۱۰	۸.۷
C7	۳۶	۶.۳	۱۴	۹.۵	۸.۹
C8	۲۹	۱۰	۷.۴	۱۵	۱۰
C9	۲۷	۲۲	۱۲	۳۲	۷.۹
C10	۴۵	۱۶	۲۴	۱۸	۹.۳
C11	۳۶	۷.۸	۱۳	۱۲	۹.۲
C12	۴۱	۱۴	۲۱	۱۶	۶.۷

جدول ۱۷. هزینه حمل و نقل بین نواحی مشتری و مراکز جمع آوری

C(C,L)	L1	L2	L3	L4	L5
C1	۳,۵۷۶,۰۰۰	۳,۳۲۴,۰۰۰	۳,۱۷۸,۲۰۰	۳,۳۷۸,۰۰۰	۳,۱۱۵,۲۰۰
C2	۳,۴۳۲,۰۰۰	۳,۳۲۴,۰۰۰	۳,۰۷۳,۸۰۰	۳,۳۹۶,۰۰۰	۳,۲۷۰,۰۰۰
C3	۳,۹۵۴,۰۰۰	۳,۱۶۳,۸۰۰	۳,۶۳۰,۰۰۰	۳,۱۹۸,۰۰۰	۳,۲۳۴,۰۰۰
C4	۳,۷۳۸,۰۰۰	۳,۴۳۲,۰۰۰	۳,۴۱۴,۰۰۰	۳,۴۶۸,۰۰۰	۳,۲۳۴,۰۰۰
C5	۳,۵۰۴,۰۰۰	۳,۲۱۶,۰۰۰	۳,۲۱۶,۰۰۰	۳,۳۰۶,۰۰۰	۳,۲۵۲,۰۰۰
C6	۳,۶۶۶,۰۰۰	۳,۱۲۴,۲۰۰	۳,۲۷۰,۰۰۰	۳,۱۸۰,۰۰۰	۳,۱۵۶,۶۰۰
C7	۳,۶۴۸,۰۰۰	۳,۱۱۳,۴۰۰	۳,۲۵۲,۰۰۰	۳,۱۷۱,۰۰۰	۳,۱۶۰,۲۰۰
C8	۳,۵۲۲,۰۰۰	۳,۱۸۰,۰۰۰	۳,۱۳۳,۲۰۰	۳,۲۷۰,۰۰۰	۳,۱۸۰,۰۰۰
C9	۳,۴۸۶,۰۰۰	۳,۳۹۶,۰۰۰	۳,۲۱۶,۰۰۰	۳,۵۷۶,۰۰۰	۳,۱۴۲,۲۰۰
C10	۳,۸۱۰,۰۰۰	۳,۲۸۸,۰۰۰	۳,۴۳۲,۰۰۰	۳,۳۲۴,۰۰۰	۳,۱۶۷,۴۰۰
C11	۳,۶۴۸,۰۰۰	۳,۱۴۰,۴۰۰	۳,۲۳۴,۰۰۰	۳,۲۱۶,۰۰۰	۳,۱۶۵,۶۰۰
C12	۳,۷۳۸,۰۰۰	۳,۲۵۲,۰۰۰	۳,۳۷۸,۰۰۰	۳,۲۸۸,۰۰۰	۳,۱۲۰,۶۰۰

جدول ۱۸. فاصله بین مراکز جمع آوری و مراکز نوسازی

D(L,U)	U1	U2	U3	U4	U5
L1	۳۴	۳۴	۳۹	۴۲	۳۷
L2	۱۲	۱۲	۱۵	۱۱	۱۰
L3	۱۲	۱۲	۱۷	۱۹	۱۵
L4	۱۵	۱۵	۱۶	۱۳	۱۱
L5	۳.۷	۳.۷	۳.۹	۶.۷	۹

جدول ۱۹. هزینه حمل و نقل بین مراکز جمع آوری و مراکز نوسازی

C(L,U)	U1	U2	U3	U4	U5
L1	۳,۶۱۲,۰۰۰	۳,۶۱۲,۰۰۰	۳,۷۰۲,۰۰۰	۳,۷۵۶,۰۰۰	۳,۶۶۶,۰۰۰
L2	۳,۲۱۶,۰۰۰	۳,۲۱۶,۰۰۰	۳,۲۷۰,۰۰۰	۳,۱۹۸,۰۰۰	۳,۱۸۰,۰۰۰
L3	۳,۲۱۶,۰۰۰	۳,۲۱۶,۰۰۰	۳,۳۰۶,۰۰۰	۳,۳۴۲,۰۰۰	۳,۲۷۰,۰۰۰
L4	۳,۲۷۰,۰۰۰	۳,۲۷۰,۰۰۰	۳,۲۸۸,۰۰۰	۳,۲۳۴,۰۰۰	۳,۱۹۸,۰۰۰
L5	۳,۰۶۶,۶۰۰	۳,۰۶۶,۶۰۰	۳,۰۷۰,۲۰۰	۳,۱۲۰,۶۰۰	۳,۱۶۲,۰۰۰

جدول ۲۰. فاصله بین مراکز نوسازی و خرده فروش ها

D(U,R)	R1	R2	R3	R4	R5	R6
U1	۱.۴	۳.۷	۱	۲۰	۸.۹	۳.۶
U2	۱.۴	۳.۷	۱	۲۰	۸.۹	۳.۶
U3	۳.۵	۲.۸	۵.۷	۱۹	۱۰	۷.۲
U4	۴.۳	۵.۶	۸.۵	۲۰	۹.۳	۶.۵

D(U,R)	R1	R2	R3	R4	R5	R6
U5	۴.۷	۷.۷	۶.۱	۱۸	۷.۲	۴.۳

جدول ۲۱. هزینه حمل و نقل بین مراکز نوسازی و خرده‌فروش‌ها

C(U,R)	R1	R2	R3	R4	R5	R6
U1	۳,۰۶۶,۶۰۰	۳,۰۱۸,۰۰۰	۳,۳۶۰,۰۰۰	۳,۱۶۰,۲۰۰	۳,۱۶۰,۲۰۰	۳,۰۶۴,۸۰۰
U2	۳,۰۶۶,۶۰۰	۳,۰۱۸,۰۰۰	۳,۳۶۰,۰۰۰	۳,۱۶۰,۲۰۰	۳,۱۶۰,۲۰۰	۳,۰۶۴,۸۰۰
U3	۳,۰۵۰,۴۰۰	۳,۱۰۲,۶۰۰	۳,۳۴۲,۰۰۰	۳,۱۸۰,۰۰۰	۳,۱۸۰,۰۰۰	۳,۱۲۹,۶۰۰
U4	۳,۱۰۰,۸۰۰	۳,۱۵۳,۰۰۰	۳,۳۶۰,۰۰۰	۳,۱۶۷,۴۰۰	۳,۱۶۷,۴۰۰	۳,۱۱۷,۰۰۰
U5	۳,۱۳۸,۶۰۰	۳,۱۰۹,۸۰۰	۳,۳۲۴,۰۰۰	۳,۱۲۹,۶۰۰	۳,۱۲۹,۶۰۰	۳,۰۷۷,۴۰۰

جدول ۲۲. فاصله بین مراکز جمع‌آوری و مراکز بازیافت

D(L,E)	E1	E2	E3	E4
L1	۲۲۴	۱۶۰	۲۷۹	۱۶۰
L2	۱۹۵	۱۳۱	۲۵۰	۱۳۱
L3	۲۰۶	۱۴۲	۲۶۳	۱۴۲
L4	۱۹۷	۱۳۳	۲۵۱	۱۳۳
L5	۱۹۳	۱۲۹	۲۴۷	۱۲۹

جدول ۲۳. هزینه حمل و نقل بین مراکز جمع‌آوری و مراکز بازیافت

C(L,E)	E1	E2	E3	E4
L1	۴,۰۳۲,۰۰۰	۵,۸۸۰,۰۰۰	۵,۰۳۲,۰۰۰	۵,۸۸۰,۰۰۰
L2	۶,۵۱۰,۰۰۰	۵,۳۵۸,۰۰۰	۴,۵۰۰,۰۰۰	۵,۳۵۸,۰۰۰
L3	۳,۷۰۸,۰۰۰	۵,۵۵۶,۰۰۰	۴,۷۳۴,۰۰۰	۵,۵۵۶,۰۰۰
L4	۶,۵۴۶,۰۰۰	۵,۳۹۴,۰۰۰	۴,۵۱۸,۰۰۰	۵,۳۹۴,۰۰۰
L5	۶,۴۷۴,۰۰۰	۵,۳۲۲,۰۰۰	۴,۴۴۶,۰۰۰	۵,۳۲۲,۰۰۰

جدول ۲۴. فاصله بین مراکز بازیافت و شرکت‌های صنعتی

D(E,A)	A1	A2	A3
E1	۱۵۲	۱۹۳	۱۹۶
E2	۸۸	۱۲۹	۱۶۰
E3	۲۰۹	۲۵۰	۲۴۴
E4	۸۸	۱۲۹	۱۶۱

جدول ۲۵. هزینه حمل و نقل بین مراکز بازیافت و شرکت‌های صنعتی

C(E,A)	A1	A2	A3
E1	۵,۷۳۶,۰۰۰	۶,۴۷۴,۰۰۰	۳,۵۲۸,۰۰۰
E2	۴,۵۸۴,۰۰۰	۵,۳۲۲,۰۰۰	۵,۸۸۰,۰۰۰
E3	۳,۷۶۲,۰۰۰	۴,۵۰۰,۰۰۰	۴,۳۹۲,۰۰۰

C(E,A)	A1	A2	A3
E4	۴,۵۸۴,۰۰۰	۵,۳۲۲,۰۰۰	۵,۸۹۸,۰۰۰

جدول ۲۶. فاصله بین مراکز بازیافت و کارخانه‌ها

D(E,F)	F1	F2	F3	F4
E1	۱۵۴	۱۵۷	۱۸۵	۱۶۷
E2	۱۱۵	۱۲۸	۱۴۶	۱۲۹
E3	۷۵	۸۸	۹۶	۸۸
E4	۱۱۶	۱۲۸	۱۴۶	۱۲۹

جدول ۲۷. هزینه حمل و نقل بین مراکز بازیافت و کارخانه‌ها

C(E,F)	F1	F2	F3	F4
E1	۵,۷۷۲,۰۰۰	۵,۸۲۶,۰۰۰	۶,۳۳۰,۰۰۰	۶,۰۰۶,۰۰۰
E2	۵,۰۷۰,۰۰۰	۵,۳۰۴,۰۰۰	۵,۶۲۸,۰۰۰	۵,۳۲۲,۰۰۰
E3	۴,۳۵۰,۰۰۰	۴,۵۸۴,۰۰۰	۴,۷۲۸,۰۰۰	۴,۵۸۴,۰۰۰
E4	۵,۰۸۸,۰۰۰	۵,۳۰۴,۰۰۰	۵,۶۲۸,۰۰۰	۵,۳۲۲,۰۰۰

ORCID

Mehdi Seifbarghy



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

Shaghayegh Zangeneh



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

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 Recycling*.
<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/jjcoma-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. (2001). An overview of commercial recycling technologies and textile applications for the products. Presentation at the 1st Annual Conference on Recycling of Polymer, *Journal of Textile and Carpet Waste*, Dalton, GA, April 20–May 1.
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., & Realf, 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. Realf, 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. Realf, 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. Realf, M. J., Ammons, J. C., & Newton, D. J. (2004). Robust reverse production system design for carpet recycling. *Iie Transactions*, 36(8), 767-776. <https://dx.doi.org/10.1080/07408170490458580>
36. Realf, 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 Textile Institute*, 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 Textile Institute*, 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.
۶۱. Nouri, M. (۲۰۲۲). *Chemical and physical structure of textile fibers*. Amir Kabir University of Technology, Jihad Daneshgahi

استناد به این مقاله: نام خانوادگی نویسنده اول، نام. (سال). عنوان مقاله. عنوان نشریه (یتالیک)، سال (شماره)، ص آغاز-ص پایان.



Seifbarghy, M., Zangeneh, SH. (2026). Closed-Loop Supply Chain Design in Textile Industry, *Journal of Industrial Management Studies*,