Ind. Manag. Persp. 2026, 16(2), 277-302; doi: 10.48308/JIMP.16.2.277

Industrial Management Perspective

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Developing a location -pricing model for smart lockers in a last-mile logistics network

Zahra Mohseniyan Zonuzi*
Gholam Reza Nasiri**

Extended Abstract

Introduction and purpose. The growth of e-commerce and rising costs in the final stage of the supply chain have prompted postal and logistics companies to seek solutions that increase productivity and reduce costs. These developments have caused policymakers in the supply chain to pay special attention to the final stage of goods delivery. This stage is considered one of the critical factors in increasing intra-city traffic and has a direct impact on the performance of urban logistics. One relatively new logistics solution is the use of smart delivery lockers as an alternative to home delivery. Using these lockers reduces the need for additional trips and optimises transportation in the final stage of distribution, although costs arising from customers travelling to the lockers may also be imposed on the system. The location of these lockers and the price of this service affect customer choice and preference for home delivery. The present study therefore aims to develop an integrated location-pricing model for urban smart lockers.

Methodology. This study develops an integrated location-pricing model for smart lockers in an urban distribution network, modelling locker location decisions and delivery service pricing simultaneously and at the same level. This approach is primarily driven by the interdependence of these decisions in final delivery networks. The location of lockers directly impacts customer reach, demand coverage and capacity utilisation levels, while service pricing determines demand and the profitability of each location. Therefore, making these decisions separately can result in suboptimal economic and operational solutions. Consequently, decisions regarding the selection of locker installation locations, the determination of service prices at each site and the allocation of customer demand are made simultaneously to accurately reflect the interaction between the spatial and economic aspects of the network. In the proposed model, demand is price-sensitive in order to examine the direct effect of pricing policies on customer behaviour and demand absorption. The price of each service is set within a controlled range and a price deviation constraint is applied between sites to maintain coordination at the network level.

Received: May. 20, 2026; Revised: Jul. 11, 2026; Accepted: Aug. 08, 2026; Published Online: Aug. 20, 2026.

*M.A. alumni, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran.

**Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran.

Corresponding Author: grnasiri@alzahra.ac.ir

Ind. Manag. Persp. 2026, 16(2), 277-302; doi: 10.48308/JIMP.16.2.277

Industrial Management Perspective

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Constraints related to locker type capacity, service capability, demand coverage and flow balance are also included in the model to ensure operational decisions remain consistent. The model can be applied over multiple time periods, with each customer using only one of the active lockers in their area. The installation and operating costs of each locker type are fixed and transportation costs are calculated in proportion to geographical distance. A logistics company manages all lockers, making location, pricing and demand allocation decisions centrally with the aim of maximising total profit over a multi-period horizon. The developed mathematical model is a mixed-integer non-linear mathematical programming. To ensure that the model can be solved in a reasonable amount of time, some nonlinear relationships have been rewritten using linearisation transformations and the definition of combined variables.

Findings. Computational findings show that permissible price limits and price deviation constraints between sites play a decisive role in forming the spatial pattern, allocating demand and determining the final profit of the network under study. The most important managerial outcome of the proposed model is that locker capacity is the most important profit driver. However, increasing capacity to the optimal level sharply increases profit, and after reaching saturation point, further capacity increases only create costs and do not increase efficiency. Additionally, locker installation costs are the most critical cost factor and cause the greatest profit reduction. Controlling the initial investment cost is more important than controlling other costs. Additionally, the results showed that network expansion should be targeted, as increasing potential locations or demand points does not necessarily increase profits. In many cases, due to high costs or low demand, network profit decreases. Analysis of the results shows that the proposed model can be used as a decision-making tool by managers and policymakers in urban logistics, providing an optimal platform for decision-making and helping to reduce costs and increase customer satisfaction in urban delivery networks.

Conclusion. In addition to theoretical aspects, this research includes valuable management results for logistics companies, locker users, and urban policymakers. The analyses show that the optimal design of a smart locker network is a multidimensional decision with economic, operational, and social impacts.

Keywords: Location; Pricing; Smart locker; Last-mile delivery; Price-sensitive demand; Constraint programming.

How to Cite: Mohseniyan Zanouzi, Zahra; Nasiri, Gholam Reza (2026). Developing a location -pricing model for smart lockers in a last-mile logistics network. *Ind. Manag. Persp.*, 16(2), 277-302 *(In Persian)*.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴۰۵، دوره ۱۶، شماره ۲، صص ۲۷۷ - ۳۰۲، doi : 10.48308/JIMP.16.2.277

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

Journal hompage : https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

نوع مقاله: پژوهشی

توسعه یک مدل مکانیابی - قیمت‌گذاری خدمات کمدهای هوشمند در یک شبکه لجستیکی خدمات تحویل

زهرا محسنیان زنوزی*

غلامرضا نصیری**

چکیده گسترده

مقدمه و هدف. رشد روزافزون تجارت الکترونیک و افزایش هزینه‌های مرحله نهایی زنجیره تأمین موجب شده که شرکت‌های پستی و لجستیکی به دنبال راهکارهای نوین برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها باشند. این تحولات سبب شده تا سیاست‌گذاران زنجیره تأمین توجه ویژه‌ای به مرحله نهائی تحویل کالا داشته باشند. مرحله‌ای که یکی از عوامل اصلی افزایش ترافیک درون شهری محسوب شده و به‌صورت مستقیم بر عملکرد حمل‌ونقل در لجستیک شهری اثرگذار است. یکی از راهکارهای لجستیکی نسبتاً جدید، استفاده از کمدهای هوشمند تحویل مرسوله است که بعضاً به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد و پایدار، جایگزین روش تحویل درب منزل می‌شود. استفاده از این کمدها باعث کاهش سفرهای اضافی و بهینه‌سازی حمل‌ونقل در مرحله آخر توزیع می‌شود؛ اگرچه ممکن است هزینه‌هایی ناشی از جابه‌جایی مشتریان به محل کمدها نیز به سیستم تحمیل گردد. محل این کمدها و قیمت این خدمت دو عاملی است که بر انتخاب مشتریان و ترجیح آن بر تحویل در منزل اثرگذار است. لذا هدف پژوهش حاضر، توسعه یک مدل یکپارچه مکان‌یابی-قیمت‌گذاری برای کمدهای هوشمند شهری است.

روش‌ها. در این پژوهش یک مدل یکپارچه مکان‌یابی-قیمت‌گذاری برای کمدهای هوشمند در شبکه توزیع شهری توسعه داده شده که در آن، تصمیمات مکانیابی کمدها و قیمت‌گذاری خدمات تحویل به‌صورت هم‌زمان و در یک سطح مدل‌سازی شده‌اند. دلیل اصلی این رویکرد، وابستگی متقابل این تصمیم‌ها در شبکه‌های تحویل مرحله نهایی است. مکان‌یابی کمدها بر فاصله دسترسی مشتریان، پوشش تقاضا و سطح استفاده از ظرفیت تأثیر مستقیم دارد، در حالی که قیمت‌گذاری خدمات تعیین‌کننده میزان تقاضا و سودآوری هر مکان است. ازاین‌رو، اتخاذ جداگانه این تصمیمات می‌تواند منجر به راه‌حل‌هایی شود که از نظر اقتصادی یا عملیاتی بهینه نباشند. بنابراین تصمیم‌های مربوط به انتخاب مکان‌های نصب کمد، تعیین قیمت خدمات در هر سایت و تخصیص تقاضای مشتریان به‌صورت هم‌زمان انجام می‌شود تا تعامل میان جنبه‌های مکانی و اقتصادی شبکه به‌درستی بازتاب یابد. در مدل پیشنهادی، تقاضا به‌صورت حساس به قیمت تعریف شده تا اثر مستقیم سیاست‌های قیمتی بر رفتار مشتریان و میزان جذب تقاضا بررسی شود. قیمت هر خدمت در بازه‌ای کنترل‌شده تعیین می‌شود و قید انحراف قیمت میان سایت‌ها برای حفظ هماهنگی در سطح شبکه اعمال شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۷، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۲۹.

*کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

**دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

نویسنده مسئول : grnasiri@alzahra.ac.ir

چشم‌انداز مدیریت صنعتي، ۱۴۰۵، دوره ۱۶، شماره ۲، صص ۲۷۷ - ۳۰۲، doi : 10.48308/JIMP.16.2.277

چشم‌انداز مدیریت صنعتي

Journal hompage : https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

نوع مقاله: پژوهشی

همچنین، قیود مربوط به ظرفیت انواع کمد، قابلیت ارائه خدمت، پوشش تقاضا و موازنه جریان در مدل گنجانده شده‌اند تا انسجام تصمیمات عملیاتی حفظ شود. مدل در چند دوره زمانی قابل اجراست و هر مشتری تنها از یکی از کمدهای فعال در محدوده خود استفاده می‌کند. هزینه‌های نصب و بهره‌برداری هر نوع کمد قطعی است و هزینه‌های حمل‌ونقل متناسب با فاصله جغرافیایی محاسبه می‌شوند. کلیه کمدها توسط یک شرکت واحد مدیریت می‌شوند و تصمیمات مکان‌یابی، قیمت‌گذاری و تخصیص تقاضا به‌صورت متمرکز و با هدف حداکثرسازی سود کل در افق چنددوره‌ای اتخاذ می‌شوند. مدل ریاضی توسعه‌یافته یک برنامه‌ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح غیرخطی است به‌منظور تضمین حل مدل در زمان معقول، برخی روابط غیرخطی از طریق تبدیل‌های خطی‌سازی و تعریف متغیرهای ترکیبی بازنویسی شده‌اند.

یافته‌ها. یافته‌های محاسباتی نشان می‌دهد که حدود مجاز قیمت و قید انحراف قیمت میان سایت‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری الگوی مکانی، نحوه تخصیص تقاضا و سود نهائی شبکه تحت بررسی دارند. مهم‌ترین نتایج مدیریتی مدل پیشنهادی حاکی از آن است که ظرفیت کمدها مهم‌ترین محرک سود است اما افزایش ظرفیت تا حد بهینه سود را به‌شدت افزایش می‌دهد و پس از رسیدن به نقطه اشباع، ظرفیت بیشتر فقط هزینه ایجاد می‌کند و بازدهی ندارد. همچنین هزینه نصب کمدها بحرانی‌ترین عامل هزینه‌ای است و بیشترین کاهش سود را ایجاد می‌کند. کنترل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نسبت به سایر هزینه‌ها اهمیت بیشتری دارد. ضمنا نتایج نشان داد توسعه شبکه باید هدفمند باشد بطوریکه افزایش مکان‌های بالقوه یا نقاط تقاضا همیشه سود را بیشتر نمی‌کند و در بسیاری موارد به‌دلیل هزینه بالا یا تقاضای کم، سود شبکه کاهش می‌یابد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌یار برای مدیران و سیاست‌گذاران حوزه لجستیک شهری به‌کار رود تا با فراهم‌سازی بستر تصمیم‌گیری بهینه، به کاهش هزینه‌ها و افزایش رضایت مشتریان در شبکه‌های تحویل شهری کمک کند.

نتیجه‌گیری. علاوه بر جنبه‌های نظری، این پژوهش شامل نتایج مدیریتی ارزشمندی برای شرکت‌های لجستیکی، کاربران کمد و سیاست‌گذاران شهری است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که طراحی بهینه شبکه کمدهای هوشمند تصمیمی چندبعدی با اثرات اقتصادی، عملیاتی و اجتماعی است.

واژه‌های کلیدی: مکانیابی؛ قیمت‌گذاری؛ کمد هوشمند؛ مرحله نهایی تحویل؛ تقاضای حساس به قیمت؛ برنامه‌ریزی محدودیت‌ها.

استناددهی: محسنیان زنوزی، زهرا؛ نصیری، غلامرضا (۱۴۰۵). توسعه یک مدل مکانیابی – قیمت‌گذاری خدمات کمدهای هوشمند در یک شبکه لجستیکی خدمات تحویل. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۶(۲)، ۲۷۷-۳۰۲.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، تأثیرات انقلاب صنعتی چهارم با رشد فناوری و تغییر رفتار مصرف‌کنندگان، همراه با شیوع همه گیری‌ها، موجب رشد چشمگیر تجارت الکترونیک شده است. امروزه در سطح جهانی، سهم خرید اینترنتی کالاهای غیرخوراکی افزایش چشمگیر داشته است [۹]. علاوه بر این، تجارت الکترونیک سهم فزاینده‌ای در خرده‌فروشی دارد به‌گونه‌ای که در سال ۲۰۲۴ حدود ۲۰ درصد از کل فروش خرده‌فروشی جهان از طریق اینترنت انجام شده و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۷ این سهم به حدود یک‌چهارم کل فروش جهانی برسد [۳۵]. این تحول سبب شده تا سیاست‌گذاران زنجیره تأمین توجه ویژه‌ای به مرحله نهائی تحویل کالا داشته باشند. مرحله‌ای که یکی از عوامل اصلی افزایش ترافیک درون شهری محسوب شده و به‌صورت مستقیم بر عملکرد حمل‌ونقل در لجستیک شهری اثر می‌گذارد [۱۶]. با رشد فزاینده تجارت الکترونیک و افزایش خریدهای آنلاین، رقابت میان شرکت‌های پستی و شرکت‌های لجستیکی طرف سوم به‌شدت افزایش یافته است. این شرکت‌ها برای جلب رضایت مشتریان می‌کوشند مرسولات را در کوتاه‌ترین زمان ممکن تحویل دهند، امری که برنامه‌ریزی دقیق و نوآوری در روش‌های کسب وکار را می‌طلبد [۲۷]. ازاین‌رو، یکی از رویکردهای کلیدی در مواجهه با چالش‌های مرحله پایانی تحویل، ارائه گزینه‌های متنوع و منعطف برای تحویل کالا با توجه به ملاحظات زیست محیطی است [۱۵].

به‌طور کلی، دو الگوی اصلی برای تحویل مرسولات وجود دارد. نخست، تحویل درب منزل که اگرچه برای مشتریان مطلوب است، اما به‌دلیل توقف‌های مکرر وسایل نقلیه، منجر به زمان‌های طولانی تحویل می‌شود و دوم، تحویل غیرمستقیم که مشتریان برای دریافت مرسوله به نقاط مشخص مراجعه می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که به‌کارگیری سیستم‌های تحویل ترکیبی می‌تواند ضمن رفع چالش‌های مرحله پایانی توزیع، سطح رضایت مشتریان را نیز افزایش دهد [۷]. از جمله این سیستم‌ها می‌توان به تحویل با استفاده از پهپادها، ربات‌ها، وسایل نقلیه خودران، مدل‌های جمع‌سپاری و کمدهای هوشمند اشاره کرد [۲۶]. در این میان، کمدهای هوشمند به‌عنوان یکی از گزینه‌های کارآمد تحویل در مرحله پایانی زنجیره تأمین مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند [۲۳]. در این روش، مشتریان با انتخاب خود، بسته‌ها را از کمدهای مستقر در نقاط مشخص دریافت می‌کنند. استفاده از این کمدها باعث کاهش سفرهای اضافی و بهینه‌سازی حمل‌ونقل در مرحله آخر توزیع می‌شود؛ اگرچه ممکن است هزینه‌هایی ناشی از جابه‌جایی مشتریان به محل کمدها نیز به سیستم تحمیل گردد [۳۲]. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بهره‌گیری از کمدهای هوشمند می‌تواند هزینه تحویل درب منزل را تا حدود ۴۲ درصد کاهش دهد [۱۴]. افزون بر این، استفاده از کمدهای هوشمند در مقایسه با سایر روش‌های توزیع از لحاظ کاهش هزینه‌ها، افزایش رضایت مشتریان و بهبود پایداری زنجیره تأمین، کارایی بالاتری دارد [۳ و ۳۱].

همچنین این روش به‌دلیل کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از کوتاه شدن مسیر وسایل نقلیه، صرفه‌جویی در زمان و هزینه برای شرکت‌های لجستیکی و افزایش انعطاف‌پذیری مشتریان در انتخاب زمان تحویل، محبوبیت چشمگیری یافته است [۲۰ و ۲۹]. با تداوم رشد تجارت الکترونیک، انتظار می‌رود استفاده از شبکه کمدهای هوشمند گسترش بیشتری یابد و در میان خریداران آنلاین مقبولیت بیشتری پیدا کند. با این حال، شواهد نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مشتریان هنوز نسبت به تغییر از تحویل درب منزل به روش‌های نوآورانه تمایل اندکی دارند. ازاین‌رو، شرکت‌ها باید اقدامات انگیزشی شامل سیاست‌های قیمت‌گذاری هدفمند، وسعت دسترسی و تحویل اکسپرس اتخاذ کنند تا استفاده از این روش‌های نوین تحویل برای مشتریان توجیه‌پذیرتر گردد [۳۸]. به‌عنوان نمونه، کاهش هزینه‌های تحویل و انتخاب مکان‌های مناسب برای نصب کمدها می‌تواند به‌طور مؤثر مشتریان را به سمت استفاده از این شیوه‌های نوآورانه سوق دهد [۴].

از سوی دیگر موضوع طراحی شبکه تامین/ لجستیک یکی از تصمیم‌های بلندمدت و تاثیرگذار بر عملکرد زنجیره تامین است که تقاضا نقش مهمی در کارائی آن ایفا می‌کند. با توجه به تاثیرپذیری تقاضا از عواملی مثل قیمت، کیفیت و زمان تحویل، سازمان‌ها ناچارند این عوامل را نیز در مدل‌های مکانی‌یابی تسهیلات در نظر بگیرند [۲۴]. بنابراین اخیراً طراحی زنجیره تامین و تلفیق آن با سایر تصمیم‌های اثر گذار از جمله قیمت‌گذاری، تخفیف، سیاست موجودی و مسیریابی توجه محققان زیادی را بخود جلب نموده است [۱۷، ۳۳ و ۳۹]. این موضوع در شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات کمدهای هوشمند که خدمات تحویل خارج از خانه ارائه می‌دهند، بسیار چشمگیر است. زیرا این شرکت‌ها با

چالش‌های متعددی شامل انتخاب مکان‌های بهینه برای استقرار کمدها، تعیین ظرفیت و نوع مناسب آن‌ها، حداکثرسازی استفاده از کمدها، طراحی سیاست‌های قیمت‌گذاری، کاهش هزینه‌ها و زمان تحویل جهت حفظ رضایت مشتریان روبه‌رو هستند که بعضاً به‌طور متقابل بر یکدیگر اثرگذارند [۲ و ۱۲]. نوآوری‌های این پژوهش نسبت به تحقیقات قبلی بصورت زیر خلاصه می‌شود:

- یکپارچه‌سازی تصمیمات مکانیابی کمدهای هوشمند و قیمت‌گذاری خدمات تحویل به‌صورت هم‌زمان و در یک سطح: دلیل اصلی این رویکرد، وابستگی متقابل این تصمیم‌ها در شبکه‌های تحویل مرحله نهایی است. مکان‌یابی کمدها بر فاصله دسترسی مشتریان، پوشش تقاضا و سطح استفاده از ظرفیت تأثیر مستقیم دارد، در حالی که قیمت‌گذاری خدمات، تعیین‌کننده میزان تقاضا و سودآوری هر مکان است. ازاین‌رو، اتخاذ جداگانه این تصمیمات می‌تواند منجر به راه‌حل‌هایی شود که از نظر اقتصادی یا عملیاتی بهینه نباشند؛
- در نظر گرفتن مفروضاتی جهت واقعی‌تر شدن مساله تحت بررسی از جمله تنوع کمدها و خدمات؛
- ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح غیرخطی با توجه به مفروضات کابردی؛

سوالاتی که در این تحقیق سعی می‌شود بدان‌ها پاسخ داده شود بدین شرح است: کدام دسته از پارامترهای شبکه و هزینه‌ها بیشترین تأثیر را بر سود شبکه دارند؟ تغییر در ظرفیت کمدها چگونه بر کارایی و سود شبکه تأثیر دارد؟ تغییر در دوره زمانی تصمیم‌گیری و انواع خدمت چه تأثیری بر سود شبکه تحت بررسی دارد؟

ساختار پژوهش حاضر بدین شرح است. بخش دوم به مبانی نظری، مرور ادبیات و بررسی مطالعات پیشین اختصاص دارد. در بخش سوم، تشریح مساله، مفروضات، پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی شده و در ادامه مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌گردد. در بخش بعد، روش حل مدل پیشنهادی، تحلیل نتایج و تحلیل حساسیت تشریح شده است. نهایتاً در بخش پنجم، نتایج نهایی پژوهش، دستاوردهای نظری و کاربردی، محدودیت‌ها و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در این بخش، ابتدا مفاهیم پایه و تخصصی مرتبط با موضوع پژوهش ارائه می‌شود و سپس، مرور جامعی از تحقیقات انجام‌شده در زمینه مکان‌یابی، قیمت‌گذاری و طراحی شبکه‌های کمد هوشمند ارائه می‌گردد. در پایان نیز، با طبقه‌بندی مطالعات پیشین بر اساس حوزه‌های محتوایی، به جایگاه و نوآوری پژوهش حاضر در مقایسه با آثار موجود اشاره خواهد شد.

۱.۲. زنجیره تامین و مرحله نهائی تحویل

یکی از مهم‌ترین بخش‌های زنجیره تأمین، مرحله موسوم به خدمات تحویل است؛ مرحله‌ای که شامل انتقال نهایی کالا از مرکز توزیع یا نقطه تحویل تا محل مشتری می‌شود [۸]. این بخش به دلیل تماس مستقیم با مشتری، نقش تعیین‌کننده‌ای در سطح رضایت او ایفا می‌کند و هم‌زمان سهم قابل‌توجهی از هزینه‌های لجستیکی (گاهی تا ۵۰%) را به خود اختصاص می‌دهد [۱۶]. در گذشته، مدل‌های سنتی توزیع بر تحویل درب منزل متکی بودند، اما افزایش حجم سفارش‌های آنلاین، تراکم ترافیکی در مناطق شهری و هزینه‌های سوخت، این روش را از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی گاهی ناکارآمد کرده است [۲۹]. در نتیجه، تمرکز بسیاری از مطالعات جدید بر طراحی راهکارهایی برای بهینه‌سازی آخرین گام تحویل از طریق فناوری‌های نوین مانند کمدهای هوشمند، خودروهای خودران، ربات‌ها و پهپادها قرار گرفته است [۱۰ و ۳۴].

در میان این راهکارها، کمدهای هوشمند به‌عنوان یکی از مؤثرترین نوآوری‌ها در حوزه لجستیک شهری شناخته می‌شوند [۴۲]. این کمدها به مشتریان اجازه می‌دهند تا مرسولات خود را در زمان دلخواه از نزدیک‌ترین نقطه دریافت کنند و در نتیجه، نیاز به حضور مأموران تحویل در آدرس‌های متعدد کاهش می‌یابد. این موضوع منجر به صرفه‌جویی در هزینه و زمان، کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود پایداری محیط‌زیستی می‌گردد [۳]. علاوه بر این، استفاده از کمدها امکان تجمیع مرسولات در نقاط ثابت و بهینه‌سازی مسیرهای تحویل را فراهم می‌سازد که در نهایت به افزایش بهره‌وری شبکه لجستیکی منجر می‌شود [۳۲].

۲.۲. لجستیک شهری و چالش‌های توزیع مرسولات

لجستیک شهری به مجموعه‌ای از فعالیت‌ها گفته می‌شود که هدف آن بهینه‌سازی جریان کالا، اطلاعات و خدمات درون مناطق شهری است، به‌گونه‌ای که ضمن تأمین نیازهای اقتصادی و اجتماعی شهروندان، اثرات منفی زیست‌محیطی و ترافیکی نیز به حداقل برسد. در پاسخ به ظهور خرده‌فروشی دیجیتال و تغییر الگوهای خرید، مطالعات متعددی تأثیر تجارت الکترونیک بر حمل‌ونقل شهری را بررسی کرده‌اند [۲۸]. با افزایش تراکم جمعیت، رشد تجارت الکترونیک و گسترش فعالیت‌های توزیع خرد، چالش‌های لجستیکی در شهرها اهمیت بیشتری یافته‌اند و موضوعاتی نظیر آلودگی هوا، ازدحام ترافیکی و کمبود فضاهای بارگیری و تخلیه به مسائل حیاتی در مدیریت شهری تبدیل شده‌اند [۵ و ۱۵].

در میان اجزای مختلف لجستیک شهری، مرحله آخر تحویل از پیچیده‌ترین بخش‌ها به‌شمار می‌رود زیرا مستقیماً با مصرف‌کنندگان نهایی در ارتباط است و تحت تأثیر عواملی چون پراکندگی جغرافیایی، حجم سفارش‌ها و محدودیت زمانی قرار دارد [۳۶]. افزایش حجم سفارش‌های کوچک و متعدد باعث شده تا سیستم‌های حمل‌ونقل شهری با بار ترافیکی سنگینی مواجه شوند، در حالی که ظرفیت زیرساخت‌های شهری بعضاً ثابت مانده است [۳۱].

در این میان، کمدهای هوشمند به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای کاهش فشار لجستیکی در محیط‌های شهری شناخته می‌شوند. با استقرار این کمدها حجم تردد وسایل نقلیه توزیع‌کننده کاهش یافته و مسیرهای تحویل کوتاه‌تر می‌شوند. افزون بر آن، با تجمیع تحویل‌ها در یک نقطه، میزان مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۲۶]. به‌طور کلی، یک سامانه کمد هوشمند از اجزای مختلفی تشکیل می‌شود: بخش فیزیکی کمد شامل مجموعه‌ای از محفظه‌ها در اندازه‌های مختلف است که هر یک دارای قفل الکترونیکی کنترل‌شده توسط نرم‌افزار مرکزی می‌باشد؛ بخش کنترل مرکزی که مغز سیستم است و وظیفه مدیریت دسترسی، ارتباط با سرور و هماهنگی میان مأمور توزیع و مشتری را بر عهده دارد؛ نرم‌افزار مدیریت و اپلیکیشن کاربر به‌صورت وب یا موبایل که امکان رزرو، رهگیری مرسوله، پرداخت هزینه و دریافت اعلان را برای کاربران فراهم می‌کند. همچنین سیستم‌های امنیتی و نظارتی که شامل دوربین‌های مداربسته، حسگرهای باز و بسته شدن درب و سامانه‌های هشدار برای جلوگیری از دسترسی غیرمجاز و زیرساخت ارتباطی که از فناوری‌های اینترنت اشیا برای برقراری ارتباط بین کمد، سرور مرکزی و کاربر بهره می‌برد که در نهایت باعث افزایش کارایی، اطمینان و قابلیت رهگیری لحظه‌ای می‌شود [۳].

از منظر رفتاری، کمدهای هوشمند اغلب مورد استقبال مشتریانی قرار می‌گیرند که نگرش مثبتی نسبت به فناوری داشته و ارزش‌های کاربردی و احساسی خدمات خودکار را درک می‌کنند. همچنین عواملی مانند سهولت استفاده، امنیت، اعتماد و مزیت نسبی این خدمات نسبت به روش‌های سنتی، از مهم‌ترین محرک‌های پذیرش این نوع خدمات گزارش شده‌اند [۳۷]. از جمله این مشتریان می‌توان به افرادی اشاره کرد که زمان دریافت سفارش برای آن‌ها اهمیت بالایی دارد زیرا کمدهای هوشمند امکان دریافت بسته را تقریباً در تمام ساعات شبانه‌روز فراهم کرده و نیاز به حضور در بازه زمانی مشخص برای تحویل را از بین می‌برند [۶]. این ویژگی به‌ویژه برای کارکنان تمام‌وقت، دانشجویان و افرادی که در ساعات کاری در منزل حضور ندارند، مزیت قابل توجهی محسوب می‌شود. علاوه بر این، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که حساسیت به قیمت و هزینه‌های جانبی تحویل نیز نقش مهمی در انتخاب کمدها دارد. استفاده از کمدهای هوشمند در بسیاری از موارد منجر به کاهش هزینه تحویل شده و از پرداخت هزینه‌های اضافی ناشی از عدم حضور مشتری جلوگیری می‌کند [۱۱].

۳.۲. مطالعات مرتبط با مکان یابی و شبکه کمدهای هوشمند

نتایج تحقیقات اولیه در شهرها نشان داده است که فاصله مکانی و دسترس‌پذیری کمدها از مهم‌ترین عوامل در میزان پذیرش این خدمات محسوب می‌شوند. به‌عبارت دیگر، هرچه فاصله کاربر تا نزدیک‌ترین کمد کمتر باشد، احتمال استفاده از آن افزایش می‌یابد [۲۹]. بعلاوه، سطح اعتماد مشتریان به فناوری‌های خودکار، میزان آشنایی با فرایند استفاده و تجارب قبلی از خدمات مشابه نیز بر قصد استفاده اثرگذارند [۴]. در برخی از مطالعات، رفتار مشتریان از منظر تقسیم‌بندی بازار نیز بررسی شده است. مشتریان پرمشغله و شاغلان شهری بیشترین تمایل را به استفاده از کمدهای نزدیک محل کار یا ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی نشان داده‌اند، در حالی‌که مشتریان خانگی ترجیح می‌دهند از

کمدهایی استفاده کنند که در نزدیکی محل سکونت آنها قرار دارند [۱۴]. همچنین تحقیقات جدید به بررسی رضایت مشتریان پس از استفاده پرداخته‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که عواملی نظیر روشنایی و ایمنی محل کمد، سهولت بازکردن قفسه، پشتیبانی در صورت بروز خطا و سرعت پاسخگویی سامانه در ارتقای تجربه کاربر نقش تعیین‌کننده دارند [۲۰].

از سوی دیگر مسئله مکان‌یابی کمدها یکی از چالش‌های اساسی در طراحی شبکه‌های مرحله نهائی تحویل محسوب می‌شود [۱۹]. هدف اصلی این پژوهش‌ها، تعیین مکان‌های بهینه برای استقرار کمدها به گونه‌ای است که میان هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از یک سو و سطح پوشش و رضایت مشتریان از سوی دیگر تعادل برقرار گردد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها به سمت مدل‌سازی کمّی و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی توجه داشته‌اند. لین[1] و همکاران (۲۰۲۲) مدلی ارائه دادند که احتمال انتخاب کمد توسط مشتری را بر اساس جذابیت و فاصله محاسبه می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های قبلی برآورد واقع‌بینانه‌تری از سود ارائه می‌دهد و محدودیت انتخاب تک‌گزینه‌ای را برطرف می‌کند [۲۱].

در همین راستا، کار[2] (۲۰۲۲) مدلی ریاضی برای تعیین مکان و آرایش کمدها در شرایط عدم‌قطعیت تقاضا ارائه داد و از روش تجزیه بندرز برای یافتن پیکره‌بندی بهینه استفاده کرد [۱۳]. مانسینی[3] و همکاران (۲۰۲۳) نیز به موضوع مکان‌یابی در برابر نوسانات تقاضا پرداختند و نشان دادند که مدل‌های مقاوم، عملکرد پایدارتری در شرایط متغیر اقتصادی دارند [۲۵]. افزون بر این، ردی[4] و همکاران (۲۰۲۰) با ترکیب مسئله مکان‌یابی با مسیریابی وسایل نقلیه، مدل دومرحله‌ای جدیدی را توسعه دادند که هدف آن کاهش هم‌زمان هزینه و زمان تحویل بسته‌ها بود [۳۲].

در مجموع، مرور ادبیات نشان می‌دهد که طراحی بهینه شبکه کمدهای هوشمند باید مبتنی بر تحلیل هم‌زمان الگوهای تقاضای مکانی، ویژگی‌های جمعیتی، حساسیت قیمتی و محدودیت‌های زیست‌محیطی باشد. روندهای جدید پژوهشی نیز نشان می‌دهند که ترکیب مدل‌های مکان‌یابی با سیاست‌های قیمت‌گذاری پویا و مدل‌های سلایق مشتریان می‌تواند منجر به افزایش کارایی اقتصادی، پایداری سیستم و رضایت مشتریان گردد [۱ و ۱۸].

٤.۲. مطالعات مربوط به قیمت‌گذاری خدمات کمدها

یکی از قابل توجهترین مطالعات در این زمینه، پژوهش دویچ و گلانی[5] (۲۰۱۸) است. آنان مدلی ترکیبی برای مکان‌یابی و ظرفیت کمدهای هوشمند ارائه کردند که تابع هدف آن بیشینه‌سازی درآمد ناشی از مشتریانی است که این خدمت را انتخاب می‌کنند منهای هزینه‌های ثابت و عملیاتی نصب کمدها و تخفیف‌های داده شده به مشتریان است [۶].

از سوی دیگر، مطالعات انجام‌شده در زمینه قیمت‌گذاری در شبکه‌های دارای هاب نیز مبانی نظری ارزشمندی برای این حوزه فراهم کرده‌اند. لوئر ویلاگرا و ماریانوف[6] (۲۰۱۳) در پژوهش خود مدلی رقابتی برای تعیین مکان و قیمت در شبکه‌های هاب- اسپوک ارائه کردند که در آن رفتار مشتریان نیز توصیف می‌شود [۲۲]. نتایج این مطالعه نشان داد که در محیط‌های رقابتی، تمرکز بر حداکثرسازی سود نسبت به افزایش سهم بازار رویکردی کاراتر است. در پژوهش دیگری کی و همکاران[7] (۲۰۲۳) به تحلیل قیمت‌گذاری در کاناله همه کاره پرداخته و تأکید کردند که در حضور تقاضای حساس به قیمت و سیاست‌های بازگشت کالا، استفاده از مدل‌های داده‌محور می‌تواند موجب افزایش دقت تصمیم های قیمت گذاری شود [۳۰]. در مطالعه دیگری، یو و همکاران[8] (۲۰۲۱) با ارائه یک مدل مبتنی بر فروشنده دوره گرد نشان دادند که ارزش خدمات کمدهای هوشمند نقش مهمی در مدیریت تحویل و رفاه مشتریان دارد با توجه به اینکه نیاز نیست گیرنده در محل تحویل در ساعت خاصی حضور داشته باشد [۳۸]. در مجموع، این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که در سیستم‌های تحویل مبتنی بر کمدهای هوشمند،

1. Lin et al.
2. Kahr
3. Mancini et al.
4. Redi et al.
5. Deutsch & Golany
6. Lüer-Villagra & Marianov
7. Qiu et al.
8. Yu et al.

ترکیب تصمیمات مکانی، قیمتی و رفتاری مشتریان به‌صورت هم‌زمان می‌تواند به دست‌یابی به سود پایدار، بهبود رضایت مشتری، و پایداری شبکه کمک کند.

۵.۲. تحلیل شکاف‌های تحقیقاتی

مرور ادبیات نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، استفاده از کمدهای هوشمند به‌عنوان یکی از راهکارهای اصلی برای بهبود عملکرد مرحله آخر تحویل، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. بیشتر پژوهش‌ها، از جمله کامارainen[1] و همکاران (۲۰۰۱) و ژو[2] و همکاران (۲۰۲۶)، مسئله مکان‌یابی کمدها را به‌صورت جداگانه و با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های نصب و بهره‌برداری بررسی کرده‌اند [۱۴ و ۴۲]. در حالی که تحقیقات محدودی، مانند ژانگ[3] و همکاران (۲۰۲۳)، سعی کرده‌اند قیمت‌گذاری را هم‌زمان با مکان‌یابی مدل‌سازی کنند [۴۱]. همچنین در بسیاری از مطالعات، تنها یک نوع کمد با ظرفیت ثابت در نظر گرفته شده است در حالی که در عمل، شرکت‌های توزیع از انواع مختلف کمد (با ظرفیت و هزینه‌های متفاوت) استفاده می‌کنند [۴۰].

ضمناً اکثر مدل‌های موجود صرفاً به تحویل عادی مرسولات می‌پردازند و از خدمات متنوعی مانند ارسال کالا، بازگشت کالا وخدمات یخچالی که تحت دمای کنترل شده هستند، غفلت کرده‌اند. در حالی که این خدمات نقش مهمی در رفتار انتخابی مشتریان دارند. همچنین در بسیاری از مطالعات، تقاضا به‌صورت ثابت یا برآوردشده در نظر گرفته شده و تابع حساسیت قیمتی لحاظ نشده است. در نتیجه، مدل‌ها نمی‌توانند رفتار واقعی بازار و واکنش مشتریان به سیاست‌های قیمت‌گذاری را بخوبی منعکس کنند.

در پژوهش حاضر، قیمت‌گذاری و مکان‌یابی به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی شده و چند نوع کمد متنوع با ظرفیت و هزینه‌های نصب متمایز لحاظ شده است تا تصمیم‌گیری واقع‌بینانه‌تری در این زمینه انجام گیرد. مدل ارائه‌شده، خدمات مختلف را هم‌زمان بررسی می‌کند تا تأثیر گزینه‌های مختلف خدماتی بر سود و رضایت مشتری سنجیده شود. از تابع تقاضای حساس به قیمت استفاده شده است تا رابطه مستقیم میان تغییرات قیمت و میزان تقاضا مدل‌سازی شود. جدول ۱ مولفه‌های مهم مقالات قبلی در حوزه مکان یابی کمد و قیمت‌گذاری خدمات را با پژوهش حاضر نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه مقالات در حوزه مکان یابی - قیمت گذاری خدمات لاکرهای هوشمند

نویسندگان	ترجیحات مشتری	ملاحظات زیست‌محیطی	قیمت‌گذاری خدمت	مکان‌یابی	دوره زمانی	تقاضای وابسته به قیمت	انواع لاکر	انواع خدمات
کو و همکاران (۲۰۲۶) [۱۸]	×	×	×	✓	×	×	✓	×
ژو و همکاران (۲۰۲۶) [۴۲]	✓	×	×	×	✓	×	✓	×
اُزیاواس و همکاران (۲۰۲۵) [۲۷]	×	×	×	✓	×	×	✓	✓
آکرمن و همکاران (۲۰۲۵) [۱]	×	×	✓	✓	✓	✓	×	×
اندارگلی و همکاران (۲۰۲۴) [۲]	✓	✓	×	✓	×	×	×	×

1. Kämäräinen et al.
2. Zhou et al.
3. Zhang et al.

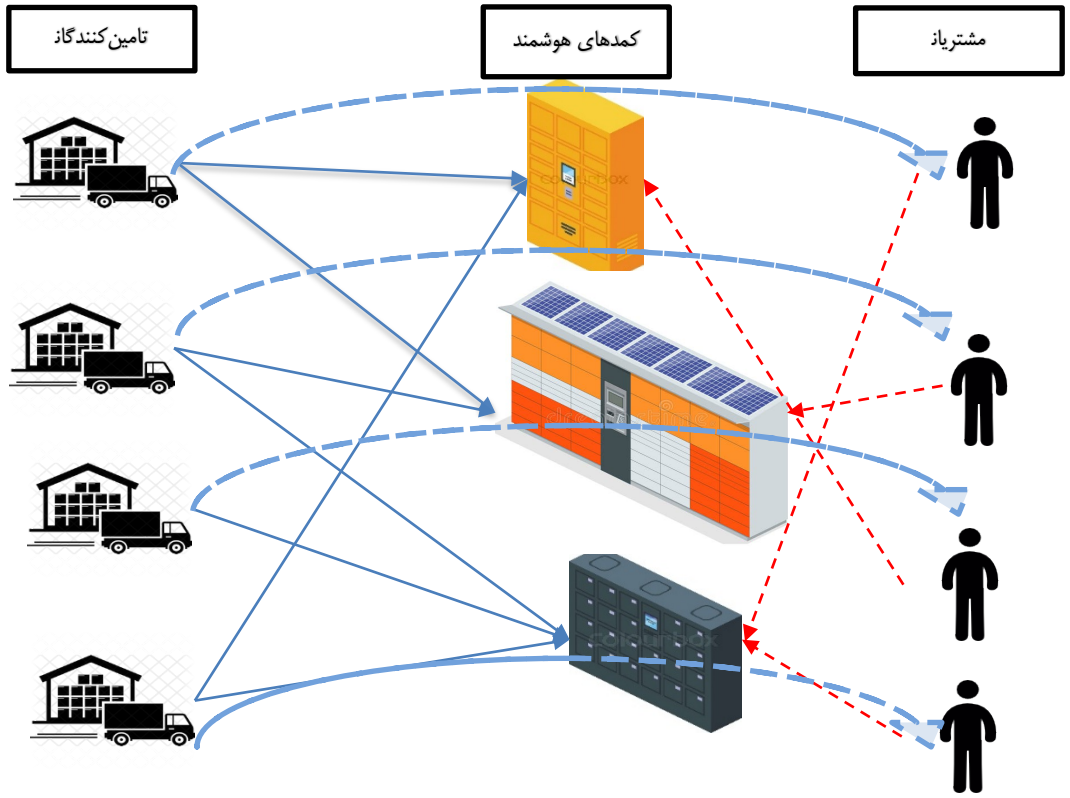
نویسندگان	ترجیحات مشتری	ملاحظات زیست‌محیطی	قیمت‌گذاری خدمت	مکان‌یابی	دوره زمانی	تقاضای وابسته به قیمت	انواع لاکر	انواع خدمات
ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) [۴۱]	×	×	✓	✓	×	✓	×	×
یونس اوغلو و آوچی (۲۰۲۳) [۴۰]	×	×	✓	✓	×	✓	×	×
محمد و همکاران (۲۰۲۳) [۲۶]	✓	✓	×	✓	×	×	×	×
کار (۲۰۲۲) [۱۳]	×	✓	×	✓	×	×	✓	×
بونومی و همکاران (۲۰۲۲) [۳]	✓	✓	×	×	×	×	×	×
پپل و اسپینلر (۲۰۲۲) [۲۹]	✓	✓	×	✓	×	×	✓	×
لین و همکاران (۲۰۲۲) [۲۱]	✓	×	✓	✓	×	✓	×	×
ردی و همکاران (۲۰۲۰) [۳۲]	×	×	×	✓	×	×	×	×
هافمن و پراوزه (۲۰۱۸) [۱۰]	×	✓	×	✓	×	×	✓	×
دویچ و گلانی (۲۰۱۸) [۶]	✓	×	×	✓	×	×	×	×
لمکه و همکاران (۲۰۱۶) [۲۰]	✓	×	×	×	×	×	×	×
تحقیق حاضر	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓

همانگونه که از مولفه‌های جدول فوق مشخص است در نظر گرفتن تصمیم‌های مکان‌یابی و قیمت‌گذاری خدمات کمدهای هوشمند مورد توجه محققان قرار گرفته است. همچنین در بسیاری از مطالعات پیشین تنها یک نوع لاکر با ظرفیت ثابت و یک نوع خدمت در نظر گرفته شده است. این در حالی است که در عمل، شرکت‌های توزیع از انواع مختلف لاکر (با ظرفیت و هزینه‌های متفاوت) استفاده کرده و خدمات متنوعی نیز ارائه می‌کنند.

۳. روش‌شناسی پژوهش و تشریح مساله

مساله مورد بررسی در این پژوهش، ترکیبی از دو تصمیم اصلی در طراحی شبکه تحویل شامل مکان‌یابی کمدهای هوشمند و تعیین قیمت خدمات ارائه شده در هر نوع کمد است. شبکه لجستیکی تحت بررسی قصد دارد مجموعه‌ای از کمدهای هوشمند را در نقاط بالقوه مختلف در سطح شهر نصب نماید تا از طریق آن‌ها خدماتی نظیر تحویل عادی، ارسال کالا و بازگشت کالا را به مشتریان ارائه دهد. هدف شرکت، حداکثرسازی سود کل حاصل از این خدمات است که از تفاوت میان درآمد ناشی از فروش خدمات به مشتریان و هزینه‌های ثابت و متغیر مربوط به نصب و بهره‌برداری کمدها به‌دست می‌آید. فرض می‌شود که مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه برای استقرار کمدها و مجموعه‌ای از گره‌های تقاضا (مشتریان) از پیش مشخص‌اند. هر مشتری بسته به فاصله تا کمدها و سطح قیمت خدمات، تصمیم می‌گیرد که از کدام کمد استفاده کند. به‌عبارتی، تقاضای مشتریان تابعی از قیمت خدمت و فاصله است و در صورت افزایش قیمت یا افزایش فاصله، تمایل به استفاده از کمد کاهش می‌یابد. کمدها انواع متنوعی داشته که ظرفیت، هزینه‌های نصب و بهره‌برداری متفاوتی دارند. شرکت باید تصمیم بگیرد در

کدام مکان‌ها و با چه نوع کمدی سرمایه‌گذاری کند تا ضمن رعایت محدودیت ظرفیت و هزینه، بیشترین سود ممکن را به‌دست آورد. شمای کلی شبکه لجستیکی تحت بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. شمای شبکه تحت بررسی

مفروضات مساله و معرفی نمادها. سایر مفروضات مساله بدین شرح است. چند نوع کمد مختلف با ظرفیت‌های مختلف، هزینه‌های نصب و بهره‌برداری متفاوت در نظر گرفته شده و در هر محل فقط یک نوع کمد قابل نصب است. همچنین مدل شامل چند خدمت متمایز مانند تحویل کالا، ارسال کالا و بازگشت کالاست که هر یک دارای قیمت و تابع تقاضای حساس به قیمت می‌باشند. با توجه به تنوع خدمات هر محل، ضریب حساسیت مشتریان نیز برای هر خدمت متفاوت در نظر گرفته شده است. مدل در چند دوره زمانی گسسته قابل اجراست و تقاضای مشتریان به قیمت خدمات حساس است اما هر مشتری از نزدیک‌ترین کمد فعال در محدوده خود استفاده می‌کند. هزینه‌های نصب و بهره‌برداری هر نوع کمد قطعی است، ظرفیت هر کمد محدود بوده و هزینه‌های حمل‌ونقل متناسب با فاصله جغرافیایی محاسبه می‌شوند. کلیه کمدها توسط یک شرکت واحد مدیریت می‌شوند و تصمیمات مکان‌یابی، قیمت‌گذاری و تخصیص تقاضا به‌صورت متمرکز و با هدف حداکثرسازی سود کل در افق چند دوره‌ای اتخاذ می‌شوند.

نمادهای بکار رفته در مدل به شرح زیر است:

مجموعه‌ها

T مجموعه دوره‌های زمانی برنامه ریزی ($t \in T$)؛

S مجموعه انواع خدماتی که کمدها می‌توانند ارائه دهند (مانند تحویل کالا، بازگشت کالا و...) ($s \in S$)؛

$S_q \subseteq S$ مجموعه خدمات مورد نیاز مشتری q است که باید توسط نزدیک‌ترین کمد ممکن تامین/ ارائه شود؛

L مجموعه انواع کمدها ($l \in L$) ؛

P مجموعه مکان‌های بالقوه برای نصب کمد($p \in P$)؛

$P_l \subseteq P$ زیر مجموعه‌ای از مکان‌های ممکن برای نصب کمد از نوع l؛

Q مجموعه مشتریان($q \in Q$)؛

E مجموعه یال‌های بین گره‌های i و j در شبکه لجستیکی تحت بررسی؛

پارامترها

c_{ij} هزینه حمل‌ونقل بین گره i و j در شبکه که $(i\ j) \in E$؛

$\acute{c}_l$ هزینه ساخت و نگهداری هر کمد از نوع l ؛

c_i^{site} هزینه اجاره یا آماده‌سازی محل نصب کمد در گره i ($i \in P$) ؛

c_{il}^{inst} هزینه نصب کمد از نوع l در گره i ($i \in P_l$)؛

N_i حداکثر تعداد کمدهایی که می‌توانند در گره i نصب شوند ($i \in P$)؛

k_{ls} ظرفیت ارائه خدمت s توسط کمد نوع l ؛

pr_{is}^{min} حداقل قیمت مجاز خدمت s در گره i ($i \in P$) که باید پوشش دهنده هزینه/ بهای تمام شده این خدمات همراه با سود معقول برای شرکت باشد؛

pr_s^{Hd} قیمت تحویل خدمت s درب منزل (حداکثر قیمت مجاز برای خدمات کمد هوشمند)؛

Δpr حداکثر انحراف کل قیمت‌ها در شبکه، به‌منظور حفظ سیاست هماهنگ قیمت‌گذاری؛

α_{qs} ضریب کشش قیمتی تقاضای خدمت s برای مشتری q که بیانگر حساسیت تغییر تقاضا به تغییر قیمت است؛

d_{qst}^0 سطح پایه تقاضای خدمت s برای مشتری q در دوره t که مستقل از قیمت است؛

pr_{ps}^0 قیمت مرجع (قیمت مشاهده شده در دوره قبل یا در سایر نقاط شبکه) برای خدمت s در مکانp ؛

A_{ls} یک ماتریس دودویی سازگاری بین انواع کمدها و انواع خدمات است که در آن سطرها معرف انواع خدمات و ستون‌ها معرف انواع لاکرها هستند. اگر کمد l قابلیت ارائه خدمت s را داشته باشد مقدار درایه مرتبط برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است. این مولفه محدودیت‌های فنی و عملیاتی سیستم را بیان می‌کند و تضمین می‌نماید که هر خدمت تنها به لاکرهایی تخصیص یابد که از نظر مشخصات فنی، ظرفیت و امکانات، قابلیت ارائه آن خدمت را دارند؛

M یک مقدار ثابت بزرگ؛

متغیرهای تصمیم

y_{il} متغیر صفر و یک که اگر کمد نوع l در گره i نصب شود برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است؛

Y_l متغیر عدد صحیح که تعداد کل کمدهای نصب‌شده از نوع l در کل شبکه را نشان می‌دهد؛

x_{ijst} متغیر صفر و یک که اگر خدمت s در دوره t از طریق یال $(i\ j) \in E$ (از مکان$i \in P$ به گره تقاضای $j \in Q$) تامین شود برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است؛

C_{ijst} متغیر صفر و یک که اگر خدمت s مشتری q در دوره t به مکان p تخصیص یابد برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است؛

π_{is} قیمت تعیین شده برای خدمت s در گره i ؛

R_{ijst} مجموع درآمد حاصل از ارائه خدمت s به گره تقاضای $j \in Q$ از محل $i \in P$ در دوره t؛

D_{jst} میزان تقاضای تحقق یافته در گره j برای خدمت s در دوره t که تابعی از قیمت و کشش تقاضاست؛

ارائه مدل ریاضی. تابع هدف مدل، بیشینه‌سازی سود کل سیستم کمدهای هوشمند است که از مجموع درآمد حاصل از خدمات ارائه‌شده به مشتریان منهای هزینه‌های حمل‌ونقل، ساخت، نصب و استقرار تشکیل می‌شود که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

رابطه(۱)
$$max\ Z = \sum_{i\in P}\sum_{j\in Q}\sum_{s\in S_q}\sum_{t\in T} R_{ijst} - \sum_{(ij)\in E}\sum_{s\in S_q}\sum_{t\in T} c_{ij}x_{ijst} - \sum_{l\in L} \acute{c}_l Y_l - \sum_{i\in P}\sum_{l\in L} c_i^{site} y_{il} - \sum_{i\in P}\sum_{l\in L} c_{il}^{inst} y_{il}$$

محدودیت‌های مدل به شرح زیر است:

رابطه(۲)
$$\sum_{l\in L} y_{il} \le N_i \qquad \forall i \in P$$

این محدودیت تضمین می‌کند که مجموع کمدهای نصب شده از انواع مختلف در هر مکان از ظرفیت فیزیکی آن مکان تجاوز نکند.

(۳)
$$\sum_{i\in P}\sum_{l\in L} A_{ls} y_{il} \ge 1 \qquad \forall s \in S_q$$

رابطه بالا تضمین می‌کند که هر خدمت مورد تقاضای هر گره در دوره t توسط حداقل یک کمد که قادر به ارائه آن خدمت است، تامین خواهد شد. به‌منظور کنترل تصمیمات قیمت‌گذاری و جلوگیری از رفتارهای غیرواقعی یا زیان‌ده، کران‌های پایین و بالای قیمت در مدل تعریف می‌شوند:

(۴)
$$pr_{is}^{min} \le \pi_{is} \le pr_s^{Hd} \qquad \forall i \in P;\ \forall s \in S$$

در رابطه (۴) قیمت هر خدمت باید در یک بازه کنترل‌شده قرار گیرد بطوریکه قیمت خدمت s در گره i بین کف قیمت p_{is}^{min} و حداکثر برابر با قیمت تحویل درب منزل pr_s^{Hd} است. بدین ترتیب قیمت خدمات بر اساس بهای تمام شده و نیز قیمت تحویل کالا درب منزل تعیین خواهد شد.

(۵)
$$\sum_{i\in P}(\pi_{is} - pr_{is}^{min}) \le \Delta \mathrm{pr} \qquad \forall s \in S$$

قید فوق نیز مانع می‌شود که قیمت در همه مکان‌ها همزمان به حداکثر برسند تا ضمن اعمال یك سیاست کلان شبکه‌ای در قیمت‌گذاری، مزیت تحویل در کمد تضمین گردد.

$$D_{jst} = \sum_{i \in P} C_{ijst} \left[d^0_{jst} - \alpha_{qs} \cdot (\pi_{is} - pr^0_{is}) \right] \quad \forall j \in Q;\ \forall s \in S;\ \forall t \in T \tag{۶}$$

این تابع ارتباط تقاضا با قیمت را برقرار می‌کند و کشش قیمتی α_{qs} تضمین می‌کند که تقاضا منفی نشود. همچنین تقاضای تحقق یافته مشتري q برای خدمت s در دوره t بر اساس متغیر تخصیص مرتبط فعال می‌شود.

$$C_{ijst} \leq \sum_{l \in L} A_{ls} y_{il} \qquad \forall i \in P\ \forall j \in Q\ \forall s \in S\ \forall t \in T \tag{۷}$$

رابطه فوق بیان می‌کند تخصیص تنها زمانی مجاز است که سایت انتخابی p کمدی داشته باشد که بتواند خدمت s را ارائه کند.

$$\sum_{(ij) \in E} x_{ijst} \leq M \times C_{ijst} \qquad \forall i \in P\ \forall j \in Q\ \forall s \in S\ \forall t \in T \tag{۸}$$

این رابطه ارتباط بین دو متغیر صفر و یک انتخاب یال و تخصیص را بیان می‌کند یعنی اگر تخصیص انجام شود آنگاه مسیر یال مربوطه می‌تواند فعال شود تا تقاضا برآورده شود.

$$\sum_{j \in Q} D_{jst} x_{ijst} \leq \sum_{l \in L} k_{ls} y_{il} \qquad \forall i \in P;\ \forall s \in S;\ \forall t \in T \tag{۹}$$

رابطه فوق بیان می‌کند که حجم تخصیص‌یافته به هر مکان p برای خدمت s در دورهt نباید از ظرفیت نصب‌شده در آن محل بیشتر شود. همزمان تضمین می کند که تخصیص کمد از محل p به مشتریان تنها زمانی مجاز است که در آن سایت کمدی نصب شده باشد. محدودیت‌های زیر ارتباط بین درآمد به قیمت و تقاضا را نشان می دهد و تضمین می کند که سود فقط زمانی مثبت است که تخصیص انجام شده باشد.

$$R_{ijst} \leq \pi_{is} D_{jst} \qquad \forall p \in P;\ \forall q \in Q; \forall s \in S;\ \forall t \in T \tag{۸}$$

$$0 \leq R_{ijst} \leq M \times C_{ijst} \quad \forall i \in P;\ \forall j \in Q; \forall s \in S;\ \forall t \in T \tag{۹}$$

$$Y_l = \sum_{i \in P_l} y_{il} \qquad \forall l \in L \tag{۱۰}$$

رابطه فوق اطمینان می‌دهد که تعداد کل کمدهای نوع l برابر با تعداد نصب شده در تمام مکان‌های ممکن باشد. محدودیت (۱۱) نیز نوع متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

$$Y_l \in \mathbb{Z}^+; D_{qst}\ \pi_{is}\ R_{ijqt} \geq 0 \forall i \in P;\ \forall j \in Q; \forall s \in S;\ \forall t \in T\ ,\ x_{\text{ijst}} \in \{0,1\}; y_{il} \tag{۱۱}$$

مدل ریاضی پیشنهادی برای مساله مکان‌یابی- قیمت‌گذاری کمدهای هوشمند در شبکه لجستیک تحویل کالا از نوع مختلط عدد صحیح غیرخطی بوده و هدف آن بیشینه‌سازی سود کل سیستم است.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

پس از توسعه مدل ریاضی و پیاده‌سازی آن در محیط پایتون با استفاده از کتابخانه‌های بهینه‌سازی، در این بخش نتایج محاسباتی حاصل از اجرای مدل ارائه و تحلیل می‌شود. هدف، بررسی عملکرد مدل پیشنهادی از نظر کارایی محاسباتی، رفتار اقتصادی سیستم و تحلیل حساسیت

نسبت به پارامترهاست. از آنجا که مدل ریاضی توسعه‌یافته یک برنامه‌ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح غیرخطی است به‌منظور تضمین حل مدل در زمان معقول، برخی روابط غیرخطی از طریق تبدیل‌های خطی‌سازی و تعریف متغیرهای ترکیبی در چارچوب برنامه‌ریزی محدودیت ها بازنویسی شده‌اند. این بازنویسی امکان استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی (Integer-Constraint Hybrid Solving) در محیط CP-SAT Solver را فراهم می‌کند. در نتیجه، مدل نهایی در قالب Mixed Integer Linear CP-SAT model پیاده‌سازی شده است. برای حل مدل از حل‌کننده CP-SAT در بسته Google OR-Tools استفاده شده است. این حل‌گر بر اساس ترکیبی از تکنیک‌های زیر عمل می‌کند:

- Conflict-Driven Clause Learning (CDCL): برای جست‌وجوی هوشمندانه در فضای جواب‌ها؛
- Lazy Clause Generation: جهت حذف قیود غیرضروری در زمان اجرا؛
- Branch-and-Bound + SAT Propagation: برای ترکیب جست‌وجوی دودویی و استنتاج منطقی؛
- Presolve Reduction: برای ساده‌سازی دامنه متغیرها قبل از جست‌وجو؛
- Heuristic Restarting: برای جلوگیری از بن‌بست در گره‌های جست‌وجو؛

کد مدل در محیط Python 3.10 با استفاده از بسته های مندرج در جدول (۲) اجرا شده است.

جدول ۲. بسته‌های استفاده شده جهت مدل‌سازی در پایتون

کاربرد	کتابخانه
مدل‌سازی قیود و متغیرهای عدد صحیح	networkx
ساخت گراف شبکه و محاسبه مسیرها و هزینه‌ها	numpy, pandas
پردازش داده‌ها و تولید نمونه‌های آزمایشی	ortools.sat.python.cp_model
ترسیم گراف‌ها و نمودارهای نتایج	matplotlib

برخی مزایای روش CP-SAT نسبت به سایر روش‌ها به شرح زیر است:

- قابلیت مدل‌سازی قیود منطقی (AND, OR, IMPLY) ؛
- پشتیبانی از متغیرهای گسسته و غیرخطی بدون نیاز به خطی‌سازی صریح؛
- پایداری عددی بالا نسبت بهMILP Solver ها در مدل‌های ترکیبی؛
- سرعت بالاتر در نمونه‌های متوسط تا بزرگ با ساختار شبکه ای(network-based) ؛

۱.٤. آماده‌سازی داده‌های ورودی

مدل ریاضی در محیط پایتون در چند گام اصلی پیاده‌سازی شده است. در مرحله نخست، مجموعه‌ها و پارامترهای اصلی شامل مشتریان، مکان‌های بالقوه نصب، انواع کمد و خدمات تعریف و هزینه‌های حمل‌ونقل میان گره‌ها بر اساس گراف وزن‌دار محاسبه شدند. سپس متغیرهای تصمیم، قیود مدل و تابع هدف تعریف شدند. در مرحله بعد، داده‌های مجموعه‌های مربوط به گره‌ها، مکان‌های بالقوه، انواع کمدها، خدمات و مشتریان تعریف شدند. سپس برای هر مجموعه، مقادیر عددی پارامترها (مانند ظرفیت کمدها، هزینه نصب، اجاره مکان، هزینه حمل‌ونقل بین گره‌ها و کشش قیمتی تقاضا) به گونه‌ای مقداردهی شدند که امکان آزمون مدل در مقیاس‌های مختلف فراهم شود. شبکه لجستیکی نیز به‌صورت یک گراف پیوسته شامل گره‌ها و یال‌های جهت‌دار ایجاد شد و هزینه حمل‌ونقل بین هر دو گره بر اساس فاصله اقلیدسی آن‌ها محاسبه گردید. این ساختار به مدل اجازه می‌دهد مسیرهای واقعی و قابل‌اجرا میان مکان کمدها و گره‌های مشتری را در نظر گیرد.

۲.٤. ساختار مسائل نمونه

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل ریاضی توسعه‌یافته، مجموعه‌ای از بیست مساله نمونه طراحی گردید تا تأثیر تغییر ابعاد مدل بر زمان حل، تعداد متغیرها، تعداد محدودیت‌ها و مقدار تابع هدف بررسی شود. ساختار آزمایش‌ها به‌صورت تدریجی افزایش یافته است تا بتوان روند افزایش پیچیدگی مدل را تحلیل کرد. هر مساله نمونه با ترکیب مقادیر مختلف این مجموعه‌ها ساخته شده است. برای مثال، در نمونه‌های ۱ تا ۵، ابعاد مدل کوچک بوده و تنها ۱نوع کمد، ۲ نوع خدمت و ۵ گره تقاضا در یک دوره زمانی بررسی شده است. در مقابل، در تست‌های ۱۶ تا ۲۰، مدل در ابعاد بزرگ‌تر با ۴ نوع کمد، ۵ نوع خدمت، ۲۰ گره تقاضا و ۲۵ مکان بالقوه پیاده‌سازی گردیده است.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، با افزایش تدریجی ابعاد مسئله، تعداد متغیرهای صفر و یک و عدد صحیح و همچنین تعداد محدودیت‌ها رشد نمایی پیدا می‌کند به‌طوری‌که از ۱۹۱۵ محدودیت در کوچک‌ترین نمونه به ۷۱۲۹۹۵ محدودیت در بزرگ‌ترین نمونه افزایش می‌یابد. این روند افزایش به‌صورت غیرخطی بوده و بنابراین مدل از نظر محاسباتی در رده مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد. چنین طراحی مسائل نمونه در بعضی از مطالعات مشابه از جمله پژوهش پپل و اسپینلر[1] (۲۰۲۲) که مجموعه‌ای از مسائل نمونه با افزایش تدریجی تعداد مکان‌های کمد و گره‌های تقاضا را برای تحلیل هزینه و پایداری ارائه کردند، نیز مشاهده شده است [۲۹]. بنابراین طراحی نمونه‌ها در این پژوهش، با هدف بررسی پایداری مدل، رفتار تابع هدف، زمان حل و حساسیت نتایج نسبت به ابعاد شبکه تحت بررسی انجام شده است. این ساختار به پژوهشگر امکان می‌دهد تا علاوه بر تحلیل کارایی الگوریتم در مقیاس‌های مختلف، اثرات هم‌زمان افزایش تعداد خدمات، کمدها و دوره‌های زمانی را بر پیچیدگی مدل و کیفیت جواب‌ها بررسی کند.

جدول ۳. ساختار مسائل نمونه

ردیف	تعداد دوره زمانی	تعداد لاکر	تعداد خدمت	تعداد نقاط بالقوه	تعداد نقاط تقاضا	تعداد متغیر عدد صحیح	تعداد متغیر باینری	تعداد محدودیت‌ها
۱	۱	۱	۲	۱۰	۵	۵۰۶	۳۲۵	۱۹۱۵
۲	۲	۱	۲	۱۰	۵	۱۴۳۸	۶۵۵	۵۰۶۱
۳	۳	۱	۲	۱۰	۵	۱۹۰۴	۸۲۰	۶۶۳۴
٤	۴	۱	۲	۱۰	۵	۲۸۳۶	۱۱۵۰	۹۷۸۰
٥	۵	۱	۲	۱۰	۵	۳۳۰۲	۱۳۱۵	۱۱۳۵۳
٦	۱	۲	۳	۱۵	۱۰	۸۳۷۶	۳۳۴۵	۲۸۵۸۱
۷	۲	۲	۳	۱۵	۱۰	۱۵۲۸۱	۵۷۴۵	۵۱۶۸۱
۸	۳	۲	۳	۱۵	۱۰	۲۰۸۰۵	۷۶۶۵	۷۰۲۰۳
۹	۴	۲	۳	۱۵	۱۰	۲۹۰۹۱	۱۰۵۴۵	۹۷۹۴۱
۱۰	۵	۲	۳	۱۵	۱۰	۳۷۳۷۷	۱۳۴۲۵	۱۲۵۶۷۹
۱۱	۱	۳	۴	۲۰	۱۵	۲۱۵۲۰	۸۰۷۰	۷۲۶۳۹
۱۲	۲	۳	۴	۲۰	۱۵	۴۵۰۱۶	۱۶۱۵۵	۱۵۱۱۵۲
۱۳	۳	۳	۴	۲۰	۱۵	۶۴۲۴۰	۲۲۷۷۰	۲۱۵۴۴۴
۱٤	۴	۳	۴	۲۰	۱۵	۸۳۴۶۴	۲۹۳۸۵	۲۷۹۷۰۱
۱۵	۵	۳	۴	۲۰	۱۵	۱۰۴۸۲۴	۳۶۷۳۵	۳۵۱۱۲۱
۱٦	۱	۴	۵	۲۵	۲۰	۴۲۸۳۴	۱۵۵۸۵	۱۴۳۹۴۷
۱۷	۲	۴	۵	۲۵	۲۰	۸۵۳۹۸	۳۰۱۴۵	۲۸۶۱۷۹
۱۸	۳	۴	۵	۲۵	۲۰	۱۲۷۹۷۲	۴۴۷۰۵	۴۲۸۴۵۱
۱۹	۴	۴	۵	۲۵	۲۰	۱۷۰۵۴۶	۵۹۲۶۵	۵۷۰۷۲۳
۲۰	۵	۴	۵	۲۵	۲۰	۲۱۳۱۲۰	۷۳۸۲۵	۷۱۲۹۹۵

1. Peppel & Spinler

نتیجه حل مساله‌های نمونه در جدول ۴ درج شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، زمان حل بین ۲ تا ۳۹۷ ثانیه متغیر بوده که با توجه به ابعاد مساله قابل توجیه است. ضمنا تابع هدف مساله اول با توجه به ترکیب پارامترهای ورودی و متغیرهای تصمیم، منفی بوده که ناشی از بزرگتر بودن هزینه ها نسبت به درآمدها دارد. تغییر مقدار تابع هدف نیز به ترکیب پارامترهای ورودی، متغیرهای تصمیم و ابعاد مساله بستگی داشته و رفتار معقولی را نشان می‌دهد.

جدول ۴. نتایج حل مسائل نمونه

شماره مساله	تابع هدف	زمان حل	شماره مساله	تابع هدف	زمان حل
۱	-۱۸۶	۲/۱۴	**۱۱**	۸۴۱۲	۳۸۳/۹۱
۲	۳۵۰۲	۱۰/۸۳	**۱۲**	۲۴۱۹۷	۳۷۴/۲۸
۳	۶۲۸۶	۴۱/۰۹	**۱۳**	۳۹۸۳۴	۳۷۲/۴۷
٤	۱۰۷۲۶	۷۰/۹۳	**١٤**	۵۴۰۵۱	۳۷۲/۸۴
۵	۱۴۱۵۸	۱۵۳/۵۰	**۱۵**	۷۱۱۸۹	۳۷۶/۷۸
٦	۵۳۷۹	۳۶۴/۴۶	**١٦**	۱۵۷۶۴	۳۸۲/۲۸
۷	۱۴۶۲۱	۳۶۷/۹۹	**۱۷**	۲۸۹۸۷	۳۷۶/۵۳
۸	۱۸۵۵۷	۳۶۶/۴۵	**۱۸**	۵۵۶۶۹	۳۸۰/۱۷
۹	۳۵۶۴۵	۳۷۱/۴۵	**۱۹**	۷۳۱۹۵	۳۸۲/۷۳
۱۰	۴۳۱۰۸	۳۶۹/۶۵	**۲۰**	۷۷۵۷۱	۳۹۶/۸۲

۳.٤. بحث و تحلیل نتایج عددی

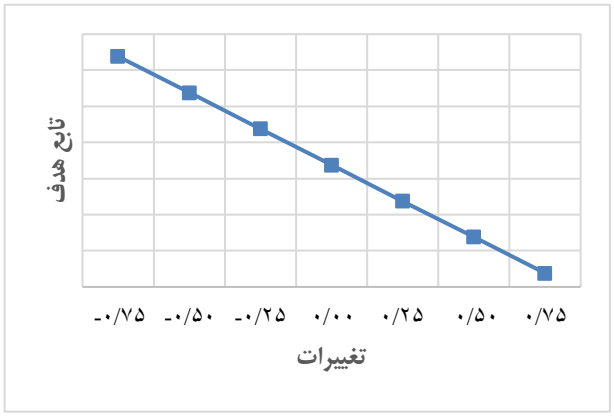
برای بحث در مورد نتایج و تحلیل حساسیت، ابتدا مساله شماره ۱۰ به عنوان نمونه مبنا انتخاب شد. این مساله دارای ساختار میانی از نظر اندازه شبکه و پارامترهاست. پارامترهای مدل که حساسیت آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت شامل هزینه ساخت و سرمایه‌گذاری کمدها، هزینه نصب، هزینه مکان‌یابی، ظرفیت‌ها و ضریب کشش قیمتی خدمات است. در این مطالعه، برای هر یک از پارامترهای فوق، مقدار پایه داده‌ها گرفته شده و سپس تغییرات در بازه‌های ۷۵%- تا ۷۵%+ نسبت به مقدار پایه تغییر یافته است. نتایج حل مساله ها در جدول۵ نشان داده شده است.

جدول۵. خروجی تحلیل حساسیت پارامترها

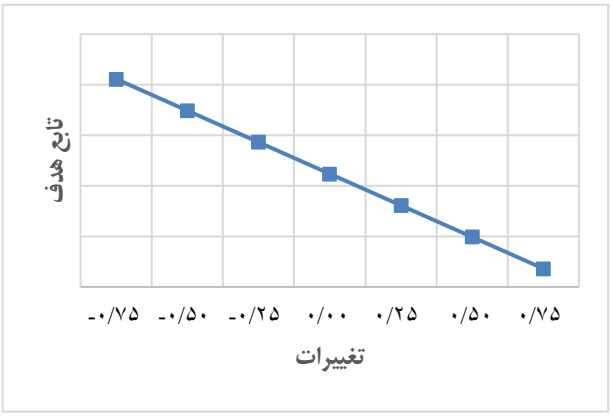
ردیف	پارامتر	تغییرات	تابع هدف	ردیف	پارامتر	تغییرات	تابع هدف
۰	هزینه خرید/ساخت لاکر	-۰/۷۵	۶۳۰۶۶	۱۸	ظرفیت	-۰/۰۵	۵۱۳۷۱
۱	هزینه خرید/ساخت لاکر	-۰/۵۰	۵۹۹۴۱	۱۹	ظرفیت	-۰/۱۰	۴۶۶۴۸
۲	هزینه خرید/ساخت لاکر	-۰/۲۵	۵۶۸۱۶	۲۰	ظرفیت	-۰/۱۵	۴۵۶۴۶
۳	هزینه خرید/ساخت لاکر	۰	۵۳۶۹۱	۲۱	هزینه اجاره مکان	-۰/۷۵	۵۷۰۶۶
۴	هزینه خرید/ساخت لاکر	۰/۲۵	۵۰۵۶۶	۲۲	هزینه اجاره مکان	-۰/۵۰	۵۵۹۴۱
۵	هزینه خرید/ساخت لاکر	۰/۵۰	۴۷۴۴۱	۲۳	هزینه اجاره مکان	-۰/۲۵	۵۴۸۱۶
۶	هزینه خرید/ساخت لاکر	۰/۷۵	۴۴۳۱۶	۲۴	هزینه اجاره مکان	۰	۵۳۶۹۱
۷	هزینه نصب	-۰/۷۵	۵۵۱۹۱	۲۵	هزینه اجاره مکان	۰/۲۵	۵۲۵۶۶
۸	هزینه نصب	-۰/۵۰	۵۴۶۹۱	۲۶	هزینه اجاره مکان	۰/۵۰	۵۱۴۴۱
۹	هزینه نصب	-۰/۲۵	۵۴۱۹۱	۲۷	هزینه اجاره مکان	۰/۷۵	۵۰۳۱۶

ردیف	پارامتر	تغییرات	تابع هدف	ردیف	پارامتر	تغییرات	تابع هدف
۱۰	هزینه نصب	۰	۵۳۶۹۱	۲۸	ضریب الاستیسیته قیمت	۰/۲۰	۵۶۲۷۶
۱۱	هزینه نصب	۰/۲۵	۵۳۱۹۱	۲۹	ضریب الاستیسیته قیمت	-۰/۱۵	۳۷۶۳۹
۱۲	هزینه نصب	۰/۵۰	۵۲۶۹۱	۳۰	ضریب الاستیسیته قیمت	۰/۱۰	۳۷۶۳۸
۱۳	هزینه نصب	۰/۷۵	۵۲۱۹۱	۳۱	ضریب الاستیسیته قیمت	۰	۳۷۶۳۷
۱۴	ظرفیت	۰/۱۵	۵۳۶۹۱	۳۲	ضریب الاستیسیته قیمت	-۰/۱۰	۳۷۶۳۶
۱۵	ظرفیت	۰/۱۰	۵۳۶۸۸	۳۳	ضریب الاستیسیته قیمت	-۰/۱۵	۳۷۶۳۵
۱۶	ظرفیت	۰/۰۵	۵۳۶۳۱	۳۴	ضریب الاستیسیته قیمت	-۰/۲۰	۳۷۶۳۴
۱۷	ظرفیت	۰	۵۳۵۷۲				

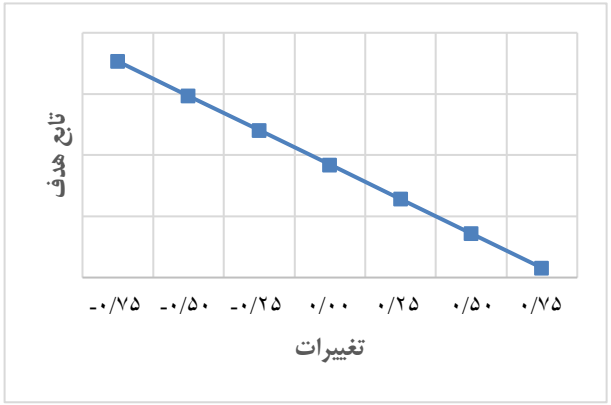
نتایج نشان می‌دهد که تابع هدف بیشترین حساسیت را نسبت به هزینه ساخت و ظرفیت کمدها دارد. افزایش هزینه ساخت منجر به کاهش محسوس سود می‌شود، در حالی که افزایش ظرفیت‌ها باعث رشد سود تا حد مشخصی گردید و پس از آن اثر افزایشی کاهش یافت (به دلیل اشباع شدن تقاضا). در مقابل، تغییرات در هزینه نصب و هزینه مکان اثر نسبتاً کمتری بر تابع هدف داشتند. نمودارهای حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای انتخابی در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند. در این نمودارها محور افقی نشان‌دهنده درصد تغییر پارامتر و محور عمودی مقدار تابع هدف است.



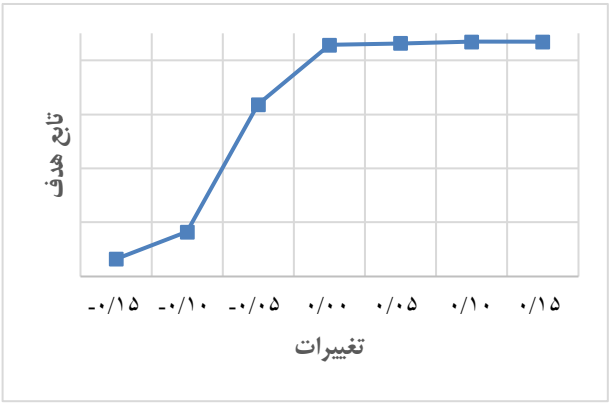
الف. تغییر در هزینه نصب



ب. تغییر در هزینه خرید



ج. تغییر در هزینه اجاره مکان



د. تغییر در ظرفیت کمدها

شکل ۲. نمودار تحلیل حساسیت تابع هدف نسبت به پارامترهای انتخابی

همانطور که مشاهده می‌شود افزایش هزینه نصب باعث کاهش تقریباً خطی در مقدار تابع هدف می‌شود. هزینه نصب جزء سرمایه‌گذاری اولیه است و افزایش آن نرخ بازگشت سرمایه را پایین می‌آورد، اما برخلاف هزینه مکان که اثر بلندمدت دارد، اثر هزینه نصب در بلندمدت کمتر است. بنابراین، شیب منحنی اندکی ملایم‌تر از نمودار هزینه مکان است. در مراحل اولیه توسعه شبکه، کنترل هزینه‌های نصب و استانداردسازی تجهیزات اهمیت دارد. افزایش هزینه نصب بیش از ۶۰% می‌تواند سود را تا ۵% کاهش دهد. با افزایش ۸۰% در هزینه ساخت، سود خالص از حدود ۶۲۵۰۰ به ۴۵۰۰۰ کاهش یافته است. هزینه ساخت یا خرید کمد بخش اصلی سرمایه‌گذاری در پروژه است و اثر مستقیمی بر سود دارد. اما چون این هزینه معمولاً یک‌باره است و در کل شبکه تقسیم می‌شود، کاهش سود ناشی از آن تدریجی است. طراحی ماژولار و تولید اقتصادی کمدها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بازده پروژه را افزایش دهد. مدل نشان می‌دهد که سود نسبت به هزینه سرمایه‌گذاری کاملاً حساس است و هرگونه افزایش در این هزینه باید با افزایش تقاضا یا قیمت جبران شود.

همچنین رابطه بین هزینه مکان و تابع هدف خطی و منفی است یعنی هرچه هزینه افزایش می‌یابد، مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد. افزایش هزینه اجاره یا آماده‌سازی محل نصب، مستقیماً بر سود اثر منفی دارد. به‌دلیل ساختار خطی تابع هدف نسبت به این پارامتر، هر افزایش ۱۰% در هزینه مکان تقریباً باعث کاهش مشابهی در سود می‌شود. این مهم نشان می‌دهد که مدل نسبت به هزینه مکان حساس است، به‌ویژه در مناطق شهری با اجاره بالا. در تصمیم‌گیری برای مکان‌یابی کمد، هزینه زمین یا اجاره باید به‌عنوان معیار کلیدی در نظر گرفته شود. مکان‌هایی با اجاره بالا، حتی اگر تقاضای بیشتری داشته باشند، ممکن است سودآوری کلی شبکه را کاهش دهند.

تابع هدف با افزایش ظرفیت از ۱۵ % تا حدود صفر رشد واضحی دارد و پس از آن تقریباً به حالت اشباع می‌رسد. در مقادیر پایین ظرفیت، محدودیت سخت در ارائه خدمات وجود دارد و بخشی از تقاضا ارضا نمی‌شود، بنابراین سود کاهش می‌یابد. با افزایش ظرفیت تا سطح بهینه (در حدود ظرفیت پایه)، امکان خدمت‌دهی کامل فراهم شده ولی پس از آن، افزایش ظرفیت دیگر سود را زیاد نمی‌کند چون تقاضا محدود است و ظرفیت مازاد بلااستفاده می‌ماند. در خصوص حساسیت تابع هدف به ضریب کشش قیمت تا مقدار $\alpha \approx ۰/۱۵$ تقریباً ثابت مانده و در محدوده ۳۷۵۰۰ واحد حفظ می‌شود، اما با افزایش α به ۰/۲ ناگهان جهش شدیدی کرده و مقدار تابع هدف به بیش از ۵۵۰۰۰ واحد می‌رسد.

برای تحلیل بیشتر ضریب همبستگی پیرسون (r) و میزان رابطه آن بین تغییرات پارامترهای منتخب و تابع هدف نیز محاسبه شده است. ضریب حساسیت (S) اندازه‌گیری می‌کند که تابع هدف تا چه میزان به تغییرات یک پارامتر خاص به‌صورت خطی واکنش نشان می‌دهد (جدول۶).

جدول ۶. تحلیل ضریب همبستگی و ضریب حساسیت

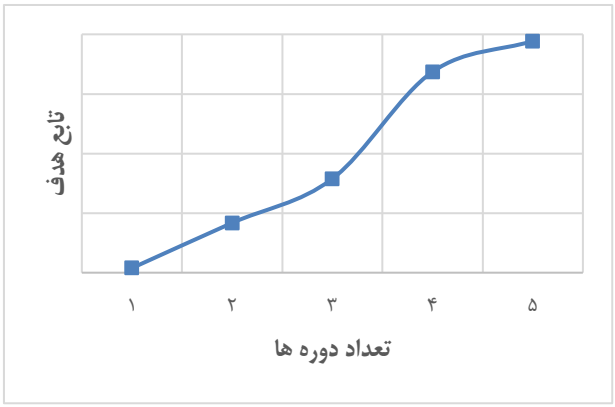
پارامتر	(r)	(S)	نتیجه
هزینه خرید/ساخت لاکر	-۱/۰۰۰	-۰/۲۳۱	رابطه کاملاً معکوس و اثر منفی قوی بر تابع هدف؛ کنترل این هزینه حیاتی است.
هزینه نصب	-۱/۰۰۰	-۰/۰۳۷	رابطه معکوس ولی اثر عددی ضعیف؛ اولویت پایین‌تر.
ظرفیت	۰/۸۸	۰/۵۲۹	رابطه مستقیم قوی و اثر مثبت بزرگ؛ افزایش ظرفیت بیشترین بهبود را می‌دهد.
هزینه اجاره مکان	-۱/۰۰۰	-۰/۰۸۴	رابطه معکوس بسیار قوی اما اثر کمّی متوسط/کم؛ قابل‌مدیریت‌تر از هزینه ساخت.
ضریب الاستیسیته قیمت	۰/۵۶۸	۰/۴۱۱	رابطه مستقیم متوسط با اثر مثبت قابل‌توجه؛ پس از ظرفیت، اهرم مهمی است.

تفسیر مقدار r بدین شرح است. اگر $r \approx +1$ باشد آنگاه بین پارامتر نظر و تابع هدف رابطه مستقیم و قوی وجود دارد یعنی با افزایش ارزش پارامتر، مقدار تابع هدف نیز افزایش می‌یابد. همچنین اگر $r \approx -1$ رابطه قوی اما معکوس بین دو مولفه وجود دارد بطوریکه با افزایش پارامتر، تابع هدف کاهش می‌یابد. دست آخر اگر $r \approx 0$ رابطه خطی معنی‌داری بین آن‌ها وجود ندارد.

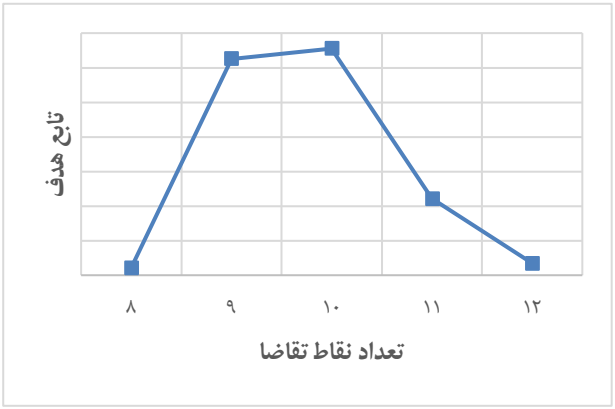
نتایج تحلیل حساسیت تابع هدف بر مجموعه‌های مکان‌های بالقوه نصب کمدها، گره‌های تقاضا، انواع کمدها، انواع خدمات و دوره‌های زمانی تصمیم‌گیری در ادامه و شکل ۳ تشریح شده است. مسایل نمونه شامل ۲۰ مساله مستقل بودند که هرکدام ترکیب متفاوتی از تعداد مکان‌های بالقوه، نقاط تقاضا، انواع لاکر، انواع خدمت و دوره‌های زمانی را در بر داشتند. در هر نمونه، مدل مکان‌یابی-قیمت‌گذاری اجرا و مقادیر تابع هدف، زمان حل، تعداد متغیرها، تعداد محدودیت‌ها و مقادیر کلیدی متغیرهای تصمیم (قیمت و تقاضای تحقق‌یافته) محاسبه و ثبت گردید. برای تحلیل دقیق اثر اندازه مجموعه‌ها، یکی از نمونه‌ها (مساله شماره ۸) به عنوان مبنا انتخاب شد، زیرا در آن ترکیب متوسطی از اندازه مجموعه‌ها (۱۰ نقطه بالقوه، ۱۵ گره تقاضا، ۳ نوع کمد و ۲ نوع خدمت) وجود داشت. سپس در سناریوهای مختلف، اندازه هر مجموعه به صورت جداگانه تغییر یافت به‌طوری‌که در هر سناریو تنها یکی از مجموعه‌ها تغییر می‌کرد. نتایج تحلیل حساسیت مجموعه‌ها نشان می‌دهد که عملکرد مدل به‌صورت معناداری تحت تأثیر ابعاد مختلف ساختار شبکه قرار دارد. بیشترین تأثیر شامل تغییر تعداد دوره‌ها و افزودن یک نوع کمد جدید بود. به نظر می رسد افزایش تعداد دوره‌های زمانی باعث می‌شود مدل، تصمیمات قیمت‌گذاری و تخصیص خدمات را در بازه بلندمدت‌تر بصورت هماهنگ‌تری اتخاذ کند. شاید این موضوع منجر به افزایش پایداری درآمد و استفاده بهتر از ظرفیت کمدها می‌شود. از سوی دیگر، افزودن یک نوع جدید کمد باعث ایجاد انعطاف‌پذیری عملیاتی در شبکه شده و امکان پاسخگویی به طیف وسیع‌تری از تقاضاها را فراهم می‌کند. بیشترین رفتار نوسانی شامل تغییرات در تعداد مکان‌های بالقوه و نقاط تقاضا بود. طبق نموار ج شکل ۳، روند تغییرات نوسانی است بطوریکه تابع هدف ابتدا افزایش، سپس افت شدید و در نهایت مجدداً افزایش می‌یابد که بخشی از این تغییرات معمولاً به ترکیب پارامترهای ورودی بستگی دارد. افزایش مکان‌های بالقوه معمولاً باعث افزایش پوشش و سود می‌شود، اما اگر مکان‌های جدید در نقاط کم‌تقاضا یا با هزینه بالای اجاره قرار گیرند، باعث کاهش سود کل خواهند شد. افت در نقاط ۱۵ تا ۱۶ نشان‌دهنده ورود مکان‌هایی است که با توجه به داده‌ها، نسبت هزینه به تقاضای آن‌ها نامطلوب بوده است. همچنین جهش در نقطه ۱۷ نیز احتمالاً ناشی از اضافه‌شدن مکانی استراتژیک با تقاضای بالاست. بنابراین نتیجه‌گیری می شود که توسعه شبکه لاکر باید به‌صورت هدفمند و بر پایه تحلیل مکانی انجام شود. افزودن مکان‌های زیاد، بدون ارزیابی ارزش هر نقطه، می‌تواند سودآوری کل شبکه را کاهش دهد.

همچنین افزایش مکان‌های بالقوه همواره منجر به بهبود سود نمی‌شود، زیرا برخی مکان‌ها ممکن است دارای هزینه اجاره یا نصب بالایی باشند یا در مناطق با تقاضای پایین قرار گیرند. این امر باعث رفتار نوسانی در سود کل شبکه می‌شود. به‌طور مشابه، افزایش بیش از حد گره‌های تقاضا موجب افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل و پیچیدگی محاسباتی شبکه می‌گردد. بنابراین، وجود یک تعداد بهینه از مکان‌ها و نقاط تقاضا برای دستیابی به تعادل اقتصادی ضروری است. این نوسانات نشان می‌دهد که توسعه شبکه باید به‌صورت هدفمند و تدریجی انجام گیرد، نه صرفاً بر اساس افزایش کمّی مجموعه‌ها.

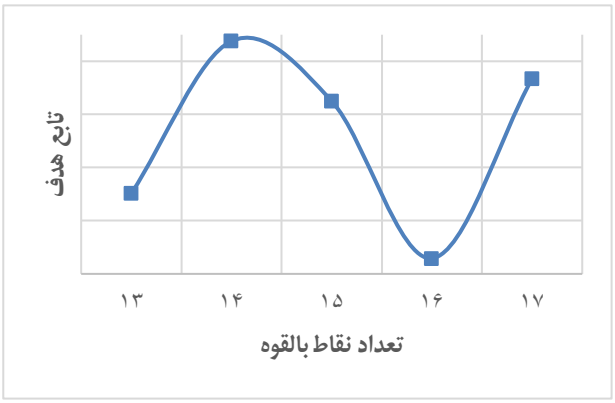
از سوی دیگر اگرچه افزودن خدمات جدید در ابتدا سود را افزایش می‌دهد، اما از تعداد ۳ به بعد، خدمات جدید باعث هم‌پوشانی با خدمات موجود و تقسیم بازار بین سرویس‌ها می‌شود. این پدیده که با عنوان اثر بازده نزولی شناخته می‌شود، موجب می‌گردد که سود خالص افزایش چشمگیری نداشته باشد. همین الگو در تعداد دوره‌ها نیز دیده می‌شود بطوریکه تا ۴ دوره زمانی، افزایش چشمگیر سود مشاهده می‌شود، ولی پس از آن، این افزایش تأثیر محسوسی بر تابع هدف نداشته و تنها زمان محاسبات و هزینه مدل را بیشتر می‌کند. افزایش تدریجی انواع کمدها ابتدا باعث افزایش هزینه‌های نصب و نگهداری شده، بدون آنکه مزیت تنوع ظرفیت و سرویس‌دهی به‌قدر کافی سود را جبران کند. اما وقتی نوع چهارم افزوده می‌شود، تنوع ظرفیت‌ها و پوشش خدمات افزایش می‌یابد و در نتیجه تقاضای بیشتری جذب شده و سود کل بالا می‌رود. مدل پیشنهادی نسبت به تنوع منطقی در انواع کمد واکنش مثبت دارد. افزودن نوع جدید تنها زمانی مؤثر است که ویژگی‌های عملکردی آن (مثلاً ظرفیت یا هزینه متفاوت) موجب تنوع واقعی در تصمیمات شود.



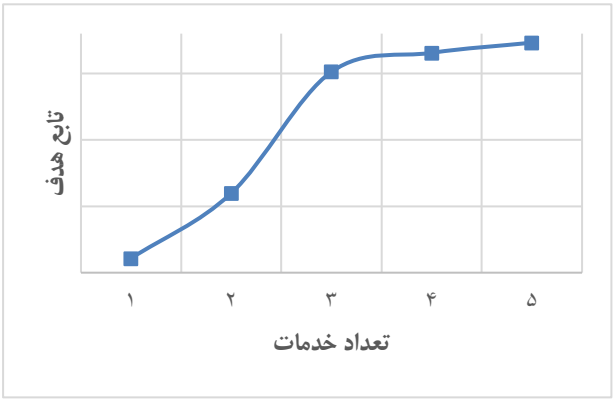
الف. تغییر در مجموعه دوره های زمانی



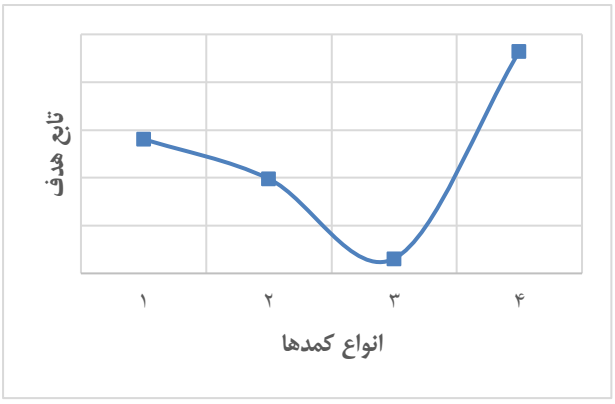
ب. تغییر در مجموعه نقاط تقاضا



ج. تغییر در مجموعه نقاط بالقوه



د. تغییر در مجموعه تعداد خدمات



ه. تغییر در مجموعه انواع کمد

شکل۳. نمودار تحلیل حساسیت تابع هدف نسبت به مجموعه‌ها

تحلیل‌های انجام‌شده در بخش قبل نشان می‌دهد که طراحی شبکه کمدهای هوشمند تصمیمی چندبعدی با اثرات اقتصادی، عملیاتی و اجتماعی است. مهم‌ترین نتایج مدیریتی حل مدل پیشنهادی عبارتنداز:

- ظرفیت کمد مهم‌ترین محرک سود است؛ افزایش ظرفیت تا حد بهینه سود را به‌شدت افزایش می‌دهد، اما پس از رسیدن به نقطه اشباع، ظرفیت بیشتر فقط هزینه ایجاد می‌کند و بازدهی ندارد؛
- هزینه ساخت کمدها بحرانی‌ترین عامل هزینه‌ای است و بیشترین کاهش سود را ایجاد می‌کند. کنترل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نسبت به سایر هزینه‌ها اهمیت بیشتری دارد؛
- توسعه شبکه باید هدفمند باشد؛ افزایش مکان‌های بالقوه یا نقاط تقاضا همیشه سود را بیشتر نمی‌کند و در بسیاری موارد به‌دلیل هزینه بالا یا تقاضای کم، سود شبکه کاهش می‌یابد؛
- تنوع خدمات و انواع کمد باید محدود و هوشمندانه باشد؛ افزودن خدمات یا انواع کمد جدید فقط زمانی سودآور است که ارزش عملیاتی واقعی ایجاد کند، در غیر این صورت باعث بازده نزولی و افزایش هزینه می‌شود؛
- افزودن دوره‌های زمانی و شناخت کشش قیمتی، ابزارهای کلیدی سیاست‌گذاری‌اند؛ تعداد دوره‌ها تا حد مشخصی سود را افزایش می‌دهد و برآورد دقیق کشش قیمتی به مدل اجازه می‌دهد قیمت‌گذاری سودآورتر و کارآمدتری انجام دهد؛

با وجود تلاش برای توسعه یک مدل جامع مکانیابی- قیمت‌گذاری برای کمدهای هوشمند در مرحله نهایی تحویل، این پژوهش با برخی محدودیت‌های منطقی و اجرایی مواجه بوده است. در این تحقیق، تقاضای مشتریان به‌صورت یک تابع خطی حساس به قیمت مدل‌سازی شده است. اگرچه این فرم در ادبیات پژوهش رایج و از نظر محاسباتی ساده و قابل حل است، اما در عمل رفتار تقاضای مشتریان ممکن است غیرخطی، آستانه‌ای یا مبتنی بر انتخاب گسسته باشد. همچنین در مدل ارائه‌شده فرض شده است که هر مشتری، خدمت مورد نیاز خود را صرفاً از نزدیک‌ترین کمد فعال دریافت می‌کند. این فرض باعث ساده‌سازی فرآیند تخصیص و کاهش پیچیدگی محاسباتی مدل می‌شود، اما در دنیای واقعی عواملی نظیر سطح خدمات، ظرفیت، ترجیحات فردی مشتریان و ازدحام کمدها نیز می‌توانند بر انتخاب محل خدمت تأثیرگذار باشند. در این پژوهش، تمرکز اصلی بر تحویل از طریق کمدهای هوشمند بوده و سایر روش‌های تحویل به‌صورت صریح در مدل لحاظ نشده‌اند. این فرض باعث ساده‌سازی ساختار مدل و تمرکز دقیق‌تر بر تصمیمات مکانیابی و قیمت‌گذاری کمدها شده است، اما در عین حال تعامل و جانشینی بالقوه میان روش‌های مختلف تحویل را نادیده می‌گیرد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به رشد چشمگیر تجارت الکترونیک و افزایش نیاز به سیستم‌های توزیع کارآمد در مرحله آخر تحویل کالا، استفاده از کمدهای هوشمند به‌عنوان رویکردی نوین در لجستیک شهری اهمیت ویژه‌ای دارد. این پژوهش با هدف توسعه مدلی برای مکان‌یابی و قیمت‌گذاری خدمات کمدهای هوشمند در شبکه تحویل نهائی انجام شده است. یافته‌های این پژوهش، علاوه بر جنبه‌های نظری و الگوریتمی، شامل نتایج مدیریتی ارزشمندی برای شرکت‌های لجستیکی، اپراتورهای کمد و سیاست‌گذاران شهری است.

در ادامه پاسخ سوالات تحقیق ارائه می‌گردد. در پاسخ به سوال اول باید گفت بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، ظرفیت کمدها بالاترین ضریب حساسیت مثبت را دارد و در مقابل، هزینه خرید/ساخت کمدها دارای بزرگ‌ترین ضریب حساسیت منفی است. در سطح بعد، ضریب کشش قیمت و هزینه اجاره مکان نیز اثر قابل‌توجهی دارند.

در مورد تاثیر ظرفیت کمدها بر سود شبکه نیز نتایج نشان داد که تابع هدف نسبت به ظرفیت رفتاری صعودی-اشباعی دارد. در محدوده‌های پایین‌تر از ظرفیت پایه (مثلاً کاهش ۱۰-۱۵ درصدی)، محدودیت ظرفیت باعث می‌شود بخشی از تقاضا بدون پاسخ بماند؛ در نتیجه، مقدار سود به‌سرعت کاهش می‌یابد و شبکه از نظر خدمت‌دهی ناکارا می‌شود. با افزایش ظرفیت تا حوالی مقدار پایه، امکان خدمت‌دهی کامل‌تر

فراهم شده و سود افزایش می‌یابد. بعد از این نقطه، افزایش بیشتر ظرفیت عملاً به ظرفیت مازاد بلااستفاده منجر می‌شود، زیرا سطح تقاضا محدود است و تقاضای جدیدی ایجاد نمی‌شود.

در خصوص تاثیر دوره زمانی و انواع خدمت بر سود شبکه نیز نتایج نشان می‌دهد که تغییر در اندازه مجموعه‌های اصلی مدل شامل دوره‌های زمانی، نقاط تقاضا، مکان‌های بالقوه، انواع خدمات و انواع کمدها توامان اثرات اقتصادی و محاسباتی قابل‌توجهی بر مدل دارد ولی این اثرات الزاماً یکنواخت و خطی نیستند. افزایش تعداد دوره‌ها ابتدا موجب رشد قابل‌توجه سود می‌شود، زیرا مدل فرصت بیشتری برای قیمت‌گذاری پویا، تنظیم ظرفیت و تخصیص بهینه در طول زمان پیدا می‌کند. اما از یک حد به بعد (مثلاً بعد از ۳-۴ دوره)، بازده افزایشی کاهش یافته و سود تقریباً به حالت اشباع می‌رسد، در حالی که زمان حل و پیچیدگی محاسباتی همچنان افزایش می‌یابد. همچنین افزایش تعداد گره‌های تقاضا در ابتدا سود را افزایش می‌دهد، چون بازار بزرگ‌تر و فرصت فروش بیشتر می‌شود؛ اما پس از یک حد مطلوب، افزودن نقاط تقاضای جدید (با تقاضای کم یا فاصله زیاد) باعث افزایش هزینه حمل‌ونقل و کاهش حاشیه سود می‌شود. رفتار سود نسبت به تعداد مکان‌های بالقوه نوسانی است؛ برخی افزایش‌ها سود را بالا می‌برد (افزودن مکان‌های مهم با تقاضای بالا)، و برخی افزایش‌ها سود را کاهش می‌دهد (افزودن نقاط پرهزینه یا کم‌تقاضا). این موضوع نشان می‌دهد که توسعه شبکه باید هدفمند باشد، نه صرفاً بر اساس افزودن مکان‌های بیشتر. افزودن انواع خدمات تا حدود سه خدمت، سود را به‌طور معنی‌دار افزایش می‌دهد، چون بازار گسترده‌تر و نیازهای متنوع‌تری پوشش داده می‌شود. اما پس از آن، پدیده رقابت درون خانواده‌ای بین خدمات ظاهر می‌شود و خدمات جدید بخشی از تقاضای خدمات موجود را جذب کرده و در نتیجه، اضافه کردن خدمات بیشتر، سود را به‌صورت محدود و با بازده نزولی افزایش می‌دهد.

افزایش انواع کمد نیز در ابتدا ممکن است به دلیل افزایش هزینه و پیچیدگی، سود را کاهش دهد، اما وقتی نوع جدیدی با ویژگی‌های واقعاً متمایز (مثلاً ظرفیت بالاتر یا هزینه کمتر) اضافه شود، می‌تواند جهش مثبت در سود ایجاد کند. بنابراین، تنوع کمدها زمانی مفید است که تنوع عملکردی واقعی ایجاد کند.

با توجه به مباحث مطرح شده در بخش قبل، یک پیشنهاد برای تحقیقات آینده می تواند در نظر گرفتن ساختار چندکاناله تحویل برای ارائه خدمات لجستیکی باشد. همچنین می‌توان مدل را به‌گونه‌ای توسعه داد که شرکت لجستیکی مجموعه‌ای از خدمات چندکاناله را به‌صورت هم‌زمان ارائه دهد و مشتریان بتوانند براساس قیمت، فاصله، زمان تحویل و ترجیحات شخصی، یکی از کانال‌ها را انتخاب کنند. افزودن این ویژگی می‌تواند منجر به رفتار و انتخاب پیچیده‌تر مشتریان، ترکیب بهتر ظرفیت بین کانال‌ها و تحلیل عمیق‌تری از پویایی قیمت‌گذاری شود.

بعلاوه، هر چند سعی شده مفروضات، مولفه‌ها و چارچوب مدل پیشنهادی منطبق با دنیای واقعی باشد، اما با توجه به ماهیت مساله تحت بررسی، تطبیق بیشتر این موارد با اطلاعات و داده های یک مطالعه موردی، می تواند به کابردی‌تر شدن تحلیل‌ها و نتایج، در عمل منجر شود.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند.

منابع

1. Akkerman, F., Dieter, P., & Mes, M. (2025). Learning Dynamic Selection and Pricing of Out-of-Home Deliveries. *Transportation Science, 59(2),* 250-278. https://doi.org/10.1287/trsc.2023.0434
2. Andargoli, S.M., Arasteh, A. , & Divsal, A. (2024). A Novel Hybrid Approach for Smart Locker Location in Delivery Systems: A Solution for Enhancing Urban Logistics Performance (Case Study: Babol County). *Journal of Decisions and Operations Research, 9(4)*, 1021-1044. https://doi.org/10.22105/dmor.2025.489345.1890. (In Persian).

3. Bonomi, V., Mansini, R., & Zanotti, R. (2022). Last Mile Delivery with Parcel Lockers: Evaluating the environmental impact of eco-conscious consumer behavior. *IFAC-PapersOnLine, 55(5)*, 72–77. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.642
4. Brunner, V., & Majcher, W. (2022). Last Mile Delivery – *Examination of Customer Satisfaction Regarding Parcel Lockers.* Master Thesis Within Business Administration. Jonkoping University, Open Access in DiVA.
5. Christopher, M. (2016). *Logistics & Supply Chain Management (5th edition)*. Pearson Education Limited. ISBN: 978-1-292-08381-0 (pdf).
6. Deutsch, Y., & Golany, B. (2018). A parcel locker network as a solution to the logistics last mile problem. *International Journal of Production Research, 56(1-2)*, 251-261. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1395490
7. Emeç, U., Çatay, B., Bozkaya, B. (2016). An adaptive large neighborhood search for an e-grocery delivery routing problem. *Computers & Operations Research, 69*, 109-125, https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.11.008
8. Gevaers, R., Van de Voorde, E., & Vanelslander, T. (2014). Cost modelling and simulation of last-mile characteristics in an innovative B2C supply chain environment with implications on urban areas and cities. *Procedia – Social and Behavioral Sciences, 125*, 398–411. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1483
9. Heinemann, G. (2023). *The new online trade-business models, business systems and benchmarks in e-Commerce.* 1st Edition, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-40757-5
10. Hoffmann, T., & Prause, G. (2018). On the regulatory framework for last-mile delivery robots. *Machines, 6(3)*. https://doi.org/10.3390/machines6030033
11. Iwan, S., Kijewska, K., & Lemke, J. (2016). Analysis of parcel lockers' efficiency as the last mi23le delivery solution – The results of the research in Poland. *Transportation Research Procedia, 12,* 644–655. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.018
12. Janinhoff, L., Klein, R., Sailer, D., & Schoppa, J.M., (2024). Out-of-home delivery in last-mile logistics: A review. *Computers & Operations Research, 168,* 106686. https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106686.
13. Kahr, M. (2022). Determining locations and layouts for parcel lockers to support supply chain viability at the last mile. *Omega, 113*, 102721. https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102721
14. Kämäräinen, V., Saranen, J., & Holmström, J. (2001). The reception box impact on home delivery efficiency in the e-grocery business. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 31(6),* 414–426. https://doi.org/10.1108/09600030110399414
15. Kervall, M., Pålsson, H., & Khan, J. (2026). Sustainable urban freight transition governance in small and medium-sized cities. *Transport Policy, 176*, 103906. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.103906
16. Kiba-Janiak, M., Marcinkowski, J., Jagoda, A., & Skowrońska, A. (2021). Sustainable last mile delivery on e-commerce market in cities from the perspective of various stakeholders: Literature review. *Sustainable Cities and Society, 71*, 102984. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102984
17. Kolyaei, M., Azar, A., Gatari, A.R., & Nayeri, M.D. (2022). A Bi-Level Optimization Model for Supply Chain, with Incremental Discount Structure. *Industrial Management Perspective, 12(45)*, 9-44. https://doi.org/10.52547/JIMP.12.1.9. (In Persian).
18. Kuo, R.J., Oktavia, A.T., Zulvia, F.E., & Wibowo, B.S. (2026). Maximal covering location model using an improved multi-objective particle swarm optimization algorithm to locker location planning for city logistics system. *Computers & Industrial Engineering, 217*, 112064. https://doi.org/10.1016/j.cie.2026.112064.

19. Lachapelle, U., Burke, M., Brotherton, A., & Leung, A. (2018). Parcel locker systems in a car dominant city: Location, characterisation and potential impacts on city planning and consumer travel access. *Journal of Transport Geography, 71*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.06.022.
20. Lemke, J., Iwan, S., & Korczak, J. (2016). Usability of the parcel lockers from the customer perspective – The research in Polish cities. *Transportation Research Procedia, 16*, 272–287. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.027
21. Lin, Y., Wang, Y., Lee, L.H., & Chew, E.P. (2022). Profit-Maximizing Parcel Locker Location Problem under Threshold Luce Model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 157*, 102541. https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102541
22. Lüer-Villagra, A., & Marianov, V. (2013). A competitive hub location and pricing problem. *European Journal of Operational Research, 231(3),* 734-744. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.006.
23. Ma, B., Teo, C-C., & Wong, Y.D. (2024). Location analysis of parcel locker Network: Effects of spatial characteristics on operational performance. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 192*, 103776. 1366-5545. https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103776.
24. Maleki, S., Tabriz, A.A., Talebi, D., & Motameni, A. (2023). Developing a Mathematical Model for Competitive Facility Location with Multiple Commodities and Multiple Competitors. *Industrial Management Perspective*, *12(48)*, 71-95. https://doi.org/10.52547/jimp.12.4.71. (In Persian).
25. Mancini, S., Gansterer, M., Triki, C. (2023). Locker box location planning under uncertainty in demand and capacity availability. *Omega, 120*, 102910. https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102910.
26. Mohammad, W. A., Diab, Y.N., Elomri, A., & Triki, C. (2023). Innovative solutions in last mile delivery: Concepts, practices, challenges, and future directions. *Supply Chain Forum: An International Journal, 24(2)*, 151–169. https://doi.org/10.1080/16258312.2023.2173488
27. Ozyavas, P., Buijs, P., Ursavas, E., & Teunter, R. (2025). Designing a sustainable delivery network with parcel locker systems as collection and transfer points. *Omega, 131*, 103199. https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103199.
28. Pahwa, A., & Jaller, M. (2025). Assessing the sustainability of last-mile distribution strategies to manage expedited shipping with dynamic and stochastic demand. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 201*, 104273. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104273.
29. Peppel, M., & Spinler, S. (2022). The impact of optimal parcel locker locations on costs and the environment. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 52(4)*, 324–350. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-07-2021-0287
30. Qiu, R., Ma, L., & Sun, M. (2023). A robust omnichannel pricing and ordering optimization approach with return policies based on data-driven support vector clustering. *European Journal of Operational Research, 305(3)*, 1337-1354. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.07.029.
31. Ranjbari, A., Diehl, C., Dalla Chiara, G., & Goodchild, A. (2023). Do parcel lockers reduce delivery times? Evidence from the field. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 172*, 103070. https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103070
32. Redi, A.A.N.P., Jewpanya, P., Kurniawan, A.C., Persada, S.F., Nadlifatin, R., & Dewi, O.A.C. (2020). A simulated annealing algorithm for solving two-echelon vehicle routing problem with locker facilities. *Algorithms, 13(9)*, 218. https://doi.org/10.3390/a13090218
33. Rezakhanlou, M., Khalili, H.A., & Mirzapour Al-e-Hashem, S.M.J. (2020). A Fuzzy Multi-Objective Model for Designing a Dual-Channel Green Supply Chain Considering Pricing Under

Uncertainty. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems, 9(18),* 191-211. https://doi.org/10.22084/IER.2021.25118.2055. (In Persian).
34. Sabzevari Zadeh, A., Dayarian, I., & Bashiri, M. (2026). Strategic design of parcel locker networks for urban delivery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 206*, 104541. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104541
35. Statista Market Insights. (2023). *Sales channels and global e-commerce data*. https://www.statista.com.
36. Sakai, T., Kin, B., Rai, H.B., Conway, A., Cheah, L., Chiara, G.D., & Amstel, W.P. (2026). Diversity in the evolution of last-mile deliveries: Interactions between e-commerce growth, urban development, planning, and the delivery service market. *Case Studies on Transport Policy*, 101845. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2026.101845.
37. Vakulenko, Y., Hellström, D., & Hjort, K. (2018). What's in the parcel locker? Exploring customer value in e-commerce last mile delivery. *Journal of Business Research, 88*, 421–427. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.11.033
38. Yu, Y., Lian, F., & Yang, Z. (2021). Pricing of parcel locker service in urban logistics by a TSP model of last-mile delivery. *Transport Policy, 114*, 206-214. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.10.002
39. Zhang, Y., & Liu, Y. (2026). Optimizing a new robust location-pricing problem in agricultural economy by customized bi-level algorithm. *Socio-Economic Planning Sciences, 105*, 102466. https://doi.org/10.1016/j.seps.2026.102466
40. Yunusoglu, P., & Avci, M.G. (2023). Optimizing Parcel Locker Locations with Pricing Decisions in Last-Mile Delivery. In: Durakbasa, N.M., Gençyılmaz, M.G. (eds) Towards Industry 5.0. ISPR 2022. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24457-5_50
41. Zhang, W., Xu, M., & Wang, S. (2023). Joint location and pricing optimization of self-service in urban logistics considering customers' choice behavior. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 174*, 103128. https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103128.
42. Zhou, J., Yang, S., Wang, C., Xu, W., Cen, X., & Zheng, N. (2026). Smart modular lockers for last-mile delivery: Integrated optimization for parcel allocation and locker configuration. *Computers & Industrial Engineering, 217*, 112069. https://doi.org/10.1016/j.cie.2026.112069.