

Carbon Footprint Assessment of Iran's Hotel Industry: Emphasizing Indirect Supply Chain Emissions and Budget-Constrained Optimization of Emission Reduction Strategies

Iraj Teimouri* 

Associate Professor, Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz

Mohammad Nemati 

Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz

Abstract

The hotel industry contributes significantly to greenhouse gas emissions due to its intensive energy consumption and extensive dependence on upstream supply chains. However, few studies in Iran have simultaneously addressed the estimation of direct and indirect carbon footprints in this sector and the optimization of emission reduction measures under a budget constraint. Aiming to fill this gap, this study estimates the carbon footprint per one billion Iranian rials of hotel activity, identifies the contribution of key supply-chain sectors, and then determines the optimal investment portfolio for emission reduction considering technical and financial constraints. The research method is descriptive-analytical, based on data from the 38-sector input-output table, the energy balance sheet, and IPCC (2019) emission factors. Using environmentally extended input-output analysis, total emissions were calculated, and then, using a linear programming model (simplex method) validated with a genetic algorithm, a Pareto frontier was extracted to balance cost and emission reduction. The findings revealed that one billion rials of hotel activity generates 1.84 t CO₂, of which over 86% is attributed to indirect

* Corresponding Author: iraj-teymuri@tabrizu.ac.ir

How to Cite: xxxxxxxx

Original Research

Accepted:

Revised:

Received:

eISSN:2476-597X

ISSN: 2322-3294

supply-chain emissions. The electricity industry (34%) and the food industry (23%) have the largest shares. The optimal solution under the baseline budget prioritizes a 50% reduction in the food industry and a 35% reduction in the electricity industry. This framework can assist policymakers and hotel managers in efficiently allocating resources and designing effective decarbonization measures at the supply-chain level.

Keywords: Carbon footprint; Hotel industry; Supply chain; Linear programming; Pareto optimization.

Extended Abstract

1. Introduction

Tourism is one of the fastest-growing sectors of the global economy, but its rapid expansion has also increased greenhouse gas emissions associated with transportation, accommodation, and supporting industries. Among tourism activities, the hotel industry is particularly energy-intensive because of its continuous demand for electricity, heating, cooling, lighting, and food services. However, the environmental impacts of hotels extend beyond on-site operations, as a substantial share of emissions is generated indirectly through upstream sectors such as electricity generation, food manufacturing, textiles, and transportation.

Environmentally Extended Input–Output Analysis (EEIOA) has become an effective approach for estimating both direct and indirect emissions by incorporating intersectoral economic relationships into carbon footprint assessment. Although previous studies have either estimated tourism-related carbon footprints or applied optimization techniques for resource allocation, limited research has integrated these approaches to identify optimal carbon mitigation strategies for the hotel industry under financial constraints, particularly in Iran. Therefore, this study develops an integrated framework combining EEIOA and mathematical programming to estimate and optimize the carbon footprint of Iran's hotel industry. The research question is as follows:

How can an integrated framework based on environmentally extended input–output analysis and mathematical programming be used to estimate and optimize the carbon footprint of Iran's hotel industry under budget constraints?

2. Literature Review

Previous studies have demonstrated that a considerable proportion of tourism-related greenhouse gas emissions originates from indirect supply chain activities rather than direct operational processes. Zhang and Xia (2024), using a multi-regional input–output model for China, identified electricity, food manufacturing, and textile production as the major contributors to hotel-related carbon emissions. Similarly, Li et al. (2025) showed that food manufacturing and textile industries dominate indirect tourism emissions in Indonesia, while Gyawali et al. (2025) emphasized the importance of considering national production structures when assessing tourism carbon footprints.

Recent methodological developments have improved carbon footprint estimation through multi-regional input–output models and structural path analysis (Zhao et al., 2024; Radchenko & Sayapova, 2025; Tang et al., 2025; Lu et al., 2026). Meanwhile, optimization techniques have been increasingly applied in tourism management and supply chain planning (Vanderbei, 2016; Kheirkhah et al., 2019; Bakhshandeh et al., 2024; Hamidian et al., 2024; Chaab & Shekofteh, 2024; Torkabadi et al., 2025). However, studies integrating environmentally extended input–output analysis with optimization for hotel carbon mitigation remain limited, particularly in Iran (Andayesh et al., 2016; Khodadadi et al., 2023).

3. Methodology

A quantitative descriptive–analytical approach was adopted. Economic data were obtained from Iran's 38-sector input–output table, sectoral energy consumption from the national energy balance, and emission factors from the 2019 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Carbon emissions were estimated using Environmentally Extended Input–Output Analysis (EEIOA), in which the Leontief inverse matrix,

$$L = (I - A)^{-1}$$

was combined with sectoral emission coefficients to quantify both direct and indirect emissions associated with hotel activities.

A linear programming model solved by the simplex algorithm was then developed to determine the optimal allocation of mitigation investments under budget constraints. The optimization results were validated using the genetic algorithm and the interior-point method, while Pareto

frontier analysis was employed to evaluate the trade-off between mitigation cost and carbon emission reduction.

4. Results

The results indicate that the carbon footprint of Iran's hotel industry is dominated by indirect emissions generated through upstream supply chain activities. Food manufacturing and electricity were identified as the principal contributors to embodied carbon emissions. The optimization model showed that allocating mitigation investments to these sectors achieved the greatest reduction in total emissions under limited financial resources. The simplex solution was consistent with those obtained using the genetic algorithm and the interior-point method, confirming the robustness of the optimization framework. Furthermore, the optimal solution was located on the Pareto frontier, demonstrating an efficient balance between mitigation cost and emission reduction.

5. Discussion

The findings confirm that reducing the carbon footprint of Iran's hotel industry requires greater attention to upstream supply chain sectors rather than focusing solely on operational energy consumption. The dominant role of electricity generation and food manufacturing is consistent with previous studies (Zhang & Xia, 2024; Li et al., 2025; Gyawali et al., 2025). By integrating EEIOA with mathematical optimization, this study extends previous research from carbon footprint estimation to identifying optimal mitigation priorities under budget constraints.

6. Conclusion

This study presented an integrated framework combining environmentally extended input-output analysis and linear programming to estimate and optimize the carbon footprint of Iran's hotel industry. The results showed that indirect supply chain emissions account for the largest share of total emissions and that prioritizing mitigation investments in the food manufacturing and electricity sectors achieves the greatest emission reduction under limited budgets. The proposed framework provides a practical decision-support tool for developing effective carbon mitigation strategies and supporting sustainable policy-making in Iran's hotel industry.

نام خانوادگی نویسنده اول و دوم (بیش از دو نویسنده نام خانوادگی نویسنده اول و همکاران | ۵

Acknowledgments

The authors declare that this research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

آماده انتشار

ردپای کربن هتلداری ایران با تأکید بر اثرات غیرمستقیم زنجیره تأمین و تعیین ترکیب بهینه اقدامات کاهش انتشار تحت محدودیت بودجه

دانشیار گروه برنامه ریزی شهری و منطقه ای، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

ایرج تیموری * ID

دانش آموخته دکتری گروه برنامه ریزی شهری و منطقه ای، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمد نعمتی ID

چکیده

بخش هتلداری به دلیل مصرف فشرده انرژی و وابستگی گسترده به زنجیره تأمین بالادستی، سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد؛ با این حال، کمتر پژوهشی همزمان به برآورد ردپای کربن غیرمستقیم هتلداری و بهینه‌سازی اقدامات کاهش انتشار با در نظر گرفتن محدودیت بودجه پرداخته است. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، ابتدا ردپای کربن به ازای هر یک میلیارد ریال فعالیت هتلداری را برآورد، سهم بخش‌های کلیدی زنجیره تأمین را شناسایی و سپس ترکیب بهینه سرمایه‌گذاری برای کاهش انتشار را با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی و مالی تعیین می‌کند. روش پژوهش توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر داده‌های جدول داده-ستانده ۳۸ بخشی، ترازنامه انرژی و ضرایب انتشار IPCC (۲۰۱۹) است. با استفاده از تحلیل داده-ستانده زیست‌محیطی، انتشار کل محاسبه و سپس با مدل برنامه‌ریزی خطی (روش سیمپلکس) و اعتبارسنجی با الگوریتم ژنتیک، جبهه پارتو برای تعادل بین هزینه و کاهش انتشار استخراج شد. یافته‌ها نشان داد به ازای هر یک میلیارد ریال فعالیت در هتلداری ۱/۸۴ تن گاز CO₂ منتشر می‌شود که بیش از ۸۶ درصد آن در زنجیره تأمین بالادستی رخ می‌دهد. بخش‌های صنعت برق (۳۴ درصد) و صنایع غذایی (۲۳ درصد) بیشترین سهم را دارند. جواب بهینه با بودجه پایه، کاهش ۵۰ درصدی در صنایع غذایی و ۳۵ درصدی در صنعت برق را اولویت‌بندی می‌کند. این چارچوب می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران هتلداری در تخصیص کارآمد منابع و طراحی اقدامات مؤثر کربن‌زدایی در سطح زنجیره تأمین کمک کند.

کلیدواژه‌ها: ردپای کربن، هتلداری، زنجیره تأمین، برنامه‌ریزی خطی، بهینه‌سازی پارتو

مقدمه

صنعت گردشگری از ارکان اصلی تولید ناخالص داخلی، اشتغال و توسعه اقتصادی در بسیاری از کشورها است (خدابخشی گرگانی و همکاران، ۱۴۰۱). طبق گزارش شورای جهانی سفر و گردشگری (WTTC, 2025)، ارزش اقتصادی این بخش در سال ۲۰۲۴ به حدود ۱۰٫۹ تریلیون دلار، معادل نزدیک به ۱۰ درصد از تولید ناخالص داخلی جهان، رسیده و بیش از ۳۵۷ میلیون فرصت شغلی را در سطح جهانی پشتیبانی کرده است. افزون بر آثار مستقیم اقتصادی، گردشگری به واسطه پیوندهای گسترده با سایر فعالیت‌های تولیدی و خدماتی، اثرات چندبرابری قابل توجهی نیز بر اقتصاد دارد و توسعه آن می‌تواند تقاضا برای طیف وسیعی از کالاها و خدمات مرتبط را افزایش داده و فعالیت‌های پشتیبان را رونق بخشد (World Bank Group, 2025).

با این حال، رشد سریع گردشگری پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجهی، به‌ویژه افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، را در پی داشته است (بابائی و فانی، ۱۴۰۰؛ ضیایی و همکاران، ۱۳۹۵). لنزن و همکاران (Lenzen et al., 2018) با بهره‌گیری از رویکرد ردپای کربن نشان دادند که انتشار ناشی از فعالیت‌های گردشگری در سطح جهان بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ رشد قابل توجهی داشته و حدود ۸ درصد از کل انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده است. ارزیابی‌های جدیدتر نیز حاکی از آن است که با در نظر گرفتن پیوندهای زنجیره تأمین، سهم گردشگری از انتشار جهانی همچنان در سطح بالایی باقی مانده است (WTTC, 2025). با این حال، رشد تقاضای گردشگری اغلب از پیشرفت فناوری‌های کاهش‌دهنده مصرف انرژی و کربن پیشی گرفته و انتشار مطلق این بخش همچنان در حال افزایش است (Sun et al., 2024؛ کاظمی قهفرخی، ۱۴۰۴).

در میان زیربخش‌های مختلف صنعت گردشگری، بخش هتلداری به دلیل مصرف فشرده انرژی (شامل گرمایش، سرمایش، روشنایی، تأمین آب گرم و تجهیزات آشپزخانه) و وابستگی گسترده به شبکه‌ای از تأمین‌کنندگان، یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های مؤثر بر انتشار کربن محسوب می‌شود (بابائی و خواجه‌ای، ۱۴۰۵). با این حال، اکتفا به بررسی مصرف انرژی در محل هتل، تصویر ناقصی از اثرات زیست‌محیطی این صنعت را ارائه

خواهد داد؛ چراکه بخش قابل توجهی از انتشارها در مراحل بالادستی زنجیره تأمین و خارج از مرزهای فیزیکی هتل‌ها تولید می‌شود.

انتشارهای غیرمستقیم شامل تولید و تأمین مواد غذایی و آشامیدنی، منسوجات، تجهیزات، حمل‌ونقل و سایر نهادهای موردنیاز هتل‌ها است که سهم عمده‌ای از ردپای کربن این صنعت را تشکیل می‌دهند. بر اساس دیدگاه چرخه عمر، ردپای کربن واقعی هر فعالیتی فراتر از انتشار مستقیم است و باید اثرات زنجیره‌ای تأمین بالادستی را نیز در بر گیرد (Wiedmann & Minx, 2008). بنابراین، ارزیابی جامع ردپای کربن هتلداری نیازمند رویکردی نظام‌مند است که هم انتشار مستقیم و هم سهم انتشار غیرمستقیم را شناسایی و کمی کند.

در این چارچوب، مفهوم ردپای کربن بیانگر مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای (معمولاً بر حسب معادل دی‌اکسید کربن) ناشی از یک محصول، خدمت، سازمان یا فعالیت اقتصادی در طول چرخه عمر آن است. برخلاف رویکردهای سنتی که صرفاً بر انتشارهای مستقیم متمرکز هستند، ردپای کربن تمامی انتشارهای ایجادشده در طول زنجیره تأمین را نیز پوشش می‌دهد؛ از این رو، نادیده گرفتن انتشارهای غیرمستقیم می‌تواند به برآوردی به‌مراتب کمتر از میزان واقعی انتشار منجر شود. به همین دلیل، ردپای کربن به یکی از ابزارهای اساسی در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی، مدیریت زنجیره تأمین و سیاست‌گذاری توسعه پایدار تبدیل شده است (Wiedmann & Minx, 2008؛ ISO 14067, 2018).

مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که انتشار کربن در صنعت هتلداری تنها به فعالیت‌های داخل واحدهای اقامتی محدود نیست و بخش قابل توجهی از آن در زنجیره تأمین و فرایند تولید کالاها و خدمات مورد استفاده هتل‌ها ایجاد می‌شود. برای نمونه، Xia et al. (۲۰۲۲) با استفاده از تحلیل داده‌ستانده زیست‌محیطی نشان دادند که انتشارهای غیرمستقیم در بخش‌های گردشگری، به‌ویژه هتلداری، اهمیت بالایی دارند و بخش‌هایی مانند صنایع غذایی از منابع مهم این انتشارها محسوب می‌شوند. همچنین، مطالعات مبتنی بر روش داده‌ستانده در صنعت هتلداری، علاوه بر برآورد انتشارهای مستقیم و غیرمستقیم، به شناسایی بخش‌های اصلی ایجادکننده انتشار و ارزیابی کارایی کربنی پرداخته‌اند (Zhang & Xia, 2024؛ Chen et al., 2025). با وجود این، در این دسته از مطالعات، تمرکز اصلی بر اندازه‌گیری ردپای کربن، شناسایی منابع انتشار و ارزیابی عملکرد کربنی بوده است و پیوند این نتایج با

یک چارچوب کمی برای اولویت‌بندی و تخصیص منابع محدود به اقدامات کاهش انتشار، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در ایران نیز مطالعات مرتبط با ردپای کربن، عمدتاً در سطح خانوارها، شهرها یا بخش کلی گردشگری انجام شده‌اند (اندایش و همکاران، ۱۳۹۵؛ خدادادی و همکاران، ۱۴۰۲؛ کاظمی قهفرخی و همکاران، ۱۴۰۴). از سوی دیگر، برخی مطالعات داخلی به موضوع زنجیره تأمین سبز و مدیریت مصرف انرژی در صنعت گردشگری و هتلداری پرداخته‌اند (رضی و همکاران، ۱۳۹۴؛ ضیائی و همکاران، ۱۳۹۶؛ میرفخرالدینی و چرخکار، ۱۴۰۱؛ سعیدی و سعیدی، ۱۴۰۴)، اما این مطالعات به صورت هم‌زمان، ردپای کربن مستقیم و غیرمستقیم فعالیت هتلداری را با استفاده از جدول داده‌ستانده برآورد نکرده و نتایج حاصل را به یک مدل کمی برای تخصیص بودجه میان اقدامات کاهش انتشار پیوند نداده‌اند.

بر این اساس، شکاف اصلی پژوهش را می‌توان در دو زمینه مرتبط با یکدیگر بیان کرد: نخست، محدود بودن شواهد کمی درباره سهم فعالیت هتلداری ایران و بخش‌های مختلف زنجیره تأمین آن در ایجاد انتشار کربن؛ و دوم، محدود بودن چارچوب‌هایی که نتایج حاصل از حسابداری کربن را به تصمیم‌گیری درباره تخصیص بهینه منابع برای اقدامات کاهش انتشار پیوند می‌دهند. در مطالعات داخلی نیز، با وجود توجه به ردپای کربن، زنجیره تأمین سبز و مدیریت مصرف انرژی، پیوند هم‌زمان میان برآورد ردپای کربن هتلداری، شناسایی بخش‌های اولویت‌دار زنجیره تأمین و تخصیص بهینه بودجه کاهش انتشار کمتر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر در پاسخ به این شکاف، انتشارهای مستقیم و غیرمستقیم متناسب به فعالیت هتلداری را برآورد کرده، سهم بخش‌های مختلف زنجیره تأمین را مشخص می‌کند و سپس با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و تحلیل جبهه پارتو، ترکیب اقدامات کاهش انتشار را تحت محدودیت بودجه بررسی می‌کند.

بررسی هم‌زمان انتشارهای مستقیم و غیرمستقیم در بستر اقتصادی ایران امکان ارائه تصویری جامع‌تر از ردپای کربن هتلداری را فراهم می‌سازد؛ به گونه‌ای که انتشار مستقیم، آثار ناشی از فعالیت‌های درون بخش هتلداری را نشان می‌دهد و انتشار غیرمستقیم، آثار زیست‌محیطی نهفته در کالاها و خدمات مورد استفاده این بخش و بخش‌های مختلف زنجیره تأمین را آشکار می‌کند. این موضوع با توجه به ویژگی‌های ساختار انرژی و ترکیب سوخت‌ها و همچنین سازوکارهای قیمت‌گذاری و حمایت از انرژی در ایران اهمیت بیشتری

می‌یابد. از این منظر، نوآوری پژوهش حاضر در پیوند دادن سه مرحله به یکدیگر است: اندازه‌گیری ردپای کربن مستقیم و غیرمستقیم، شناسایی بخش‌های اولویت‌دار زنجیره تأمین، و تعیین ترکیب بهینه اقدامات کاهش انتشار تحت محدودیت بودجه. چنین چارچوبی می‌تواند مبنایی کمی برای اولویت‌بندی اقدامات کربن‌زدایی در صنعت هتلداری فراهم کند.

بر این اساس، پژوهش حاضر در پی پاسخ به سؤالات زیر است:

۱. به‌ازای هر یک میلیارد ریال فعالیت در بخش هتلداری ایران، میزان انتشار کربن مستقیم و غیرمستقیم چقدر است و انتشارهای غیرمستقیم چگونه بین بخش‌های مختلف زنجیره تأمین توزیع می‌شوند؟

۲. کدام بخش‌های زنجیره تأمین بیشترین سهم را در انتشارهای غیرمستقیم فعالیت هتلداری دارند و از این میان، کدام بخش‌ها برای مداخله و کاهش انتشار در اولویت قرار می‌گیرند؟

۳. تحت محدودیت بودجه، ترکیب بهینه اقدامات کاهش انتشار در بخش‌های کلیدی چگونه تعیین می‌شود و چه رابطه‌ای میان هزینه اقدامات و میزان کاهش انتشار وجود دارد؟

پاسخ به این سؤالات با به‌کارگیری رویکردی تلفیقی شامل تحلیل داده‌ستانده زیست‌محیطی، برنامه‌ریزی خطی و استخراج جبهه پارتو انجام می‌شود که شرح کامل آن در بخش روش‌شناسی ارائه خواهد شد.

پیشینه پژوهش

انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های گردشگری طی سال‌های اخیر به یکی از موضوعات مهم در مطالعات پایداری گردشگری تبدیل شده است. رشد تقاضای گردشگری، توسعه زیرساخت‌ها و افزایش مصرف انرژی و کالاهای در مقاصد گردشگری موجب شده است که ارزیابی آثار زیست‌محیطی این بخش، فراتر از انتشارهای مستقیم ناشی از فعالیت‌های گردشگری مورد توجه قرار گیرد. از این رو، مطالعات مختلف تلاش کرده‌اند با استفاده از رویکردهای حسابداری محیط‌زیستی و به‌ویژه مدل‌های داده‌ستانده، میزان انتشار کربن مرتبط با فعالیت‌های گردشگری را هم در داخل بخش گردشگری و هم در زنجیره تأمین آن برآورد کنند. مطالعه Lenzen et al. (۲۰۱۸) از جمله پژوهش‌های شاخص در

این زمینه است که با استفاده از چارچوب داده‌ستانده چندمنطقه‌ای، ردپای کربن جهانی گردشگری را برآورد کرد و نشان داد که بخش قابل توجهی از انتشارهای مرتبط با گردشگری در خارج از مرز مستقیم فعالیت‌های گردشگری و در زنجیره تأمین آن ایجاد می‌شود. این یافته اهمیت توجه هم‌زمان به آثار مستقیم و غیرمستقیم فعالیت‌های گردشگری را برجسته کرد.

با گسترش این رویکرد، پژوهش‌های بعدی تلاش کردند علاوه بر اندازه‌گیری مقدار انتشار، منشأ و بخش‌های اقتصادی مؤثر بر ردپای کربن گردشگری را نیز شناسایی کنند. Xia et al (۲۰۲۲) با تلفیق تحلیل داده‌ستانده توسعه‌یافته زیست‌محیطی (EEIO) و تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)، عملکرد زیست‌محیطی بخش‌های مختلف گردشگری را با تأکید بر انتشارهای ناشی از زنجیره تأمین بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که انتشارهای غیرمستقیم سهم مهمی در ردپای کربن گردشگری دارند و بخش‌هایی نظیر تولید مواد غذایی و فعالیت‌های مرتبط با انرژی، از جمله منابع مهم انتشار در زنجیره تأمین گردشگری محسوب می‌شوند. این مطالعه علاوه بر اهمیت اندازه‌گیری ردپای کربن، بر ضرورت شناسایی بخش‌های کلیدی زنجیره تأمین برای طراحی سیاست‌های کاهش انتشار تأکید دارد.

در مطالعات مرتبط با هتلداری نیز توجه به انتشارهای زنجیره تأمین افزایش یافته است. Zhang and Xia (۲۰۲۴) با استفاده از روش داده‌ستانده و مدل Super-SBM، انتشار کربن و کارایی کربنی هتل‌های گردشگری چین را بررسی کردند و نشان دادند که تفاوت در ساختار اقتصادی و مصرف نهاده‌ها می‌تواند به تفاوت قابل توجهی در عملکرد کربنی هتل‌ها منجر شود. در همین راستا، Li et al (۲۰۲۵) با به‌کارگیری تحلیل داده‌ستانده بین‌منطقه‌ای و تحلیل مسیر ساختاری برای بررسی پیوندهای بین‌بخشی و بین‌منطقه‌ای گردشگری در اندونزی، بر نقش بخش‌های تولیدی و خدماتی تأمین‌کننده نهاده‌های گردشگری در شکل‌گیری زنجیره اثرات اقتصادی تأکید کردند. Chen et al (۲۰۲۵) نیز با تمرکز بر انتشار کربن نهفته در شبکه‌های تجاری مرتبط با هتلداری، نشان دادند که وابستگی متقابل اقتصادی و تجارت بین‌بخشی می‌تواند بخش قابل توجهی از انتشارهای مرتبط با فعالیت‌های هتلداری را به خارج از مرز مستقیم این صنعت منتقل کند.

در ایران نیز استفاده از رویکردهای داده‌ستانده و حسابداری محیط‌زیستی برای بررسی ردپای کربن سابقه دارد، هرچند تمرکز بخش قابل توجهی از این مطالعات بر سطح کل

اقتصاد، خانوارها یا مناطق شهری بوده است. اندایش و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از رویکرد ماتریس حسابداری اجتماعی (SAM)، ردپای بوم‌شناختی و کربن دهک‌های مختلف خانوارهای شهری و روستایی ایران را بررسی کردند و نقش الگوی مصرف و ساختار اقتصادی را در ایجاد انتشار نشان دادند. خدادادی و همکاران (۱۴۰۲) نیز با تمرکز بر پایش ردپای کربن در شهر تبریز، ابعاد فضایی و محیط‌زیستی انتشار کربن را مورد توجه قرار دادند. این مطالعات نشان می‌دهند که چارچوب‌های حسابداری و داده‌ستانده در ایران نیز ظرفیت مناسبی برای ردیابی انتشارهای کربنی دارند، اما کاربرد آنها برای شناسایی ردپای کربن فعالیت هتلداری و تفکیک سهم انتشارهای مستقیم و غیرمستقیم ناشی از زنجیره تأمین همچنان محدود است.

از سوی دیگر، مطالعات مرتبط با گردشگری کم کربن در ایران نیز بر اهمیت کاهش مصرف انرژی، استفاده از فناوری‌های سبز و تغییر ساختار فعالیت‌های گردشگری تأکید کرده‌اند. کاظمی قهفرخی و همکاران (۱۴۰۴)، با بررسی فناوری‌های سبز و سناریوهای توسعه گردشگری کم کربن، ضرورت حرکت بخش گردشگری به سمت الگوهای کم‌انتشار را مورد توجه قرار داده‌اند. در مطالعات مرتبط با هتلداری نیز رضی و همکاران (۱۳۹۴) به مدیریت مصرف انرژی در مراکز اقامتی پرداخته‌اند و سعیدی و سعیدی (۱۴۰۴) راهکارهای صرفه‌جویی در مصرف برق هتل‌ها را بررسی کرده‌اند. این مطالعات، اهمیت مصرف انرژی و مدیریت آن را در کاهش آثار زیست‌محیطی هتل‌ها نشان می‌دهند؛ با این حال، تمرکز آنها عمدتاً بر مصرف مستقیم انرژی و اقدامات درون واحد هتلداری بوده و ارتباط این اقدامات با انتشارهای نهفته در نهاده‌ها و زنجیره تأمین به صورت کمی و یکپارچه بررسی نشده است.

در همین زمینه، برخی مطالعات داخلی به موضوع زنجیره تأمین سبز در صنعت گردشگری و هتلداری پرداخته‌اند. ضیائی و همکاران (۱۳۹۶) عوامل مؤثر بر مدیریت زنجیره تأمین سبز در گردشگری را اولویت‌بندی کردند و میرفخرالدینی و چرخکار (۱۴۰۱) نیز الزامات و عوامل مؤثر بر اجرای زنجیره تأمین سبز در صنعت هتلداری ایران را بررسی کردند. همچنین نخعی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۳) در تدوین مدل زنجیره تأمین سبز، هزینه‌های مرتبط با انتشار کربن را نیز مورد توجه قرار داده‌اند. مجموع این مطالعات نشان می‌دهد که موضوعات انرژی، زنجیره تأمین سبز و کاهش آثار زیست‌محیطی در صنعت هتلداری ایران

مورد توجه قرار گرفته است؛ با این حال، بیشتر این پژوهش‌ها بر شناسایی عوامل، اولویت‌بندی مؤلفه‌ها یا ارائه چارچوب‌های مدیریتی تمرکز داشته‌اند و کمتر به اندازه‌گیری کمی ردپای کربن مستقیم و غیرمستقیم هتلداری و ردیابی سهم بخش‌های مختلف زنجیره تأمین پرداخته‌اند.

با وجود اهمیت شناسایی منابع و بخش‌های مؤثر در ایجاد انتشار کربن، اندازه‌گیری ردپای کربن به تنهایی نمی‌تواند مشخص کند که در شرایط محدودیت منابع، کدام اقدامات کاهش انتشار باید در اولویت قرار گیرند. از این منظر، پیوند میان حسابداری انتشار و روش‌های بهینه‌سازی می‌تواند اطلاعات توصیفی حاصل از تحلیل ردپای کربن را به ابزاری برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری تبدیل کند. برنامه‌ریزی خطی (LP) یکی از روش‌های شناخته‌شده برای تعیین ترکیب بهینه فعالیت‌ها و تخصیص منابع محدود با هدف بهینه‌سازی یا کمینه‌سازی یک تابع هدف است (Vanderbei, 2016). در حوزه محیط‌زیست نیز این روش برای تعیین نحوه تخصیص منابع، انتخاب اقدامات کاهش انتشار و بررسی تعامل میان هزینه و پیامدهای زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گرفته است.

در این راستا، Aviso et al. (۲۰۲۵) رویکردی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی فازی را برای تخصیص بهینه اعتبارات کربن در بنگاه‌های چندمحصولی ارائه کردند. این مطالعه نشان می‌دهد که می‌توان اطلاعات حاصل از حسابداری انتشار مستقیم و غیرمستقیم را با یک چارچوب تصمیم‌گیری بهینه تلفیق کرد تا منابع یا اعتبارات محدود به نحوی تخصیص یابند که کاهش انتشار بیشتری حاصل شود. این مطالعه از یک سو ظرفیت روش‌های بهینه‌سازی را برای تبدیل اطلاعات انتشار به تصمیم‌های اجرایی نشان می‌دهد و از سوی دیگر، اهمیت در نظر گرفتن محدودیت منابع در سیاست‌های کاهش انتشار را برجسته می‌کند.

کاربرد روش‌های بهینه‌سازی در مسائل مرتبط با گردشگری نیز مورد توجه قرار گرفته است، هرچند بخش قابل توجهی از این مطالعات بر موضوعاتی غیر از ردپای کربن متمرکز بوده‌اند. برای نمونه، خیرخواه و همکاران (۱۳۹۸) با مقایسه الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی، ظرفیت این روش‌ها را برای حل مسائل بهینه‌سازی کاربری زمین بررسی کردند. در حوزه گردشگری و زنجیره تأمین نیز ضیائی و همکاران (۱۳۹۶) به اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر مدیریت زنجیره تأمین سبز پرداخته‌اند و نخعی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۳) در تدوین مدل زنجیره تأمین سبز، هزینه‌های مرتبط با انتشار کربن را نیز وارد چارچوب تصمیم‌گیری

کرده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که موضوع کاهش آثار زیست‌محیطی و مدیریت منابع در گردشگری و فعالیت‌های وابسته به آن، قابلیت استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی را دارد؛ با این حال، در این مطالعات ارتباط میان مقدار کمی ردپای کربن بخش‌های مختلف زنجیره تأمین و تخصیص بهینه بودجه برای کاهش آن به صورت یکپارچه دنبال نشده است.

در صنعت هتلداری ایران نیز بخشی از مطالعات بر مدیریت انرژی، زنجیره تأمین سبز و کاهش آثار زیست‌محیطی تمرکز داشته‌اند. رضی و همکاران (۱۳۹۴) مدیریت مصرف انرژی در مراکز اقامتی را بررسی کرده‌اند و میرفخرالدینی و چرخکار (۱۴۰۱) عوامل و الزامات اجرای زنجیره تأمین سبز در صنعت هتلداری ایران را مورد توجه قرار داده‌اند. همچنین سعیدی و سعیدی (۱۴۰۴) راهکارهای صرفه‌جویی در مصرف برق هتل‌ها را بررسی کرده‌اند. اگرچه این مطالعات زمینه مهمی برای شناسایی اقدامات کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد زیست‌محیطی هتل‌ها فراهم می‌کنند، اما عمدتاً به شناسایی و اولویت‌بندی اقدامات یا عوامل مؤثر پرداخته‌اند و مسئله تخصیص کمی و بهینه یک بودجه محدود میان بخش‌های مختلف زنجیره تأمین را بر مبنای میزان انتشار کربن آنها بررسی نکرده‌اند.

مرور مطالعات نشان می‌دهد که در یک سوی ادبیات، پژوهش‌های متعددی به اندازه‌گیری ردپای کربن گردشگری و هتلداری، تفکیک انتشارهای مستقیم و غیرمستقیم و شناسایی بخش‌های مؤثر زنجیره تأمین پرداخته‌اند؛ در سوی دیگر، مطالعات بهینه‌سازی، امکان تخصیص منابع محدود و انتخاب ترکیب مناسب اقدامات کاهش انتشار را بررسی کرده‌اند. با این حال، ارتباط میان این دو حوزه در زمینه هتلداری ایران همچنان محدود است. به‌ویژه، شواهد کمی درباره میزان ردپای کربن فعالیت هتلداری و سهم بخش‌های مختلف زنجیره تأمین آن وجود دارد و چارچوبی که بتواند این اطلاعات را مستقیماً به مسئله تخصیص بهینه بودجه برای کاهش انتشار پیوند دهد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

این خلأ از آن جهت اهمیت دارد که تمرکز صرف بر انتشار مستقیم می‌تواند بخشی از بار واقعی کربنی فعالیت هتلداری را نادیده بگیرد، درحالی‌که بخش مهمی از انتشارها در مراحل بالادستی زنجیره تأمین و در فرایند تولید کالاها و خدمات مورد استفاده هتل ایجاد می‌شود. از سوی دیگر، شناسایی بخش‌های دارای بیشترین انتشار، بدون تعیین نحوه اولویت‌بندی اقدامات در شرایط محدودیت بودجه، الزاماً به تصمیم‌گیری سیاستی یا مدیریتی

مشخصی منجر نمی‌شود. بنابراین، نیاز به رویکردی وجود دارد که ابتدا ردپای کربن مستقیم و غیرمستقیم هتلداری را با استفاده از چارچوب داده‌ستانده توسعه‌یافته زیست‌محیطی اندازه‌گیری کند، سپس بخش‌های کلیدی زنجیره تأمین را شناسایی کرده و در نهایت، این اطلاعات را در یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین ترکیب اقدامات کاهش انتشار تحت محدودیت بودجه به کار گیرد.

بر این اساس، پژوهش حاضر با تلفیق تحلیل داده‌ستانده توسعه‌یافته زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی خطی، یک چارچوب یکپارچه برای اندازه‌گیری ردپای کربن فعالیت هتلداری، تفکیک و ردیابی انتشارهای مستقیم و غیرمستقیم، شناسایی بخش‌های اصلی زنجیره تأمین و تخصیص بهینه بودجه میان اقدامات کاهش انتشار ارائه می‌کند. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای اعتبارسنجی نتایج بهینه‌سازی و ترسیم جبهه پارتو برای بررسی رابطه میان هزینه و میزان کاهش انتشار نیز امکان ارزیابی استحکام و مبادله میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را فراهم می‌کند. از این منظر، نوآوری پژوهش نه صرفاً در اندازه‌گیری ردپای کربن هتلداری، بلکه در پیوند دادن اندازه‌گیری انتشار، شناسایی نقاط داغ زنجیره تأمین و تصمیم‌گیری بهینه برای کاهش انتشار تحت محدودیت بودجه است.

روش^۱

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی-توسعه‌ای و از نظر ماهیت و روش اجرا، توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر داده‌های کمی است. در این پژوهش از ترکیب مدل داده-ستانده زیست‌محیطی، ماتریس معکوس لئونتیف و برنامه‌ریزی خطی (روش سیمپلکس) برای تحلیل و بهینه‌سازی ردپای کربن بخش هتلداری ایران استفاده شده است. چارچوب کلی پژوهش در دو گام تحلیلی طراحی گردید؛ به گونه‌ای که در گام نخست، ردپای کربن غیرمستقیم بخش هتلداری با استفاده از رویکرد داده-ستانده زیست‌محیطی و ماتریس معکوس لئونتیف برآورد شد و در گام دوم نیز، یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی کاهش انتشار در زنجیره تأمین این بخش تدوین و با روش سیمپلکس حل شد. همچنین نتایج این مدل با روش‌های الگوریتم ژنتیک و روش نقطه درونی مقایسه و برای بررسی تعادل میان اهداف کاهش انتشار و هزینه، از رویکرد چندهدفه و تحلیل گرافیکی نیز استفاده گردید. کلیه محاسبات و تحلیل‌ها در محیط نرم‌افزار R نسخه ۲۰۲۴ انجام گرفت.

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به روش اسنادی از منابع معتبر گردآوری شدند. در این راستا، جدول داده-ستانده متقارن ۳۸ بخشی کشور به قیمت پایه سال ۱۴۰۰ از مرکز آمار ایران (۱۴۰۲) به عنوان مبنای تحلیل روابط بین بخشی اقتصاد مورد استفاده قرار گرفت. همچنین ترازنامه انرژی سال ۱۴۰۰ ایران (وزارت نیرو، ۱۴۰۲) برای استخراج داده‌های مصرف حامل‌های انرژی شامل گاز طبیعی، برق، گازوئیل، نفت کوره، بنزین، نفت سفید و سایر فرآورده‌ها در بخش‌های مختلف اقتصادی به کار رفت. برای برآورد انتشار مستقیم CO_2 ناشی از احتراق سوخت‌ها، از ضرایب استاندارد منتشرشده توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC, 2019) استفاده شد. علاوه بر این، ضرایب انتشار برق شبکه ایران با بهره‌گیری از داده‌های نیروگاهی و ترازنامه انرژی و بر اساس مطالعات تطبیقی (Bertolini et al., 2025) محاسبه و در مدل لحاظ گردید.

روش تحلیل داده - ستانده محیط‌زیستی مبتنی بر چهارچوب اصلی داده - ستانده لئونتیف است که در آن، اقتصاد یک کشور به صورت سیستمی از معادلات خطی مدل می‌شود. در این روش، رابطه بین ستانده کل هر بخش و تقاضای نهایی به صورت ماتریسی به شکل رابطه (۱) نمایش داده می‌شود:

رابطه (۱)

$$X = (I - A)^{-1} \times F$$

که در آن:

X بردار $n \times 1$ ستانده کل بخش‌ها (میلیارد ریال)

I ماتریس همانی $n \times n$

A ماتریس ضرایب فنی $n \times n$ که هر عنصر آن $a_{ij} = Z_{ij}/x_j$ است و نشان می‌دهد برای تولید یک واحد ستانده بخش j چه مقدار ستانده بخش i به عنوان نهاده واسطه‌ای نیاز است.

$(I - A)^{-1}$ ماتریس معکوس لئونتیف است که اثرات مستقیم و غیرمستقیم را نشان می‌دهد (Lenzen et al., 2018).

F بردار $n \times 1$ تقاضای نهایی (میلیارد ریال) است.

برای محاسبه ردپای کربن، مدل داده ستانده با ابعاد محیط‌زیستی گسترش می‌یابد در این مدل، ابتدا بردار ضرایب انتشار مستقیم e^d به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$e_i^d = \frac{E_i^{direct}}{X_i}$$

که در آن:

e_i^d ضریب انتشار مستقیم بخش i (تن CO_2 به ازای یک میلیارد ریال ستانده)
 E_i^{direct} کل انتشار مستقیم CO_2 ناشی از احتراق سوخت در بخش i (تن CO_2)
 X_i ستانده ملی بخش i (میلیارد ریال)
 سپس انتشار کل (مستقیم و غیر مستقیم) ناشی از یک واحد افزایش تقاضای نهایی در بخش هتلداری از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Miller & Blair):

$$E_{total} = e^d \times (I - A)^{-1} \times \Delta F$$

که در آن:

E_{total} یک بردار $1 \times n$ است که هر عنصر آن نشان‌دهنده انتشار کل در یک بخش خاص است.
 ΔF بردار $n \times 1$ تغییر در تقاضای نهایی است که در آن تنها عنصر مربوط به بخش هتلداری برابر ۱ (یک میلیارد ریال) و سایر عناصر صفر قرار داده می‌شود.
 برای محاسبه ضرایب انتشار مستقیم، ابتدا کل انتشار CO_2 هر بخش از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$E_i^{direct} = \sum_{k=1}^m (Consumption_{i,k} \times EF_k)$$

که در آن:

$Consumption_{i,k}$ مصرف حامل انرژی k در بخش i (میلیون مترمکعب برای گاز، میلیون لیتر برای سوخت‌های مایع، میلیون کیلووات ساعت برای برق)
 EF_k ضریب انتشار حامل انرژی k (تن CO_2) به ازای واحد مصرف بر اساس IPCC (2019).

برای برق، ابتدا ضریب انتشار شبکه از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:
 رابطه (۵)

$$EF_{electricity} = \frac{\sum_{j=1}^p (Fuel_j \times EF_{fuel,j})}{Total\ Generation}$$

سپس ضریب انتشار مستقیم هر بخش از تقسیم E_i^{direct} بر X_i به دست می‌آید.
 پس از محاسبه E_{total} از رابطه ۳، انتشار مستقیم خود بخش هتلداری از $e_{hotel}^d \times \Delta X_{hotel}$ به دست می‌آید. انتشار غیرمستقیم از تفریق انتشار مستقیم از E_{total} به شرح رابطه (۶) محاسبه می‌شود:
 رابطه (۶)

$E_{indirect} = E_{total} - e_{hotel}^d \times \Delta X_{hotel}$
 سپس سهم هر بخش تأمین کننده در انتشار غیرمستقیم از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:
 رابطه (۷)

$$Share_j = \frac{e_j^d \times \Delta X_j}{E_{indirect}} \times 100$$

پس از شناسایی پنج بخش تأمین کننده کلیدی (برق، گاز طبیعی، صنایع غذایی، نساجی، حمل و نقل جاده‌ای)، یک مسئله برنامه‌ریزی خطی با هدف حداکثر کردن کاهش وزنی انتشار تحت محدودیت‌های فنی و بودجه فرموله می‌شود (Aviso et al., 2025; Vanderbei, 2016). مبنای انتخاب این پنج بخش، بیشترین سهم نسبی آنها از کل انتشار

غیرمستقیم است که در مرحله قبل محاسبه شده و مجموعاً حدود ۹۵ درصد از انتشار غیرمستقیم را تشکیل می‌دهند.

درصد کاهش انتشار (به صورت کسری در بخش های، صنایع برق (X-1)، گاز (X-2)، غذایی (X-3) و نساجی (X-4) و حمل و نقل جاده ای (X-5) مد نظر می باشد و تابع هدف در آن حداکثر کردن کاهش وزنی انتشار بر حسب تن CO₂ بشرح رابطه (۸) می باشد:

$$\max Z = 0.534 x_1 + 0.290 x_2 + 0.360 x_3 + 0.195 x_4 + 0.137 x_5$$

ضرایب تابع هدف برابر با انتشار غیرمستقیم هر بخش (تن CO₂) به ازای یک میلیارد ریال فعالیت هتلداری است که مستقیماً از خروجی مدل داده-ستانده زیست محیطی (مرحله قبل) به دست آمده‌اند. به عبارت دیگر، هر واحد درصد کاهش در یک بخش، به اندازه ضریب انتشار غیرمستقیم آن بخش، در کاهش کل انتشار مؤثر است.

الف) محدودیت‌های فنی (حداکثر کاهش ممکن):

$$0 \leq x_1 \leq 0.40 \text{ (حداکثر کاهش ۴۰ درصد)}$$

$$0 \leq x_2 \leq 0.30 \text{ (حداکثر کاهش ۳۰ درصد)}$$

$$0 \leq x_3 \leq 0.50 \text{ (حداکثر کاهش ۵۰ درصد)}$$

$$0 \leq x_4 \leq 0.30 \text{ (حداکثر کاهش ۳۰ درصد)}$$

$$0 \leq x_5 \leq 0.35 \text{ (حداکثر کاهش ۳۵ درصد)}$$

این حدود فنی بر اساس ترکیبی از منابع تعیین شده‌اند: (الف) مطالعات مرجع بین‌المللی در زمینه پتانسیل بهبود کارایی انرژی (IPCC, 2022; IEA, 2021)، (ب) اهداف سیاستی مندرج در قانون برنامه هفتم توسعه در زمینه بهبود بهره‌وری انرژی و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، و (ج) برآوردهای فنی از حداکثر کاهش ممکن در هر بخش با در نظر گرفتن فناوری‌های موجود و مقرون به صرفه در افق کوتاه مدت تا میان مدت.

ب) محدودیت بودجه بشرح رابطه (۹) تعیین شد:

رابطه (۹)

$$0.20 x_1 + 0.15 x_2 + 0.10 x_3 + 0.18 x_4 + 0.25 x_5 \leq B$$

که B بودجه در دسترس برای کاهش انتشار به ازای هر میلیارد ریال فعالیت هتلداری است (در سناریوی پایه $B=0.12$ میلیارد ریال). ضرایب هزینه نشان‌دهنده هزینه کاهش کامل ۱۰۰ درصد انتشار در هر بخش است که بر اساس برآوردهای فنی-اقتصادی از هزینه اجرای فناوری‌های کاهش انتشار، با در نظر گرفتن قیمت‌های نسبی انرژی و تجهیزات در ایران و تعدیل بر اساس نرخ تورم و ارزش در سال پایه، محاسبه شده‌اند.

بودجه پایه (۰/۱۲ میلیارد ریال معادل ۱۲۰ میلیون ریال) بر اساس حداقل سطح سرمایه‌گذاری زیست‌محیطی موردنیاز برای اعمال حداکثر کاهش ممکن در بخش اولویت‌دار (صنایع غذایی با ضریب هزینه ۰/۱ و سقف ۰/۵) به‌اضافه بخشی از بودجه برای شروع مداخله در بخش برق تعیین شده است. به عبارت دقیق‌تر، این مقدار معادل حدود ۲ درصد از ارزش افزوده سالانه یک واحد هتلداری متوسط در ایران (بر اساس آمارهای مرکز آمار ایران) بوده و به‌عنوان یک سناریوی پایه واقع‌بینانه برای سرمایه‌گذاری زیست‌محیطی سالانه در نظر گرفته شده است که امکان تأمین مالی کامل پتانسیل کاهش در صنایع غذایی (۰/۱ × ۰/۵ = ۰/۰۵) و بخش قابل توجهی از پتانسیل کاهش در برق (۰/۲ × ۰/۳۵ = ۰/۰۷) را به‌طور هم‌زمان فراهم می‌آورد. این رویکرد، توجیهی اقتصادی-سیاستی برای بودجه ارائه می‌دهد و از هرگونه قیاس نامربوط با کالاهای مصرفی پرهیز می‌کند.

ج) محدودیت غیرمنفی بودن:

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0$$

مسئله برنامه‌ریزی خطی با استفاده از روش سیمپلکس حل می‌شود. شکل استاندارد مسئله برای اعمال روش سیمپلکس به صورت رابطه (۱۰) نوشته می‌شود:

رابطه (۱۰)

$$\max Z = \sum_{j=1}^5 c_j x_j$$

$$\text{Subject to: } \sum_{j=1}^5 a_{ij} x_j \leq b_i (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$x_j \geq 0 (j = 1, 2, \dots, 5)$$

که در آن c_j ضرایب تابع هدف، a_{ij} ضرایب محدودیت‌ها و b_i مقادیر سمت راست (شامل بودجه و سقف‌های فنی) هستند. با تبدیل نامساوی‌ها به معادله با افزودن متغیرهای کمکی s_i ، ماتریس سیمپلکس اولیه به شکل زیر تشکیل می‌شود:

جدول ۱. جدول سیمپلکس اولیه

پایه	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	RHS
s_1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0.40
s_2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.30
s_3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0.50
s_4	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0.30
s_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0.35
s_6	0.20	0.15	0.10	0.18	0.25	0	0	0	0	0	1	0.12
Z	-0.534	-0.290	-0.360	-0.195	-0.137	0	0	0	0	0	0	0

الگوریتم سیمپلکس در هر تکرار، متغیری با منفی‌ترین ضریب در ردیف Z (بیشترین اثر افزایشی) را انتخاب کرده، با استفاده از «نسبت حداقل» سطر مبنا را تعیین می‌کند و با عملیات «ضرب سطر و ستون» جدول را به روز می‌کند تا زمانی که تمام ضرایب ردیف Z غیرمنفی شوند. پیاده‌سازی این روش در نرم‌افزار R با استفاده از بسته `lpSolve` (Berkelaar et al., 2023) انجام شد.

به منظور نمایش بصری منطق بهینه‌سازی و تایید نتایج سیمپلکس و همچنین بخاطر محدودیت روش گرافیکی مسئله بهینه‌سازی با دو متغیر برق و صنایع غذایی نیز بصورت گرافیکی حل شدند. در این سایر متغیرها صفر در نظر گرفته شدند. با استفاده از بسته `ggplot2` (Wickham, 2016) در نرم‌افزار R منحنی‌های تابع هدف و منطقه بهینه ترسیم شد.

به منظور اطمینان از سراسری بودن جواب و ارزیابی کارایی محاسباتی، مسئله با دو روش جایگزین نیز حل شد:

روش نقطه درونی^۱: با استفاده از بسته quadprog در R (Turlach & Weingessel, 2019) که برای مسائل خطی و درجه دوم کاربرد دارد. این روش یکی از الگوریتم‌های کارآمد برای حل مسائل بهینه‌سازی خطی و درجه دوم در مقیاس بزرگ است که برخلاف روش سیمپلکس (که در رئوس ناحیه شدنی حرکت می‌کند)، مسیر درون ناحیه شدنی را دنبال کرده و با استفاده از «توابع سد^۲» به سمت جواب بهینه همگرا می‌شود (Vanderbei, 2016; Nocedal & Wright, 2006). در این پژوهش، مسئله برنامه‌ریزی خطی (معادلات ۵ تا ۷) با استفاده از بسته quadprog در نرم‌افزار R حل گردید.

الگوریتم ژنتیک^۳: با استفاده از بسته GA که یک روش فراکاوشی مبتنی بر جمعیت است و نیازی به مشتق‌پذیری ندارد. پیاده‌سازی با بسته GA دصورت گرفت خصوصیات الگوریتم به شرح زیر است (Scrucca, 2013):

۱. ساختار کروموزوم (رمزگذاری)

نوع رمزگذاری: حقیقی^۴

طول کروموزوم: ۵ ژن (متناظر با پنج متغیر تصمیم: برق، گاز، صنایع غذایی، نساجی، حمل‌ونقل)

دامنه هر ژن: برابر با سقف فنی همان بخش (کران پایین ۰، کران بالا به ترتیب: ۰,۴۰، ۰,۳۰، ۰,۵۰، ۰,۳۰، ۰,۳۵)

۲. تابع برازندگی^۵

تابع برازندگی برابر با تابع هدف اصلی (حداکثر کردن کاهش وزنی انتشار) بشرح رابطه (۱۱) تعریف شد:

رابطه (۱۱)

$$Fitness = 0.534 \times x_1 + 0.290 \times x_2 + 0.360 \times x_3 + 0.195 \times x_4$$

^۱ Interior Point

^۲ Barrier functions

^۳ Genetic Algorithm

^۴ Real-valued

^۵ Fitness Function

برای اعمال محدودیت‌ها (سقف فنی و محدودیت بودجه) از روش پناستی استفاده گردید:
 اگر هر متغیری خارج از دامنه مجاز خود باشد

$$\text{Fitness} = -1e10$$

 اگر هزینه کل $(0.20x_1 + 0.15x_2 + 0.10x_3 + 0.18x_4 + 0.25x_5) > 0.12 \rightarrow \text{Fitness} = -1e10$
 در غیر این صورت، مقدار برازندگی طبق رابطه فوق محاسبه می‌شود.

۳. عملگرهای ژنتیک

انتخاب: روش رتبه‌بندی خطی با فشار انتخاب ۲ (پیش‌فرض بسته). در این روش، احتمال انتخاب هر کروموزوم متناسب با رتبه آن در جمعیت مرتب شده است.
 ترکیب: عملگر $BLX-\alpha$ (Blend Crossover) با ضریب $\alpha=0.5$. این عملگر دو کروموزوم والد را ترکیب کرده و فرزندی در بازه‌ای بین مقادیر والدین به اضافه یک فاصله تناسبی تولید می‌کند.

جهش: عملگر جهش تصادفی سازگار که با نرخ 0.1 ، یک ژن را به صورت تصادفی در دامنه مجاز خود تغییر می‌دهد. دامنه جهش با پیشرفت نسل‌ها کاهش می‌یابد.
 ۴. پارامترهای اجرایی که به شرح جدول (۲) می‌باشند:

جدول ۲. پارامترهای اجرایی الگوریتم ژنتیک

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت (popSize)	۱۰۰
حداکثر تعداد نسل (maxiter)	۵۰۰
معیار توقف زودهنگام (run)	۱۰۰ نسل بدون بهبود
نرخ ترکیب (pcrossover)	0.8 (پیش‌فرض)
نرخ جهش (pmutation)	0.1 (پیش‌فرض)
دانه تصادفی (seed)	۱۲۳ (برای تکرارپذیری)

۵. روند اجرا؛ در ۶ مرحله به شرح زیر انجام گرفت:
 أ. تولید اولیه ۱۰۰ کروموزوم تصادفی در دامنه‌های مجاز؛

ب. ارزیابی تابع برازندگی برای هر کروموزوم (اعمال پناستی در صورت نقض محدودیت)؛

ت. انتخاب والدین بر اساس رتبه برازندگی؛

ث. اعمال ترکیب (با احتمال ۰,۸) و جهش (با احتمال ۰,۱) برای تولید نسل جدید (جایگزینی کامل)؛

ج. تکرار مراحل ۲ تا ۴ تا رسیدن به حداکثر ۵۰۰ نسل یا عدم بهبود در ۱۰۰ نسل متوالی؛

ح. گزارش بهترین کروموزوم به عنوان جواب نهایی.

علاوه بر بهینه‌سازی تک‌هدفه با بودجه ثابت، مسئله کاهش انتشار در قالب یک مسئله بهینه‌سازی دوهدفه نیز فرموله شد تا تعامل بین دو هدف «حداکثر کردن کاهش انتشار» و «حداقل کردن هزینه» بررسی گردد. بر اساس جواب بهینه تک‌هدفه که تنها دو متغیر X_1 (برق) و X_3 (صنایع غذایی) مقادیر غیر صفر داشتند، سایر متغیرها (گاز، نساجی، حمل و نقل) در این تحلیل برابر صفر در نظر گرفته شدند. دو تابع هدف به صورت رابطه (۱۲) تعریف شد:

رابطه (۱۲)

کاهش وزنی انتشار، تن CO_2 $f_1 = 0,534 x_1 + 0,360 x_3$
 $0,20 \leq x_1 \leq 0,40$ (هزینه کل، میلیارد ریال) محدودیت‌های فنی شامل $x_1 + 0,10 x_3 = 2$
 محدودیت‌های فنی شامل $0 \leq x_1 \leq 0,40$ و $0 \leq x_3 \leq 0,50$ و محدودیت بودجه (اختیاری)
 در این تحلیل حذف شد تا کل فضای شدنی بررسی گردد. با استفاده از روش شبکه‌بندی با گام‌های ۰/۰۰۴، تمام ترکیب‌های ممکن (x_1, x_3) تولید و نقاط غیر مغلوب استخراج شدند. یک نقطه (x_1, x_3) بر نقطه دیگر غلبه دارد اگر f_1 آن بیشتر و f_2 آن کمتر (یا مساوی) باشد و حداقل یکی از نامساوی‌ها اکید باشد. مجموعه نقاطی که هیچ نقطه دیگری بر آنها غلبه ندارد، جبهه پارتو را تشکیل می‌دهد.

برای ارزیابی تأثیر عدم قطعیت در ضرایب انتشار برق و گاز طبیعی (بخش‌های با بیشترین سهم در انتشار غیر مستقیم)، یک تحلیل حساسیت یک‌طرفه و دوطرفه انجام شد (Saltelli)

(et al., 2019). ضرایب انتشار مستقیم این دو بخش به ترتیب $\pm 20\%$ درصد تغییر داده شد و کل فرایند محاسباتی (مراحل ۲,۲ تا ۲,۵) برای هر سناریو تکرار گردید. دامنه تغییرات رد پای کربن نهایی نسبت به سناریوی پایه به صورت درصد محاسبه و گزارش شد.

یافته‌ها

ضریب انتشار مستقیم نشان می‌دهد به ازای یک میلیارد ریال ستانده (تولید) هر بخش، چه مقدار CO_2 مستقیماً در فرآیندهای تولید منتشر می‌شود. جدول (۳) این ضرایب را برای بخش هتلداری و تأمین‌کنندگان اصلی آن نشان می‌دهد.

نتایج جدول (۳) بیانگر تفاوت قابل توجه میان بخش‌های اقتصادی از نظر شدت کربن است. در حالی که بخش هتلداری با ضریب ۱,۲ تن CO_2 /میلیارد ریال در پایین‌ترین سطوح انتشار قرار دارد، بخش‌های برق (۸۲۶/۶)، گاز طبیعی (۴۵۲/۳) و حمل‌ونقل جاده‌ای (۱۹۲/۱) دارای بالاترین شدت انتشار مستقیم هستند. این تفاوت‌ها بیانگر ناهمگونی قابل توجه بخش‌های اقتصادی از نظر شدت انرژی و کربن است.

جدول ۳. ضرایب انتشار مستقیم CO_2 بخش‌های کلیدی (تن CO_2 به ازای یک میلیارد ریال ستانده ملی)

نام بخش	کد بخش	ضریب انتشار مستقیم
تولید، انتقال و توزیع برق	۳۴	۸۲۶,۶
گاز طبیعی (توزیع و پالایش)	۳۳	۴۵۲,۳
صنایع غذایی و آشامیدنی	۱۵	۱۲,۸
نساجی (پوشاک، منسوجات)	۱۸	۹,۲
حمل‌ونقل جاده‌ای مسافر و بار	۴۵	۱۹۲,۱
هتلداری و رستوران‌داری (فعالیت اصلی)	۳۲	۱,۲
میانگین سایر فعالیت‌ها	-	۱,۱

منبع: یافته‌های پژوهش

بر اساس مدل داده-ستانده زیست‌محیطی و استفاده از ماتریس معکوس لئونتیف، انتشار کل ناشی از یک میلیارد ریال فعالیت در بخش هتلداری برابر با $1/84$ تن CO_2 برآورد شد (جدول ۴). از این مقدار، $0/252$ تن مربوط به انتشار مستقیم خود بخش هتلداری است، در حالی که بخش عمده انتشار ($1/588$ تن معادل $86/3\%$ درصد) به صورت غیرمستقیم در

زنجیره تأمین ایجاد می‌شود. در میان بخش‌های مختلف، برق با سهم ۲۹ درصد بیشترین نقش را در انتشار کل دارد و پس از آن صنایع غذایی (۱۹/۶ درصد)، گاز طبیعی (۱۵/۱۸ درصد) و نساجی (۱۰/۶ درصد) قرار دارند. سایر بخش‌ها نیز سهم اندک اما قابل توجهی در ردپای کربن کل دارند.

برای تمرکز بر انتشار غیرمستقیم، سهم هر بخش از کل انتشار غیرمستقیم (۱/۵۸۸ تن) با استفاده از رابطه (۴) محاسبه و جدول (۵) ارائه شده است. طبق یافته‌های جدول (۵)، نتایج نشان می‌دهد که از مجموع ۱,۵۸۸ تن CO_2 ، بخش برق با ۳۴,۲ درصد بیشترین سهم را به خود اختصاص داده است. پس از آن صنایع غذایی (۲۳,۱ درصد)، گاز طبیعی (۱۸,۵ درصد)، نساجی (۱۲,۴ درصد) و حمل‌ونقل جاده‌ای (۸,۷ درصد) قرار دارند. سایر فعالیت‌های اقتصادی نیز مجموعاً ۴,۶ درصد از انتشار غیرمستقیم را تشکیل می‌دهند. این نتایج نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از اثرات زیست‌محیطی هتلداری در حلقه‌های بالادستی زنجیره تأمین متمرکز شده است.

جدول ۴. انتشار کل CO_2 ناشی از یک میلیارد ریال فعالیت در هتلداری (تن CO_2)

بخش	افزایش تولید (میلیارد ریال)	ضریب انتشار مستقیم	انتشار	سهم از کل (%)
هتلداری (مستقیم)	۰,۲۱	۱,۲	۰,۲۵	۱۳,۷
تولید، انتقال و توزیع برق	۰,۰۸۷	۸۲۶,۶	۰,۵۳	۲۹,۰
گاز طبیعی (توزیع)	۰,۰۳۱	۴۵۲,۳	۰,۲۹	۱۵,۸
صنایع غذایی و آشامیدنی	۰,۱۲۵	۱۲,۸	۰,۳۶	۱۹,۶
نساجی (پوشاک، منسوجات)	۰,۰۴۲	۹,۲	۰,۱۹	۱۰,۶
حمل‌ونقل جاده‌ای	۰,۰۰۸	۱۹۲,۱	۰,۱۳	۷,۵
سایر بخش‌ها	۰,۴۹۷	۱,۱	۰,۰۷	۳,۹
جمع	۱,۰۰	—	۱,۸۴	۱۰۰

منبع: یافته های پژوهش

جدول ۵. توزیع انتشار غیرمستقیم بین بخش های تأمین کننده

بخش	انتشار غیرمستقیم (تن CO ₂)	سهم از انتشار غیرمستقیم (درصد)
برق	۰/۵۳۴	۳۴/۲
صنایع غذایی	۰/۳۶۰	۲۳/۱
گاز طبیعی	۰/۲۹۰	۱۸/۵
نساجی (منسوجات)	۰/۱۹۵	۱۲/۴
حمل و نقل جاده ای	۰/۱۳۷	۸/۷
سایر	۰/۰۷۲	۴/۶
جمع	۱/۵۸۸	۱۰۰

منبع: یافته های پژوهش

جدول (۶) شدت کربن (انتشار به ازای یک میلیارد ریال فعالیت) را در بخش های مختلف نشان می دهد (یافته های پژوهش). نتایج مقایسه ای نشان می دهد که شدت کربن بخش هتلداری (۱/۸۴ تن CO₂ به ازای یک میلیارد ریال فعالیت) در سطحی پایین تر از بخش های انرژی بر مانند برق (۸/۲۴ تن) و حمل و نقل (۴/۲۰ تن) قرار دارد. با این حال، شدت آن نسبت به بخش های خدماتی و کشاورزی بالاتر است. این وضعیت بیانگر قرار گیری هتلداری در یک موقعیت میانی از نظر شدت کربن است؛ به طوری که اثرات زیست محیطی آن بیشتر ناشی از حجم فعالیت و وابستگی به نهاده های واسطه ای است تا انتشار مستقیم.

جدول ۶. مقایسه انتشار CO₂ به ازای یک میلیارد ریال فعالیت در بخش های مختلف (تن CO₂)

بخش	برق	حمل و نقل بار	صنایع غذایی	هتلداری	کشاورزی	خدمات
انتشار کل	۸/۲۴	۴/۲۰	۲/۴۵	۱/۸۴	۱/۱۰	۰/۶۰

منبع: یافته های پژوهش

پس از شناسایی پنج بخش تأمین کننده کلیدی، مسئله برنامه ریزی خطی با تابع هدف حداکثر کردن کاهش وزنی انتشار تحت محدودیت های فنی و بودجه فرموله و با روش سیمپلکس حل شد. جدول (۷) جواب بهینه را برای سناریوی پایه (بودجه ۱۲۰ میلیون ریال) نشان می دهد.

جدول ۷. جواب بهینه مسئله برنامه‌ریزی خطی با روش سیمپلکس

متغیر	بخش	مقدار بهینه	حداکثر ممکن	هزینه واحد (میلیارد ریال)
X1	برق	۰,۳۵	۰,۴۰	۰,۲۰
X2	گاز طبیعی	۰,۰۰	۰,۳۰	۰,۱۵
X3	صنایع غذایی	۰,۵۰	۰,۵۰	۰,۱۰
X4	نساجی	۰,۰۰	۰,۳۰	۰,۱۸
X5	حمل و نقل	۰,۰۰	۰,۳۵	۰,۲۵

منبع: یافته‌های پژوهش

مقدار تابع هدف (حداکثر کاهش وزنی انتشار):

$$Z = ۰,۵۳۴ \times ۰,۳۵ + ۰,۳۶۰ \times ۰,۵۰ = ۰,۳۶۶۹ \text{ تن CO}_2$$

قیمت سایه‌ای با محدودیت بودجه؛ به عبارت دیگر، اگر یک واحد (میلیارد ریال) به بودجه اضافه شود، کاهش انتشار به میزان ۲/۶۷ تن CO₂ افزایش می‌یابد. این مقدار نشان‌دهنده بازده نهایی سرمایه‌گذاری در بهینه‌ترین حالت است.

نتایج نشان می‌دهد که با بودجه محدود ۱۲۰ میلیون ریال، تنها دو بخش برق (تا ۳۵ درصد کاهش) و صنایع غذایی (تا ۵۰ درصد کاهش) بودجه دریافت می‌کنند. سایر بخش‌ها (گاز، نساجی، حمل و نقل) در این سطح بودجه سهمی ندارند. دلیل این امر نسبت بالاتر بازده به هزینه در این دو بخش است (به ترتیب ۲/۶۷ و ۳/۶).

برای تأیید صحت جواب سیمپلکس، مسئله با دو روش دیگر نیز حل شد: روش نقطه درونی و الگوریتم ژنتیک. لازم به ذکر است که مقایسه روش‌ها صرفاً با هدف تأیید سراسری بودن جواب سیمپلکس و ارزیابی کارایی محاسباتی انجام گرفت نه بعنوان روش رقابتی برای جایگزینی، زیرا مسئله حاضر به وضوح دارای ساختار خطی با ابعاد کوچک بوده و سیمپلکس جواب سراسری بهینه را تولید می‌کند. نتایج در جدول (۸) مقایسه شده است.

جدول ۸. مقایسه جواب سه روش بهینه‌سازی

روش	مقدار تابع هدف (تن CO ₂)	توضیحات
سیمپلکس	۰,۳۶۶۹	جواب دقیق و بهینه
نقطه درونی	≈۰,۰۰۰۰	به دلیل تنظیمات ماتریس هسی به جواب صحیح نرسید

الگوریتم ژنتیک	۰,۳۱۸۹	نزدیک به جواب بهینه، اما همگرایی کامل نداشت
----------------	--------	---

منبع: یافته های پژوهش

بر طبق یافته های جدول (۸) روش سیمپلکس به عنوان روش مرجع، بهترین جواب را ارائه داد. الگوریتم ژنتیک با جمعیت ۱۰۰ و ۵۰۰ نسل، به مقدار ۰/۳۱۸۹ رسید که نشان داد الگوریتم ژنتیک حدود ۱۳ درصد اختلاف نسبی با مقدار بهینه دارد، در حالی که روش نقطه درونی به دلیل حساسیت عددی در تنظیم ماتریس های مسأله، به جواب معتبر همگرا نشد. بنابراین، در بهینه سازی مدل های با ساختار خطی و ابعاد کوچک، استفاده از روش های کلاسیک مانند سیمپلکس نسبت به روش های فراکاوشی، از اطمینان پذیری و کارایی محاسباتی بالاتری برخوردارند و به کارگیری آنها برای اعتبارسنجی روش اصلی، ارزش افزوده روش شناختی دارد. بمنظور ارزیابی تأثیر عدم قطعیت در ضرایب انتشار برق و گاز (بخش های با بیشترین سهم)، تحلیل حساسیت با تغییر $\pm 20\%$ درصدی این ضرایب انجام شد. نتایج در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول ۹. دامنه تغییرات انتشار کل به ازای یک میلیارد ریال فعالیت در هتلداری

سناریو	ضریب برق	ضریب گاز	انتشار کل (تن CO ₂)	تغییر نسبت به پایه
پایه	۸۲۶/۶	۴۵۲/۳	۱/۸۴	-
برق -۲۰ درصد	۶۶۱/۳	۴۵۲/۳	۱/۶۴۷	-۱۰/۵ درصد
برق +۲۰ درصد	۹۹۱/۹	۴۵۲/۳	۲/۰۳۳	+۱۰/۵ درصد
گاز -۲۰ درصد	۸۲۶/۶	۳۶۱/۸	۱/۷۴۴	-۵/۲ درصد
گاز +۲۰ درصد	۸۲۶/۶	۵۴۲/۸	۱/۹۳۶	+۵/۲ درصد
هر دو -۲۰ درصد	۶۶۱/۳	۳۶۱/۸	۱/۵۵۱	-۱۵/۷ درصد
هر دو +۲۰ درصد	۹۹۱/۹	۵۴۲/۸	۲/۱۲۹	+۱۵/۷ درصد

منبع: یافته های پژوهش

بر طبق یافته های جدول (۹) نتایج تحلیل حساسیت نشان می دهد که در سناریوی پایه، انتشار کل برابر ۱/۸۴ تن CO₂ است. تغییر ۲۰ درصدی در ضریب انتشار برق، ردپای کربن هتلداری را حدود ۱۰/۵ درصد تغییر می دهد. تغییر ۲۰ درصدی در ضریب انتشار گاز، ردپای کربن را حدود ۵/۲ درصد تغییر می دهد. تغییر همزمان هر دو ضریب، دامنه تغییرات را به $\pm 15/7\%$ درصد گسترش می دهد این یافته بر ضرورت محاسبه ضریب انتشار بومی برای برق ایران (با در نظر گرفتن مخلوط سوخت نیروگاه ها و تلفات شبکه) تأکید می کند. برای

بررسی اثر تغییر بودجه بر جواب بهینه، سناریوهای مختلف بودجه (افزایش ۲۰ درصد و کاهش ۲۰ درصد) نیز تحلیل شد. نتایج در جدول (۱۰) ارائه شده است.

جدول ۱۰. تأثیر تغییر بودجه بر جواب بهینه و کاهش انتشار

بودجه (میلیارد ریال)	x_1 (برق)	x_2 (گاز)	x_3 (غذا)	x_4 (نساجی)	x_5 حمل و نقل)	کاهش وزنی (Z)	کاهش انتشار غیرمستقیم
-۲۰ درصد (۰/۰۹۶)	۰/۲۳	۰	۰/۵۰	۰	۰	۰/۳۰۳	۱۹/۱ درصد
پایه (۰/۱۲۰)	۰/۳۵	۰	۰/۵۰	۰	۰	۰/۳۶۷	۲۳/۱ درصد
+۲۰ درصد (۰/۱۴۴)	۰/۴۰	۰/۰۹۳	۰/۵۰	۰	۰	۰/۴۲۱	۲۶/۵ درصد

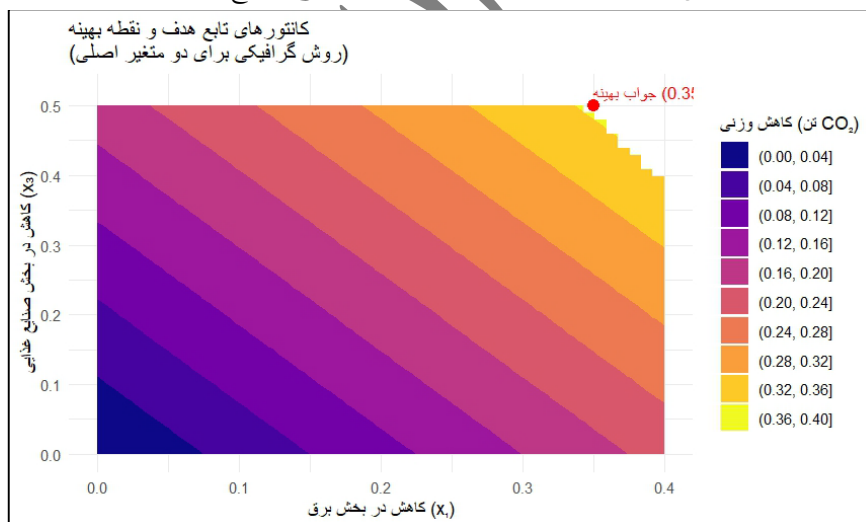
منبع: یافته های پژوهش

نتایج جدول ۱۰ نشان می دهد که افزایش بودجه (به عنوان مثال از محل مشوق های مالیاتی یا یارانه های سبز) می تواند کاهش انتشار غیرمستقیم را تا ۲۶/۵ درصد افزایش دهد، اما پس از عبور از سقف کاهش بخش های با بازده بالا (صنایع غذایی و برق)، بودجه اضافی باید به بخش هایی با بازده پایین تر (مانند گاز) تخصیص یابد که بازده نهایی کاهشی را به همراه دارد. برای بررسی اثر محدودیت مالی بر ساختار بهینه، سناریوهای تغییر $\pm 20\%$ درصدی در بودجه پایه مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که افزایش بودجه از ۰/۰۹۶ به ۰/۱۴۴ میلیارد ریال باعث افزایش مقدار تابع هدف از ۰/۳۰۳ به ۰/۴۲۱ می شود و هم زمان کاهش انتشار غیرمستقیم از ۱۹/۱ درصد به ۲۶/۵ درصد افزایش می یابد. الگوی تخصیص منابع در تمامی سناریوها نشان می دهد که ابتدا صنایع غذایی به سقف فنی خود (۰/۵۰) می رسد و سپس بخش برق نقش دومین گیرنده اصلی بودجه را ایفا می کند. در سناریوی افزایش بودجه، پس از اشباع ظرفیت صنایع غذایی، بخش برق به سقف ۰/۴۰ نزدیک می شود و در ادامه بخشی از بودجه به گاز طبیعی اختصاص می یابد. این تغییرات نشان می دهد که ساختار بهینه به صورت مرحله ای و مبتنی بر بازده نهایی نزولی شکل می گیرد.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که افزایش بودجه اگرچه در ابتدا اثر خطی بر کاهش انتشار دارد، اما پس از اشباع بخش‌های با بازده بالا، نرخ بازدهی نهایی کاهش می‌یابد و وارد ناحیه بازده نزولی می‌شود.

به منظور نمایش بصری مسئله، فقط دو متغیر اصلی (X_1 و X_3) در نظر گرفته شد. دلیل اینکه از بین ۵ متغیر فقط ۲ متغیر استفاده شده بخاطر نتایج دست آمده در جدول (۷)، می‌باشد که در آن جواب بهینه سیمپلکس برای سه متغیر گاز، نساجی و حمل‌ونقل برابر صفر است؛ بنابراین، حذف آنها از تحلیل گرافیکی نه تنها بخشی از فضای جواب را حذف نمی‌کند، بلکه دقیقاً منطبق بر جواب بهینه مسئله است و صرفاً برای تسهیل نمایش بصری تعادل هزینه-کاهش انتشار انجام می‌شود. شکل (۱) کانتورهای تابع هدف همراه با منطقه شدنی را نشان می‌دهد و نقطه بهینه (۰/۳۵، ۰/۵) را بر روی مرز محدودیت بودجه و سقف فنی صنایع غذایی تأیید می‌کند. شکل (۱) کانتورهای تابع هدف (کاهش وزنی انتشار) همراه با منطقه شدنی (محدودیت بودجه و سقف‌های فنی) نشان می‌دهد.

شکل ۱. بهینه سازی گرافیکی برای دو متغیر برق و صنایع غذایی



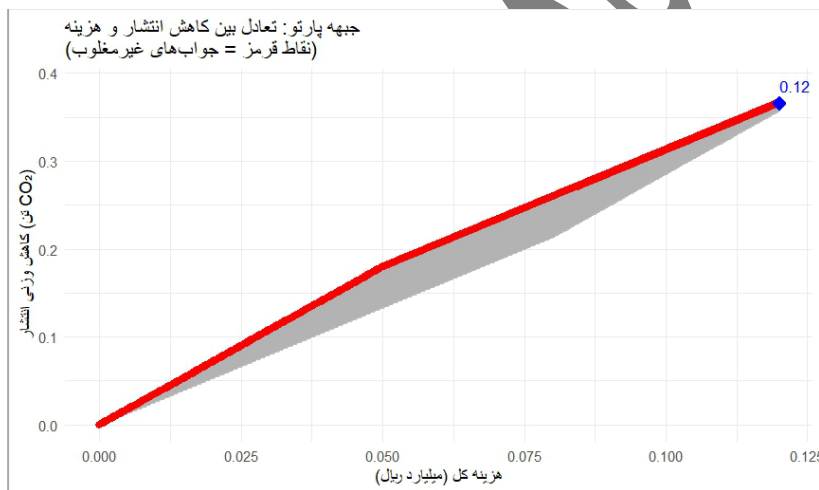
همانطوریکه شکل (۱) نیز نشان می‌دهد نقطه بهینه (۰/۳۵، ۰/۵) دقیقاً روی مرز محدودیت بودجه (خط هزینه ۰/۱۲) و در عین حال روی سقف فنی صنایع غذایی ($X_3=0.50$) قرار دارد. این نشان می‌دهد که در بودجه ۱۲۰ میلیون ریالی، ابتدا باید

صنایع غذایی تا حداکثر ممکن کاهش یابد و باقیمانده بودجه صرف کاهش در بخش برق شود. تطابق کامل جواب گرافیکی با جواب سیمپلکس، صحت هر دو روش را تأیید می‌کند.

در تحلیل تکمیلی دوهدفه، جبهه پارتو برای دو هدف «حداکثر کردن کاهش انتشار» و «حداقل کردن هزینه» استخراج شد و به صورت دوهدفه به شرح ادامه فرموله شد:

- هدف اول (f_1): حداکثر کردن کاهش وزنی انتشار (Z)
 - هدف دوم (f_2): حداقل کردن هزینه کل $(Cost) = 0.20 + 0.10X_1 + 0.30X_3$
- با استفاده از روش شبکه‌بندی در محدوده شدنی (X_1 از ۰ تا ۰/۴، X_3 از ۰ تا ۰/۵)، نقاط غیرمغلوب استخراج و جبهه پارتو رسم شد. شکل (۲) این جبهه را نشان می‌دهد.

شکل ۲. جبهه پارتو برای دو هدف حداکثر کردن کاهش انتشار و حداقل کردن هزینه



بر طبق شکل (۲) نقاط خاکستری، تمام ترکیب‌های شدنی می‌باشند. خط قرمز در شکل جبهه پارتو (نقاط غیرمغلوب) و نقطه آبی جواب تک‌هدفه با بودجه ۱۲۰ میلیون ریالی است که روی جبهه قرار دارد.

همانطوریکه شکل (۲) نیز نشان می‌دهد جواب تک‌هدفه با بودجه ۱۲۰ میلیون ریالی (نقطه آبی) دقیقاً روی جبهه پارتو قرار دارد که نشان می‌دهد با بودجه مذکور، حداکثر کاهش ممکن حاصل شده است. هر نقطه روی جبهه پارتو نشان‌دهنده یک ترکیب بهینه است که در آن افزایش بیشتر کاهش انتشار تنها با افزایش هزینه امکان‌پذیر است. شیب

جبهه پارتو در نقاط اولیه تندتر است (بازده بالاتر) و به تدریج ملایم می‌شود (بازده نهایی کاهشی). به عنوان مثال، برای افزایش کاهش انتشار از ۰/۳ به ۰/۳۷ تن (۲۳ درصد افزایش)، هزینه باید از ۰/۱ به ۰/۱۲ میلیارد ریال برسد (۲۰ درصد افزایش). اما برای افزایش از ۰/۳۷ به ۰/۴۲ تن، هزینه باید از ۰/۱۲ به ۰/۱۴۴ برسد (۲۰ درصد افزایش دیگر در حالی که افزایش کاهش انتشار فقط ۱۳/۵ درصد است). این تحلیل به سیاست‌گذار کمک می‌کند تا بر اساس اولویت خود (تأکید بر کاهش هزینه یا کاهش کربن) نقطه مناسب روی جبهه پارتو را انتخاب کند. برای نمونه، اگر بودجه کمتر از ۱۲۰ میلیون ریال باشد، نقطه بهینه روی جبهه به سمت چپ و پایین حرکت می‌کند (مطابق با جدول ۹).

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان داد که ردپای کربن فعالیت هتلداری در ایران تا حد زیادی در خارج از مرز مستقیم واحدهای اقامتی شکل می‌گیرد؛ به گونه‌ای که ۸۶,۳ درصد از کل انتشار منتسب به فعالیت هتلداری از نوع غیرمستقیم و تنها ۱۳,۷ درصد مربوط به انتشار مستقیم است. این الگو نشان می‌دهد که اثرگذاری کربنی هتلداری را نمی‌توان صرفاً بر اساس مصرف انرژی و انتشارهای داخل هتل ارزیابی کرد، زیرا بخش مهمی از تقاضای ایجادشده توسط فعالیت هتل در قالب تولید برق، سوخت، مواد غذایی، منسوجات و خدمات حمل‌ونقل به سایر بخش‌های اقتصادی منتقل می‌شود. این یافته با نتایج Lenz et al (۲۰۱۸) درباره اهمیت انتشارهای نهفته در زنجیره تأمین گردشگری هم‌راستا است و با مطالعات Xia et al (۲۰۲۲) و Chen et al (۲۰۲۵) نیز سازگاری دارد که بر نقش انتشارهای خارج از مرز مستقیم فعالیت‌های گردشگری و هتلداری تأکید کرده‌اند. در مطالعه Zhang and Xia (۲۰۲۴) نیز استفاده از رویکرد داده‌ستانده نشان داد که عملکرد کربنی هتل‌ها به ساختار نهاده‌ها و روابط اقتصادی آنها وابسته است. بنابراین، نسبت بالای انتشار غیرمستقیم در مطالعه حاضر را می‌توان نشانه‌ای از وابستگی شدید فعالیت هتلداری ایران به شبکه تولید و تأمین بالادستی دانست. در نتیجه، کاهش انتشار هتلداری صرفاً از طریق اقداماتی مانند بهینه‌سازی مصرف برق، گاز یا سوخت در محل هتل، اگرچه ضروری است، اما برای کاهش بخش عمده ردپای کربن کافی نخواهد بود.

ترکیب انتشارهای غیرمستقیم نیز نشان داد که برق، صنایع غذایی، گاز طبیعی، منسوجات و حمل و نقل جاده‌ای مهم‌ترین بخش‌های ایجادکننده انتشارهای بالادستی هستند. در میان این بخش‌ها، سهم بالای برق و صنایع غذایی اهمیت دوگانه‌ای دارد؛ زیرا از یک سو برق به دلیل شدت انتشار و وابستگی فعالیت هتل به مصرف انرژی، سهم قابل توجهی در ردپای کربن ایجاد می‌کند و از سوی دیگر، صنایع غذایی از طریق تأمین نهاده‌های مورد نیاز هتل، بخشی از انتشار را در خارج از مرز فعالیت هتلداری ایجاد می‌کنند. اهمیت صنایع غذایی در یافته حاضر با نتایج Xia et al (۲۰۲۲) که صنایع غذایی را در زمره منابع مهم انتشارهای زنجیره تأمین گردشگری معرفی کرده‌اند، هم‌خوان است. همچنین، نتایج Zhang and Xia (۲۰۲۴) و Chen et al (۲۰۲۵) تأکید می‌کنند که ساختار نهاده‌ها و پیوندهای بین‌بخشی نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری ردپای کربن هتلداری دارند. با این حال، تفاوت در سهم نسبی بخش‌ها در مطالعه حاضر با مطالعات سایر کشورها را باید با توجه به ساختار اقتصادی، ترکیب انرژی، الگوی تأمین نهاده‌ها و شرایط تولید در ایران تفسیر کرد و نمی‌توان بدون داده‌های تفصیلی خرید هتل، سهم بخش غذا را مستقیماً به اقلام خاصی مانند گوشت قرمز یا برنج نسبت داد. از این منظر، یافته پژوهش حاضر بیش از آنکه صرفاً اهمیت یک نهاده خاص را نشان دهد، بر نقش ساختار زنجیره تأمین در تعیین ردپای کربن هتلداری تأکید دارد.

این نتایج همچنین نشان می‌دهد که تفاوت میان «مصرف مستقیم انرژی» و «ردپای کربن فعالیت هتلداری» از نظر سیاست‌گذاری اهمیت اساسی دارد. در صورتی که ارزیابی تنها به انتشارهای داخل هتل محدود شود، بخش قابل توجهی از انتشارهای ناشی از تقاضای هتل برای کالاها و خدمات نادیده گرفته خواهد شد. یافته حاضر از این جهت با چارچوب ارائه‌شده توسط Wiedmann and Minx (۲۰۰۸) درباره گستره ردپای کربن و نیز با نتایج Lenzen et al (۲۰۱۸) و Xia et al (۲۰۲۲) درباره اهمیت انتشارهای زنجیره تأمین سازگار است. بنابراین، انتشار غیرمستقیم را نباید صرفاً یک جزء حسابداری تکمیلی تلقی کرد، بلکه باید آن را بخشی از اثر واقعی تقاضای هتل بر اقتصاد و محیط‌زیست دانست. در چنین شرایطی، اقداماتی مانند خرید کم کربن، همکاری با تأمین‌کنندگان، کاهش ضایعات غذایی و حرکت به سمت برق با شدت انتشار کمتر می‌توانند در کنار اقدامات مستقیم مدیریت انرژی، دامنه مداخلات کربن‌زدایی هتلداری را گسترش دهند.

پاسخ به سؤال دوم پژوهش، یعنی شناسایی بخش‌های اولویت‌دار برای مداخله، نیز نشان داد که «بیشترین انتشار» لزوماً معادل «بیشترین اولویت سرمایه‌گذاری» نیست. نتایج برنامه‌ریزی خطی نشان داد که در بودجه پایه ۰,۱۲۰ میلیارد ریال، بخش غذا و برق در ترکیب بهینه قرار گرفتند، در حالی که برای گاز، منسوجات و حمل‌ونقل تخصیص مستقیمی در راه‌حل پایه مشاهده نشد. این نتیجه به معنای کم‌اهمیت بودن این بخش‌ها نیست؛ بلکه نشان می‌دهد اولویت مداخله حاصل هم‌زمانی میزان انتشار، هزینه اقدام، ظرفیت فنی کاهش انتشار و محدودیت بودجه است. به بیان دیگر، تحلیل ردپای کربن مشخص می‌کند «انتشار کجا ایجاد می‌شود»، اما مدل بهینه‌سازی مشخص می‌کند «با منابع موجود، کجا مداخله اثربخش‌تر است». این تمایز یکی از مهم‌ترین نتایج تحلیلی پژوهش حاضر است و پیوند میان شناسایی نقاط داغ زنجیره تأمین و تصمیم‌گیری درباره تخصیص منابع را از سطح توصیف انتشار به سطح تصمیم‌گیری مدیریتی منتقل می‌کند.

نتایج تحلیل حساسیت بودجه نیز نشان داد که با افزایش منابع در دسترس، ترکیب بهینه اقدامات به صورت مرحله‌ای تغییر می‌کند. در بودجه پایین‌تر، بخش غذا به دلیل هزینه کمتر و ظرفیت کاهش بالاتر، سهم مهمی در ترکیب بهینه دارد؛ با نزدیک شدن این بخش به سقف فنی کاهش، ظرفیت تخصیص منابع به آن محدود شده و برق و سپس سایر بخش‌ها در ترکیب راه‌حل اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. بنابراین، تغییرات مشاهده‌شده را نباید به عنوان کاهش بازده نهایی به معنای یک رابطه غیرخطی تفسیر کرد؛ زیرا مدل حاضر یک مدل برنامه‌ریزی خطی با محدودیت‌های فنی است و تغییر بازده ظاهری عمدتاً از رسیدن متغیرها به حدود فنی و تغییر ترکیب بهینه ناشی می‌شود. در واقع، ساختار مسئله باعث می‌شود با عبور از برخی سطوح بودجه، منابع به سمت گزینه‌هایی هدایت شوند که هنوز ظرفیت کاهش انتشار آنها فعال است. این نتیجه از نظر سیاست‌گذاری اهمیت دارد، زیرا نشان می‌دهد افزایش بودجه کاهش انتشار بدون توجه به ظرفیت فنی اقدامات، الزاماً به افزایش متناسب کاهش انتشار منجر نمی‌شود.

تحلیل جبهه پارتو نیز این موضوع را از زاویه دیگری تأیید کرد. رابطه میان هزینه و کاهش انتشار در تمام سطوح یکسان نیست و افزایش بودجه در سطوح مختلف، کاهش انتشار متفاوتی ایجاد می‌کند. بنابراین، جبهه پارتو را می‌توان به عنوان ابزاری برای نشان دادن هزینه فرصت انتخاب سطوح مختلف کاهش انتشار در نظر گرفت، نه صرفاً یک نمودار

بهینه‌سازی. برای مثال، افزایش کاهش انتشار از حدود ۰,۳۰ به ۰,۳۷ تن CO_2 نیازمند افزایش هزینه از ۰,۱۰ به ۰,۱۲ میلیارد ریال است، در حالی که افزایش بیشتر کاهش انتشار از ۰,۳۷ به حدود ۰,۴۲ تن CO_2 به افزایش هزینه تا ۰,۱۴۴ میلیارد ریال نیاز دارد. در نتیجه، تصمیم‌گیرنده می‌تواند بر اساس منابع در دسترس و سطح مطلوب کاهش انتشار، نقطه مناسب روی جبهه پارتو را انتخاب کند. از این منظر، نوآوری مدل حاضر در استفاده از جبهه پارتو صرفاً نمایش مجموعه‌ای از جواب‌ها نیست، بلکه تبدیل رابطه هزینه-کاهش انتشار به اطلاعات قابل استفاده برای تصمیم‌گیری درباره سطح مداخله است. این رویکرد با جهت‌گیری مطالعات بهینه‌سازی در حوزه گردشگری و زنجیره تأمین، از جمله مطالعات خیرخواه و همکاران (۱۳۹۸) و نخعی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۳)، هم‌راستا است؛ با این تفاوت که در پژوهش حاضر معیار اصلی تخصیص منابع، ردپای کربن کمی شده بخش‌های زنجیره تأمین هتلداری است.

مقایسه نتایج الگوریتم‌ها نیز نشان داد که برای ساختار خطی و نسبتاً کوچک مسئله حاضر، برنامه‌ریزی خطی و حل با روش سیمپلکس، پاسخ مناسب‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک فراهم کرده است. مقدار تابع هدف به دست آمده از الگوریتم ژنتیک حدود ۱۳ درصد کمتر از جواب سیمپلکس بود. این تفاوت را نمی‌توان به عنوان برتری عمومی سیمپلکس بر الگوریتم‌های فراابتکاری تلقی کرد؛ بلکه بیشتر باید آن را ناشی از ساختار مشخص مسئله حاضر دانست. هنگامی که تابع هدف، محدودیت‌ها و روابط میان متغیرها خطی باشند، برنامه‌ریزی خطی می‌تواند مستقیماً ساختار ریاضی مسئله را مورد استفاده قرار دهد، در حالی که الگوریتم ژنتیک یک روش جست‌وجوی تقریبی و تصادفی است و کیفیت جواب آن به تنظیم پارامترها و فرایند تکامل جمعیت وابسته است. بنابراین، استفاده از الگوریتم ژنتیک در پژوهش حاضر بیشتر نقش اعتبارسنجی و مقایسه روش حل را دارد و نتیجه آن نباید به صورت حکم کلی درباره مناسب‌تر بودن یکی از روش‌ها برای تمام مسائل کاهش انتشار تفسیر شود. این نتیجه همچنین با منطق مطالعات روش‌شناختی بهینه‌سازی، از جمله مقایسه روش‌های دقیق و فراابتکاری، سازگار است و نشان می‌دهد انتخاب الگوریتم باید بر اساس ساختار ریاضی مسئله انجام شود.

نتایج تحلیل حساسیت ضرایب انتشار نیز اهمیت ساختار انرژی ایران را برجسته کرد. تغییر ۲۰ درصدی ضریب انتشار برق نسبت به مقدار پایه، اثر بیشتری بر ردپای کربن کل نسبت به

تغییر مشابه ضریب انتشار گاز طبیعی ایجاد کرد. این نتیجه با سهم بالاتر برق در انتشارهای منتسب به فعالیت هتلداری مرتبط است و نشان می‌دهد که شدت انتشار حامل‌های انرژی تنها به مقدار مصرف آنها وابسته نیست، بلکه به ضریب انتشار مرتبط با ساختار تولید انرژی نیز بستگی دارد. از این رو، استفاده از ضرایب انتشار محلی و به‌روز برای ایران می‌تواند در مطالعات آینده اهمیت زیادی داشته باشد. این موضوع به‌ویژه در چارچوب رویکرد داده‌ستانده اهمیت دارد، زیرا تغییر در ضریب انتشار یک بخش کلیدی می‌تواند نه تنها انتشار مستقیم همان بخش، بلکه برآورد ردپای کربن منتسب به تقاضای بخش هتلداری را نیز تغییر دهد.

از منظر سیاست‌گذاری، مجموع این یافته‌ها ضرورت حرکت از رویکرد محدود به مدیریت مصرف انرژی داخل هتل به سمت مدیریت کربن در سراسر زنجیره تأمین را نشان می‌دهد. اقدامات مستقیم مانند افزایش بهره‌وری تجهیزات، مدیریت مصرف برق و گاز و کاهش مصرف انرژی همچنان ضروری هستند، اما با توجه به سهم بالای انتشارهای غیرمستقیم، سیاست‌های کاهش انتشار باید به تعامل هتل با تأمین‌کنندگان نیز گسترش یابد. در این چارچوب، استفاده از برق با شدت انتشار کمتر، بهبود بهره‌وری انرژی، خرید کالاها و خدمات از تأمین‌کنندگان کم‌کربن، کاهش ضایعات غذایی و ایجاد سازوکارهای همکاری با بخش‌های تأمین‌کننده می‌تواند در کنار اقدامات داخلی هتل مورد توجه قرار گیرد. اهمیت این رویکرد با نتایج Zhang and Xia, Xia et al. (2022) (۲۰۲۴) و Chen et al. (۲۰۲۵) درباره نقش پیوندهای بین‌بخشی در انتشارهای گردشگری و هتلداری هم‌خوان است. با این حال، نتایج بهینه‌سازی مطالعه حاضر نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری نباید صرفاً بر اساس رتبه انتشار بخش‌ها انجام شود، بلکه باید هزینه، ظرفیت فنی و میزان کاهش قابل دستیابی نیز هم‌زمان در نظر گرفته شود.

بر مبنای نتایج پژوهش، می‌توان یک فرایند عملی سه‌مرحله‌ای برای حمایت از تصمیم‌گیری کربن‌زدایی در هتلداری پیشنهاد کرد. در مرحله نخست، ردپای کربن فعالیت هتل با در نظر گرفتن انتشارهای مستقیم و غیرمستقیم محاسبه و نقاط داغ زنجیره تأمین شناسایی می‌شوند. در مرحله دوم، برای بخش‌های دارای اولویت، اقدامات کاهش انتشار بر اساس هزینه، ظرفیت فنی و میزان کاهش قابل دستیابی تعریف می‌شوند. در مرحله سوم، ترکیب اقدامات با استفاده از مدل بهینه‌سازی و تحت بودجه‌های مختلف تعیین و در صورت

تغییر قیمت‌ها، ضرایب انتشار یا ظرفیت فنی، مدل مجدداً اجرا می‌شود. این فرایند می‌تواند فاصله میان حسابداری کربن و تصمیم‌گیری اجرایی را کاهش دهد و اطلاعات حاصل از تحلیل داده‌ستانده را به مبنایی برای تخصیص منابع تبدیل کند.

با وجود این، نتایج پژوهش باید با توجه به محدودیت‌های آن تفسیر شود. نخست، استفاده از جدول داده‌ستانده ۳۸ بخشی امکان تفکیک دقیق برخی فعالیت‌های مرتبط با هتلداری، به‌ویژه تفکیک هتل از فعالیت‌های مشابه مانند رستوران‌ها، را محدود می‌کند. دوم، استفاده از ضرایب استاندارد انتشار IPCC 2019 اگرچه امکان مقایسه و محاسبه منسجم را فراهم می‌کند، اما ممکن است تمام ویژگی‌های محلی ساختار انرژی و فناوری ایران را منعکس نکند. سوم، داده‌های مورد استفاده مربوط به سال ۱۴۰۰ بوده و بنابراین تغییرات ساختاری و قیمتی سال‌های بعد را پوشش نمی‌دهد. چهارم، برخی پارامترهای مدل بهینه‌سازی، از جمله هزینه اقدامات و حدود فنی کاهش انتشار، می‌توانند در طول زمان و در شرایط مختلف تغییر کنند. همچنین، جبهه پارتو در این مطالعه بر متغیرهایی متمرکز است که در راه‌حل پایه فعال بوده‌اند و برای بررسی هم‌زمان هر پنج متغیر در یک چارچوب چندهدفه کامل، استفاده از روش‌هایی مانند NSGA-II در مطالعات آینده می‌تواند مناسب باشد.

بر این اساس، پژوهش‌های آینده می‌توانند با استفاده از داده‌های اولیه هتل‌ها، ضرایب انتشار محلی و به‌روز، جداول داده‌ستانده با تفکیک بخشی بیشتر و در صورت امکان چارچوب‌های داده‌ستانده چندمنطقه‌ای، دقت برآورد ردپای کربن را افزایش دهند. همچنین، ترکیب سناریوهای مختلف قیمت انرژی، تغییر ضرایب انتشار، فناوری‌های کاهش مصرف و محدودیت‌های بودجه‌ای می‌تواند امکان ارزیابی پویاتر سیاست‌های کربن‌زدایی را فراهم کند. استفاده از داده‌های واقعی خرید هتل‌ها نیز می‌تواند امکان تفکیک دقیق‌تر گروه‌های غذایی، منسوجات، حمل‌ونقل و سایر نهاده‌ها و در نتیجه طراحی مداخلات هدفمندتر را فراهم سازد.

در مجموع، پاسخ به سه سؤال پژوهش نشان می‌دهد که ردپای کربن فعالیت هتلداری در ایران ماهیتی عمدتاً زنجیره‌ای دارد و بخش غالب آن در خارج از مرز مستقیم هتل و در ارتباط با فعالیت سایر بخش‌های اقتصادی ایجاد می‌شود. شناسایی برق و صنایع غذایی به‌عنوان مهم‌ترین نقاط داغ نشان داد که بیشترین انتشار لزوماً به معنای اولویت مطلق برای

سرمایه گذاری نیست و اولویت مداخله باید بر اساس ترکیب انتشار، هزینه و ظرفیت کاهش تعیین شود. همچنین، تحلیل بهینه سازی نشان داد که در شرایط محدودیت بودجه، می توان با تخصیص هدفمند منابع، ترکیبی از اقدامات را انتخاب کرد که نسبت به تخصیص غیرهدفمند منابع، مبنای روشن تری برای تصمیم گیری فراهم می کند. در این چارچوب، مهم ترین پیام پژوهش آن است که کربن زدایی هتلداری نباید صرفاً به کاهش مصرف انرژی در داخل هتل محدود شود، بلکه باید از اندازه گیری ردپای کربن و شناسایی نقاط داغ زنجیره تأمین به تخصیص بهینه منابع برای مداخله گسترش یابد. نوآوری اصلی پژوهش نیز در همین پیوند میان اندازه گیری ردپای کربن مستقیم و غیرمستقیم، شناسایی نقاط داغ زنجیره تأمین و تعیین ترکیب بهینه اقدامات کاهش انتشار تحت محدودیت بودجه قرار دارد؛ پیوندی که می تواند حسابداری کربن را از یک ابزار صرفاً اندازه گیری به ابزاری برای پشتیبانی کمی از تصمیم گیری کربن زدایی در صنعت هتلداری ایران تبدیل کند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ گونه تضاد منافعی در ارتباط با این پژوهش ندارند. این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی از سوی سازمان های تأمین مالی عمومی، خصوصی یا غیرانتفاعی انجام شده است.

سپاسگزاری

نویسندگان از تمامی افرادی که در مراحل انجام، تحلیل و نگارش این مقاله به صورت علمی و غیرمالی یاری رسان بوده اند، قدردانی می کنند.

ORCID

Iraj Teimouri



<https://orcid.org/0000-0002-3167-5583>

Mohammad Nemati



<https://orcid.org/0000-0003-2054-8535>

منابع

- ابراهیمی، م.، تاجزاده نمین، ا.، و محمدیان محمودجیق، ن. (۱۳۹۴). گونه‌شناسی خدمات هتل‌ها برای آژانس‌های مسافرتی، مطالعه موردی: هتل‌های پنج‌ستاره شهر مشهد. *برنامه‌ریزی و توسعه گردشگری*، ۴(۱۳)، ۸-۲
<https://doi.org/10.22059/jut.2015.55833>
- اندایش، ی.، صادقی، س. ک.، کریمی تکانلو، ز.، متفکر آزاد، م. ع.، و اصغریور، ح. (۱۳۹۵). سنجش ردپای بوم‌شناختی کربن دهک‌های خانوارهای شهری و روستایی در ایران با رهیافت ماتریس حسابداری اجتماعی (SAM). *پژوهش‌های اقتصادی ایران*، ۲۱(۶۸)، ۱۶۳-۲۰۶
<https://doi.org/10.22054/econj.2016.1234>
- بابائی، ی. و خواجه‌ای، ش. (۱۴۰۵). نقش مسئولیت اجتماعی هتل در شکل‌گیری رفتار سبز کارکنان (مورد مطالعه: هتل‌های چهارستاره و پنج‌ستاره شهر تبریز). *مطالعات مدیریت گردشگری*، ۲۱(۷۳)، ۲۰۵-۲۵۸
<https://doi.org/10.22054/tms.2025.88163.3107>
- بابائی، ی. و فانی، م. (۱۴۰۰). اثر مدیریت منابع انسانی سبز بر رفتار شهروندی زیست‌محیطی و رفتارهای حامی محیط زیست کارکنان. *مطالعات مدیریت گردشگری*، ۱۶(۵۶)، ۲۱۱-۲۴۹
<https://doi.org/10.22054/tms.2021.50812.2286>
- تیزرو، ع. (۱۴۰۴). اولویت‌بندی عوامل زیربنایی چابک‌سازی زنجیره تأمین در صنعت گردشگری شهر اصفهان. *مطالعات مدیریت گردشگری*، ۲۰(۶۹)، ۱-۴۰
<https://doi.org/10.22054/tms.2024.81659.2973>
- جعفری مهرآبادی، م.، امامی، ف.، و سجودی، م. (۱۳۹۵). بررسی مؤلفه‌های سرمایه اجتماعی مؤثر بر رضایتمندی گردشگران (مطالعه موردی: شهر ماسوله). *برنامه‌ریزی و توسعه گردشگری*، ۱۵(۱۸)، ۷۳-۹۶.
- جعفری مهرآبادی، م.، و رخساری، ح. (۱۳۹۷). تحلیل فضایی و مکان‌یابی هتل‌ها در ساختار شهری (مطالعه موردی: شهر تبریز). *برنامه‌ریزی و توسعه گردشگری*، ۷(۲۶)، ۱۰۱-۱۱۹
<https://doi.org/10.22111/jtd.2018.4567>
- خدابخشی گرگانی، ف.، ضیائی، م.، تقوی‌فرد، م. و ترکستانی، م. (۱۴۰۱). مدلی برای مدیریت ریسک در صنعت هتلداری ایران. *مطالعات مدیریت گردشگری*، ۱۷(۵۸)، ۳۹-۷۱
<https://doi.org/10.22054/tms.2022.66853.2702>
- خدادادی، ا.، تیموری، ا.، و اصغری زمانی، ا. (۱۴۰۲). کنترل و پایش ردپای کربن گامی در راستای توسعه پایدار شهری (نمونه مورد مطالعه: شهر تبریز). *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۳(۱)، ۹۱-۱۰۵
<https://doi.org/10.22111/gep.2022.4567>

خیرخواه، آ.، معماریان، ه.، و تاج‌بخش، س. م. (۱۳۹۸). مقایسه الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی برای حل مسائل بهینه‌سازی کاربری اراضی حوزه‌های آبخیز. *مجله مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۱(۱)، ۲۵۲-۲۶۳.
<https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2019.118435>

رضی، د.، اسفندیان، آ.، و نیکدل، ن. (۱۳۹۴). گردشگری و مدیریت مصرف انرژی (مطالعه‌ی موردی: اقامتگاه‌های گردشگری استان مازندران). *برنامه‌ریزی و توسعه گردشگری*، ۴(۱۲)، ۱۲۶-۱۴۴.

سعیدی، جمال‌الدین و سعیدی، عفت (۱۴۰۴). تحلیل راهکارهای صرفه‌جویی مصرف برق در هتل‌ها و نقش آن در ارتقاء پایداری محیط زیستی و جذب مشتری. *چهارمین رویداد انرژی ایده‌پردازی و فرهنگ‌سازی مصرف برق در مشترکان عمومی و تجاری*، مشهد. <https://civilica.com/doc/2665198>

سهرابی، م.، راه‌چمنی، ا.، و ثانوی‌فرد، ر. (۱۴۰۳). طراحی و اعتباریابی مدل خشنودی (شعف) مشتریان در صنعت هتلداری: پژوهش ترکیبی. *مطالعات مدیریت گردشگری*، ۱۹(۶۶)، ۲۳۱-۲۷۰.
<https://doi.org/10.22054/tms.2024.79395.2931>

ضیایی، محمود، قادری، اسماعیل و سلطانی، المیرا. (۱۳۹۵). بررسی عوامل مؤثر بر تمایل به رفتارهای کم‌کربن در گردشگران. *فصلنامه مطالعات مدیریت گردشگری*، ۱۱(۳۵)، ۱۹-۴۰.
<https://doi.org/10.22054/tms.2017.7078>

ضیائی، م.، محمودزاده، س. م.، و شاه‌ی، ط. (۱۳۹۶). اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر پیاده‌سازی مدیریت زنجیره تأمین سبز در صنعت گردشگری. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۱۵(۴۶)، ۱۹-۳۴.
<https://doi.org/10.22111/gdij.2017.3028>

فهادنژاد، م.، صابری، ع.، و باقرنژاد حمزه کلایی، م. ا. (۱۴۰۲). شناسایی و تبیین مصادیق سبز شویی در صنعت هتلداری ایران. *فصلنامه مطالعات مدیریت گردشگری*، ۱۸(۶۱)، ۳۵-۶۴.
<https://doi.org/10.22054/tms.2023.72624.2807>

کاظمی قهفرخی، سیده حمیده، نعمتی، ولی، معدنی، جواد و سیدموسوی، میرحمید (۱۴۰۴). تدوین سناریوهای کاربرد فناوری‌های سبز در گردشگری کم‌کربن. *فصلنامه مطالعات مدیریت گردشگری*، ۲۰(۷۰)، ۲۸۵-۳۲۶.
<https://doi.org/10.22054/tms.2025.83694.3024>

کروبی، م.، ابراهیمی، م.، و قاسم‌پور، ف. (۱۳۹۳). بررسی رابطه میان رضایت مشتری و وفاداری در صنعت هتلداری (مطالعه موردی هتل‌های ۴ و ۵ ستاره شهر شیراز). *برنامه‌ریزی و توسعه گردشگری*، ۳(۸)، ۶۷-۸۵.
<https://doi.org/10.22059/jut.2014.53158>

مرکز آمار ایران. (۱۴۰۲). *جدول داده-ستانده متقارن ۳۸ بخشی کشور به قیمت پایه سال ۱۴۰۰*. تهران: مرکز آمار ایران.

مزروعی نصرآبادی، ا. و محمدی‌پور، ا. (۱۴۰۲). عوامل مؤثر بر تاب‌آوری مالی زنجیره تأمین گردشگری سلامت در شرایط بحران. *مدیریت بحران*، ۱۲(۲۳)، ۱۵۱-۱۶۴.

میرفخرالدینی، ف. ا.، ابراهیمی، م.، و جندقی اردکانی، ف. (۱۴۰۳). شناسایی و تحلیل اهمیت-عملکرد شاخص‌های مؤثر بر عملکرد مالی در هتل‌های استان یزد. *مطالعات مدیریت گردشگری*، ۱۹(۶۵)، ۹۹-۱۳۴.
<https://doi.org/10.22054/tms.2024.76171.2883>

میرفخرالدینی، فائزه السادات و چرخکار، شهرزاد (۱۴۰۱). ارائه راهکارهای اجرای زنجیره تأمین سبز در صنعت هتلداری در ایران. دومین کنفرانس بین‌المللی معماری، عمران، شهرسازی، محیط‌زیست و افق‌های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب، تبریز. <https://civilica.com/doc/1613187>

نخعی‌نژاد، م.، محزون، م.، و سالکی، م. (۱۴۰۳). ارائه مدل زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن هزینه انتشار کربن در بخش‌های حمل‌ونقل و نگهداری در وسایل نقلیه ناهمگن. پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، (۲۴)، ۷۷-۹۱. <https://doi.org/10.22084/ier.2024.29726.2179>

نیک‌بین، م. و بی‌شمی، ب. (۱۴۰۴). نقش شخصی‌سازی و سفارشی‌سازی خدمات در صنعت هتلداری ایران بر اساس دیدگاه مدیران؛ مدل داده‌بنیاد. مطالعات مدیریت گردشگری، ۲۰(۷۱)، ۲۵۲-۲۰۷. <https://doi.org/10.22054/tms.2025.84689.3045>

وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی. (۱۴۰۲). *ترازنامه انرژی سال ۱۴۰۰ ایران*. تهران: وزارت نیرو.

یزدان پناه، ز.، جعفری مهرآبادی، م.، و شکرگزار، ا. (۱۳۹۹). بررسی عوامل مؤثر بر مطلوبیت پیاده‌راه‌ها با رویکرد گردشگری شهری (مطالعه موردی: پیاده‌راه محدوده مرکزی شهر رشت). برنامه‌ریزی و توسعه گردشگری، ۹(۳۲)، ۷۱-۸۶. <https://doi.org/10.22080/JTPD.2020.17182.3138>

References

- Aviso, K. B., Foo, D. C. Y., Migo-Sumagang, M. V., & Tan, R. R. (2025). A fuzzy linear program for optimal allocation of carbon credits in multi-product firms. *Clean Engineering and Technology*, 27, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101009>.
- Berkelaar, M., et al. (2023). *lpSolve: Interface to 'Lp_solve' version 5.5 to solve linear/integer programs* (R package Version 5.6.19). <https://cran.r-project.org/package=lpSolve>
- Bertolini, M., Dutillo, P., & Lisi, F. (2025). Accounting carbon emissions from electricity generation: A review and comparison of emission factor-based methods. *Applied Energy*, 392, 125992. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125992>
- Chen, X., Yang, S., Yang, Y., Shuai, C., & Zhao, B. (2025). Low-carbon hospitality development: Tracking the global carbon emission

- embodied in trade networks. *Sustainable Development*, 33(5), 7025–7037. <https://doi.org/10.1002/sd.3509>
- IEA (International Energy Agency). (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris: OECD Publishing. <https://DOI.org/10.1787/c8328405-en>
- International Organization for Standardization. (2018). *Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification* (ISO 14067:2018).
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- Lenzen, M., Sun, Y. Y., Faturay, F., Ting, Y. P., Geschke, A., & Malik, A. (2018). The carbon footprint of global tourism. *Nature Climate Change*, 8(6), 522–528. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0141-x>
- Li, F., Sastri, R., Edziah, B. K., & Setiyawan, A. (2025). Exploring the inter-sectoral and inter-regional effect of tourism industry in Indonesia based on input-output framework. *Kybernetes*, 54(11), 6658–6686. <https://doi.org/10.1108/K-11-2023-2404>
- Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input-output analysis: Foundations and extensions* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 2024.03.1) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Saltelli, A., Aleksankina, K., Becker, W., Fennell, P., Ferretti, F., Holst, N., ... & Wu, Q. (2019). Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. *Environmental Modelling & Software*, 114, 29–39. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.11359>
- Scrucca, L. (2013). GA: A package for genetic algorithms in R. *Journal of Statistical Software*, 53 (4), 1–37.
- Sun, Y. Y., Faturay, F., Lenzen, M., Gössling, S., & Higham, J. (2024). Drivers of global tourism carbon emissions. *Nature Communications*, 15, 10384. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54582-7>
- Turlach, B. A., & Weingessel, A. (2019). *quadprog: Functions to solve quadratic programming problems* (R package Version 1.5-8). <https://cran.r-project.org/package=quadprog>
- UNWTO (United Nations World Tourism Organization). (2023). *Tourism and Climate Change: Stocktake of the Sector's Global Emissions*. Madrid: UNWTO.
- Vanderbei, R. J. (2016). *Linear programming: Foundations and extensions* (4th ed.). Springer.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer.
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of carbon footprint. In C. C. Pertsova (Ed.), *Ecological economics research trends* (pp. 1–11). Nova Science Publishers.

- World Bank Group. (2025). *Tourism*. Retrieved from <https://www.worldbank.org/en/topic/tourism>
- WTTC. (2025). *Travel & tourism economic impact 2025*. WTTC.
- Xia, B., Dong, S., Li, Z., Zhao, M., Sun, D., Zhang, W., & Li, Y. (2022). Eco-Efficiency and Its Drivers in Tourism Sectors with Respect to Carbon Emissions from the Supply Chain: An Integrated EEIO and DEA Approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(11), 6951. <https://doi.org/10.3390/ijerph19116951>
- Xia, B., Dong, S., Li, Z., Zhao, M., Sun, D., Zhang, W., & Li, Y. (2022). Eco-efficiency and its drivers in tourism sectors with respect to carbon emissions from the supply chain: An integrated EEIO and DEA approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(11), 6951. <https://doi.org/10.3390/ijerph19116951>
- Zhang, J., & Xia, B. (2024). Carbon emissions and their efficiency in tourist hotels in China based on the input-output method and super-SBM model. *Sustainability*, 16(21), 9489. <https://doi.org/10.3390/su16219489>

References (In Persian)

- Andaiesh, Y., Sadeghi, S. K., Karimi Takanlu, Z., Motefaker Azad, M. A., & Asgharpour, H. (2016). Assessing the carbon ecological footprint of urban and rural household income groups in Iran using the Social Accounting Matrix (SAM) approach. *Iranian Economic Research*, 21(68), 163-206. <https://doi.org/10.22054/ecoj.2016.1234>
- Babaei, Y., & Fani, M. (2021). The effect of green human resource management on environmental citizenship behavior and pro-environmental behaviors of employees. *Tourism Management Studies*, 16(56), 211-249. <https://doi.org/10.22054/tms.2021.50812.2286>
- Babaei, Y., & Khajeyi, S. (2026). The role of hotel social responsibility in shaping employees' green behavior (Case study: Four- and five-star hotels in Tabriz). *Tourism Management Studies*, 21(73), 205-258. <https://doi.org/10.22054/tms.2025.88163.3107>
- Center of Statistics of Iran. (2023). *The symmetric input-output table of Iran (38 sectors, 2021)*. Tehran: Center of Statistics of Iran. (In Persian)
- Ebrahimi, M., Tajzadeh Namin, A., & Mohammadian Mahmoudjigh, N. (2015). Service typology of hotels for travel agencies: A case study of five-star hotels in Mashhad. *Journal of Tourism Planning and Development*, 4(13), 2-8. <https://doi.org/10.22059/jut.2015.55833>
- Farhadinejad, M., Saberi, A., & Baghernejad Hamze Kolaie, M. E. (2023). Identification and explanation of instances of greenwashing in the Iranian hospitality industry. *Tourism Management Studies*, 18(61), 35-64. <https://doi.org/10.22054/tms.2023.72624.2807>
- Jafari Mehrabadi, M., & Rokhsari, H. (2018). Spatial analysis and site selection of hotels in urban structure: A case study of Tabriz. *Journal of Tourism Planning and Development*, 7(26), 101-119. <https://doi.org/10.22111/jtd.2018.4567>

- Jafari Mehrabadi, M., Emami, F., & Sajoudi, M. (2016). Investigation of social capital components affecting tourists' satisfaction: A case study of Masouleh. *Journal of Tourism Planning and Development*, 5(18), 73-96.
- Karubi, M., Ebrahimi, M., & Ghasempour, F. (2014). The relationship between customer satisfaction and loyalty in the hotel industry: A case study of four- and five-star hotels in Shiraz. *Journal of Tourism Planning and Development*, 3(8), 67-85. <https://doi.org/10.22059/jut.2014.53158>
- Kazemi Ghahfarokhi, S. H., Nemati, V., Madani, J., & Seyed Mousavi, M. H. (2025). Developing scenarios for the application of green technologies in low-carbon tourism. *Tourism Management Studies*, 20(70), 285-326. <https://doi.org/10.22054/tms.2025.83694.3024>
- Kheirikhah, A., Memarian, H., & Tajbakhsh, S. M. (2019). Comparison of genetic algorithm and linear programming for solving land-use optimization problems in watersheds. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 11(1), 252-263. <https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2019.118435>
- Khodabakhshi Gorgani, F., Ziaee, M., Taghavifard, M., & Torkestani, M. (2022). A risk management model in Iran's hotel industry. *Tourism Management Studies*, 17(58), 39-71. <https://doi.org/10.22054/tms.2022.66853.2702>
- Khodadadi, A., Teimouri, A., & Asghari Zamani, A. (2023). Carbon footprint monitoring and control as a step toward sustainable urban development: A case study of Tabriz. *Geography and Environmental Sustainability*, 13(1), 91-105. <https://doi.org/10.22111/gep.2022.4567>
- Mazrouei Nasrabadi, E., & Mohammadipour, E. (2023). Factors affecting financial resilience of health tourism supply chain in crisis conditions. *Crisis Management*, 12(23), 151-164.
- Ministry of Energy, Deputy for Electricity and Energy Affairs. (2023). *Iran energy balance sheet 2021*. Tehran: Ministry of Energy.
- Mirfakhreddini, F. E., & Charkhkar, S. (2022). Providing solutions for implementing green supply chain in the Iranian hospitality industry. *The Second International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning, Environment and Horizons of Islamic Art in the Statement of the Second Step of the Revolution, Tabriz, Iran*. <https://civilica.com/doc/1613187>
- Mirfakhreddini, F. E., Ebrahimi, M., & Jandaghi Ardakani, F. (2024). Identifying and analyzing the importance-performance of indicators affecting the financial performance of hotels in Yazd Province. *Tourism Management Studies*, 19(65), 99-134. <https://doi.org/10.22054/tms.2024.76171.2883>
- Nakhaeinejad, M., Mahzon, M., & Saleki, M. (2024). A green supply chain model considering carbon emission costs in transportation and maintenance with heterogeneous vehicles. *Industrial Engineering Research in Production Systems*, (24), 77-91. <https://doi.org/10.22084/ier.2024.29726.2179>

- Nikbin, M., & Beishami, B. (2025). The role of personalization and customization of services in the Iranian hotel industry based on the perspective of managers; Grounded theory model. *Tourism Management Studies*, 20(71), 207-252. <https://doi.org/10.22054/tms.2025.84689.3045>
- Razi, D., Esfandian, A., & Nikdel, N. (2015). Tourism and energy consumption management (Case study: Tourist residences in Mazandaran Province). *Journal of Tourism Planning and Development*, 4(12), 126-144.
- Saidi, J., & Saidi, E. (2025). Analysis of electricity saving strategies in hotels and its role in promoting environmental sustainability and attracting customers. *The Fourth Energy Event on Ideation and Culture Building of Electricity Consumption in General and Commercial Subscribers, Mashhad, Iran*. <https://civilica.com/doc/2665198>
- Sohrabi, M., Rahchamani, A., & Sanavifard, R. (2024). Designing and validating a model of customer delight in the hotel industry: Mixed methods research. *Tourism Management Studies*, 19(66), <https://doi.org/10.22054/tms.2024.79395.2931>
- Tizro, A. (2025). Prioritizing the underlying factors of supply chain agility in the tourism industry of Isfahan city. *Tourism Management Studies*, 20(69), 1-40. <https://doi.org/10.22054/tms.2024.81659.2973>
- Yazdan Panah, Z., Jafari Mehrabadi, M., & Shokrgozar, A. (2020). Factors affecting the desirability of sidewalks with urban tourism approach (Case study: Central sidewalk of Rasht city). *Journal of Tourism Planning and Development*, 9(32), 71-86. <https://doi.org/10.22080/JTPD.2020.17182.3138>
- Ziyaei, M., & Soltani, E. (2016). Exploring Factors Affecting the tourists' Low Carbon Behavioral Intentions. *Tourism Management Studies*, 11(35), 19-40. <https://doi.org/10.22054/tms.2017.7078>
- Ziyaei, M., Mahmoudzadeh, S. M., & Shahi, T. (2017). Prioritizing the effective factors on the implementation of green supply chain management in the tourism industry. *Journal of Geography and Development*, 15(46), 19-34. <https://doi.org/10.22111/gdij.2017.3028>