



Multimodal Multicommodity Hub Location Problem Considering Dynamic Demand

Alireza Eydi*^{ID}

Masoumeh Farhan Moghaddam**

Sepideh Hashem Bagheney***

Extended Abstract

Introduction: This study aims to develop a hub (Distribution Centers) location model for supply chains of seasonal perishable goods under a multi-modal transportation system. Due to their inherent characteristics, perishable products are highly susceptible to uncertainties & disruptions, & even minor delays or interruptions at any stage of the supply chain can lead to quality degradation, lost sales, & risks to public health. One major source of uncertainty in such supply chains is the seasonal variability of product demand. Moreover, distribution centers play a critical role in fulfilling the demand for seasonal goods. Therefore, making decisions regarding hub location (construction or rental) can be an effective strategy for responding to dynamic demand in these supply chains.

Methods: A bi-objective, multi-product, multi-modal mathematical model is developed in this article. The model aims to minimize various supply chain costs, including hub location costs, transportation costs, shortage costs, & product deterioration costs during transportation, as well as to minimize product transfer time. The proposed problem is formulated as a mixed-integer programming model. To solve the bi-objective problem, exact solution methods, normalization, & augmented e-constraint method approach are implemented in the GAMS using the CPLEX solver.

Received : Dec. 29, 2025; Revised : Mar. 29, 2026; Accepted : May. 05, 2026; Published Online : Jun. 06, 2026.

*Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

Corresponding Author : Alireza.eydi@uok.ac.ir

**Master of Science, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

***Ph.D. student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.



Results and discussion: Furthermore, numerical experiments of varying scales are conducted to validate the model & assess its scalability. Moreover, increasing the parameter associated with the maximum number of rentable hubs leads to a reduction in total costs as well as shortage levels across different seasons. Therefore, during periods of temporary demand surges, seasonal rental of hubs instead of permanent establishment can significantly reduce both total costs and shortage levels. However, this approach simultaneously results in an increase in the total number of established and rented hubs, which consequently enlarges the average distance between hubs and demand points, leading to longer travel times. This outcome highlights a fundamental trade-off between the overall network cost and travel time, or equivalently, the service level in the supply chain of perishable products. Furthermore, the utilization of multiple transportation modes (air and road) in this problem, each with its distinct characteristics, plays a crucial role in improving product distribution. For instance, considering the perishable nature of the products, the use of air transportation enhances delivery speed, while road transportation, due to its high accessibility, enables coverage of most regions and facilitates product distribution.

Conclusions: By integrating bi-objective modeling, demand dynamics, & multi-modal transportation, this study provides an effective framework for managing dynamic demand for perishable goods. The results can assist supply chain managers & policymakers in making strategic decisions such as hub location in industries with seasonal products or services, including tourism to ensure faster & more efficient supply during peak seasons while reducing costs in low-demand periods.

Keywords: Hub location; Dynamic demand; Multi-modal transportation; Multi-commodity; Perishable goods.

How to Cite: Eydi, Alireza; Farhan Moghaddam, Masoumeh; Hashem Bagheney, Sepideh (2026). Multimodal Multicommodity Hub Location Problem Considering Dynamic Demand. *Ind. Manag. Persp.*, 16(2), 9-36 (In Persian).



مسئله مکان‌یابی هاب چندکالایی با در نظر گرفتن تقاضای پویا و چند بستر حمل‌ونقل

علیرضا عیدی 

معصومه فرهان مقدم**

سپیده هاشم باغنی***

چکیده گسترده

مقدمه و اهداف: مطالعه حاضر، با هدف مدل‌سازی مکان‌یابی هاب (مراکز توزیع) در زنجیره تامین کالاهای فسادپذیر فصلی با استفاده از چند بستر حمل‌ونقل ارائه شده است. محصولات فسادپذیر به دلیل ماهیت‌شان، نسبت به کالاهای دیگر بیشتر تحت تاثیر عدم قطعیت‌ها و اختلالات قرار می‌گیرند و کوچکترین تاخیر و وقفه در هر یک از بخش‌های این نوع از زنجیره‌های تامین، می‌تواند موجب کاهش کیفیت محصولات، فروش از دست رفته و به خطر افتادن سلامت عمومی مصرف‌کنندگان گردد. یکی از منابع مهم عدم قطعیت در زنجیره تامین محصولات فسادپذیر، میزان تقاضای متفاوت محصولات در فصول مختلف است. به علاوه، مراکز توزیع نقش تعیین‌کننده‌ای در برآورده کردن تقاضاهای کالاهای فصلی دارند. بنابراین، تصمیم‌گیری در رابطه با نحوه مکان‌یابی این نوع از هاب‌ها (ساخت یا اجاره آن‌ها)، می‌تواند به عنوان راهی مناسب برای پاسخ‌گویی به تقاضای پویا در این زنجیره‌های تامین باشد.

روش‌ها: در این مطالعه یک مدل ریاضی دوهدفه، چندمحصولی و با چند بستر حمل‌ونقلی توسعه داده شده است که شامل حداقل کردن هزینه‌های مختلف زنجیره تامین از جمله هزینه مکان‌یابی هاب، هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه کمبود کالا، هزینه فسادپذیری کالا طی حمل، و همچنین کمینه کردن زمان جابجایی محصولات می‌شود. مسئله پیشنهادی به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی شده و برای حل مسئله دوهدفه از روش‌های حل دقیق نرمال‌سازی و اپسیلون محدودیت تقویت‌شده در محیط کدنویسی GAMS با حل‌کننده CPLEX استفاده شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶.

*استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

نویسنده مسئول: Alireza.eydi@uok.ac.ir

**کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

***دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

نوع مقاله: پژوهشی

یافته‌ها: برای اعتبارسنجی و مقیاس‌پذیری مدل، مثال‌های عددی در ابعاد مختلف حل و تحلیل شده است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که مدل پیشنهادی در مسائل با ابعاد مختلف و نیز تغییر در پارامترها به خوبی عمل کرده و قابلیت تطبیق با شرایط مختلف را دارد. همچنین با افزایش پارامتر حداکثر تعداد هاب‌های اجاره‌ای، هزینه‌های کل و نیز میزان کمبود در فصول مختلف کاهش می‌یابد. پس، زمانی که تقاضاها به صورت موقت افزایش می‌یابد، می‌توان به جای تأسیس دائمی هاب‌ها، با اجاره هاب به صورت فصلی، هزینه‌ها و میزان کمبود را تا حد قابل توجهی کاهش داد. اما از طرف دیگر این امر، باعث افزایش تعداد کل هاب‌های تأسیس شده و اجاره‌ای و در نتیجه افزایش فاصله بین هاب‌ها و نقاط تقاضا، و زمان سفر می‌گردد، که این نتیجه بیانگر تعارض بین هزینه‌های کلی شبکه و زمان سفر یا به عبارتی، سطح خدمت‌رسانی در زنجیره تأمین محصولات فسادپذیر است. به علاوه، کاربرد بسترهای مختلف حمل‌ونقلی (هوایی و جاده‌ای) در این مسئله، با ویژگی‌های منحصر به فرد خود، نقش بسزایی در توزیع بهتر محصولات ایفا می‌کنند. به عنوان مثال، با توجه به ماهیت فسادپذیر کالاهای، بهره‌گیری از سیستم حمل‌ونقل هوایی موجب افزایش سرعت در جابجایی آن‌ها می‌شود و سیستم جاده‌ای حمل‌ونقل، به واسطه خاصیت دسترسی‌پذیری که دارد، دسترسی به اکثر مناطق را امکان‌پذیر ساخته و توزیع کالا را تسهیل می‌نماید.

نتیجه‌گیری: این پژوهش با تلفیق مدل‌سازی دوهدفه، پویایی پارامتر تقاضا و چند بستر حمل‌ونقلی، چارچوبی کارآمد برای مدیریت تقاضای پویای محصولات فسادپذیر ارائه می‌دهد. یافته‌های این مقاله می‌تواند به مدیران زنجیره تأمین و سیاست‌گذاران در تصمیمات استراتژیکی مانند مکان‌یابی و نوع هاب‌ها در صنایع با کالاهای خدمات فصلی مانند صنعت گردشگری به منظور تأمین بیشتر و سریع‌تر کالاهای در فصول اوج گردشگری و صرف هزینه کمتر در فصول کم‌تقاضا، مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: مکان‌یابی هاب؛ تقاضای پویا؛ چند بستر حمل‌ونقلی؛ چندکالایی؛ محصولات فسادپذیر.

استناددهی: عیدی، علیرضا؛ فرهان مقدم، معصومه؛ هاشم باغی، سپیده (۱۴۰۵). مسئله مکان‌یابی هاب چندکالایی با در نظر گرفتن تقاضای پویا و چند بستر حمل‌ونقل. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۶(۲)، ۹-۳۶.



۱. مقدمه

پیشرفت‌های سریع و چشم‌گیر تکنولوژی و صنایع در دهه‌های اخیر، منجر به ایجاد تغییرات قابل‌توجهی در زنجیره‌های تأمین، گسترش ارتباطات طولی و عرضی میان بخش‌های مختلف و نیز افزایش پیچیدگی‌های آن شده است. مدیران بیش از پیش می‌کوشند تا با تجهیز شدن به دانش روز، هزینه‌های زنجیره‌ای تأمین را کاهش دهند. یکی از کلیدی‌ترین هزینه‌ها در صنایع مختلف، هزینه‌های لجستیکی است؛ به همین جهت، طراحی صحیح و کارایی شبکه‌های لجستیکی می‌تواند نقش مؤثری، در کنترل هزینه‌ها به ویژه در زنجیره‌های تأمین ایفا می‌کند. مهم‌ترین چالش در سیستم‌های حمل‌ونقل، لجستیک و شبکه‌های ارتباطی، ارسال جریان از نقاط مبدا به مقصد است. در شبکه توزیع و حمل‌ونقل، زمانی که میزان جریان بین نقاط مبدا و مقصد مشخص شده، اما برقراری ارتباط مستقیم با همه‌ی نقاط موجود غیرممکن یا هزینه‌بر باشد، طراحی شبکه‌ی هاب^۱ مطرح می‌شود. در این شبکه‌ها کالاها به جای ارسال مستقیم از هر تأمین‌کننده به هر مشتری، از طریق یک یا چند مرکز هاب، تجمیع و سپس توزیع می‌شوند. همچنین، امکان جابه‌جایی بین هاب‌های مختلف نیز در شبکه وجود دارد. در هاب‌ها، کالاها بر اساس مقصد یا نوع سفارش دریافت، دسته‌بندی و تجمیع می‌شوند. در ارسال کالاها و محصولات به مقاصد مختلف، مسیرها به گونه‌ای برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی می‌شوند تا هزینه حمل‌ونقل و زمان تحویل کاهش یابد.

مکان‌یابی هاب یکی از انواع مسائل مکان‌یابی تسهیلات در شبکه‌های لجستیکی است. بدون شک، تعیین مکان مناسب تسهیلات اثرات خاصی در مزایای اقتصادی، رضایت مشتریان و ارائه‌ی خدمات مطلوب دارد و به همین دلیل، مطالعه‌ی تعیین محل هاب یکی از موضوعاتی است که توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. حمل‌ونقل بار یکی از کاربردهای اصلی مدل‌های مکان‌یابی هاب به شمار می‌رود. جابجایی بار را می‌توان برای انواع مختلفی از محصولات به ویژه محصولات فسادپذیر اعمال کرد. محصولات فسادپذیر از جمله مواد غذایی، مشکلات بیشتری را برای مدیران ایجاد می‌کنند. حمل‌ونقل این دسته از محصولات به علت عمر محدود و حساسیتی که نسبت به دما و شرایط نگهداری دارند، نیازمند توجه ویژه‌ای است، چرا که کوچکترین تأخیر و وقفه در تحویل محصولات، می‌تواند موجب کاهش کیفیت، افزایش ضایعات و به خطر افتادن سلامت عمومی مصرف‌کنندگان گردد. بر این اساس در این پژوهش، به مسئله مکان‌یابی هاب و ایجاد یک شبکه حمل‌ونقل مناسب برای توزیع این دسته از محصولات با هدف کاهش زمان سفر و هزینه‌های شبکه پرداخته شده است.

یکی از رویکردها برای کاهش زمان و هزینه حمل‌ونقل و همچنین ریسک‌های لجستیکی در شبکه زنجیره تأمین، استفاده از چند بستر حمل‌ونقل^۲ است. این روش حمل‌ونقل به گونه‌ایست که در آن جابه‌جایی کالا با استفاده از دو یا چند شیوه حمل‌ونقل مختلف (مثل جاده‌ای، ریلی، دریایی یا هوایی) انجام می‌گیرد، اما کل فرآیند تحت یک قرارداد واحد و معمولاً توسط یک متصدی حمل‌ونقل، مدیریت می‌شود. این رویکرد به شرکت‌ها امکان می‌دهد از مزایای هر بستر حمل‌ونقل (مثل سرعت بالای حمل‌ونقل هوایی یا هزینه کمتر حمل‌ونقل دریایی یا انعطاف‌پذیری بیشتر حمل‌ونقل جاده‌ای) بهره‌مند شوند. بنابراین، ترکیبی از بسترهای مختلف حمل‌ونقل در شبکه هاب نه تنها انعطاف‌پذیری را فراهم می‌کند، بلکه این امکان را می‌دهد که مسیر بهینه که سریع‌تر و ارزان‌تر است، انتخاب شود.

در دنیای واقعی، شرایط محیطی با گذر زمان تغییر می‌کنند. به عنوان نمونه، میزان تقاضاها، هزینه راه‌اندازی، هزینه حمل و موارد مشابه، ضرورتاً در دوره‌های متفاوت ثابت نمی‌مانند. هدف مسائل مکان‌یابی هاب، علاوه بر کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و زمان تحویل، افزایش پوشش جغرافیایی و دسترسی مشتریان و نیز انعطاف‌پذیری در پاسخ به تغییرات بازار است. بنابراین استفاده از مسائل مکان‌یابی هاب (مراکز توزیع) می‌تواند راهکاری مناسب برای مدیریت نوسانات تقاضا باشد. به همین دلیل، با توجه به اهمیت حفظ کیفیت و سلامت محصولات فسادپذیر و نیز نیاز به پاسخ‌گویی مؤثر به تقاضاهای پویا و فصلی، در این پژوهش به مسئله مکان‌یابی چندکالایی، با استفاده از چند بستر حمل‌ونقل برای کالاهای فسادپذیر و با در نظر گرفتن نوسانات در تقاضاهای فصلی پرداخته شده است. بر این اساس، این مطالعه با هدف پر کردن شکاف‌های موجود در ادبیات موضوع، مشارکت‌های زیر را ارائه می‌دهد:

- ۱- توسعه یک مدل ریاضی دوهدفه با تقاضای پویای فصلی محصولات فسادپذیر که هزینه‌های مختلف شبکه (هزینه مکان‌یابی هاب، هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه کمبود کالا، هزینه فسادپذیری کالا طی حمل) و زمان سفر را به طور هم‌زمان بهینه می‌کند.
- ۲- در نظر گرفتن نقش کلیدی مراکز توزیع، نحوه مکان‌یابی آن‌ها و تصمیم استراتژیک «ساخت یا اجاره فصلی» آن‌ها در مدیریت نوسانات فصلی تقاضا برای محصولات فسادپذیر که باعث افزایش واقع‌گرایی مدل در مواجهه با تغییرات ناگهانی تقاضا در شرایط عملیاتی می‌شود.

- ۳- استفاده از چند بستر حمل‌ونقلی به منظور کاهش هزینه، زمان و افزایش انعطاف‌پذیری در زنجیره تامین محصولات فسادپذیر، در حالی که پژوهش‌های گذشته کمتر از این نوع شیوه حمل‌ونقل در زنجیره‌های تامین محصولات فسادپذیر استفاده کرده‌اند.
- ۴- در نظر گرفتن مطالعه‌ای جامع که ویژگی‌های مختلفی مانند چندمحصولی بودن، فسادپذیری، تقاضاهای پویای فصلی و استفاده از چند بستر حمل‌ونقل را به صورت یکپارچه برای مسئله مکان‌یابی هاب زنجیره تامین را شامل شود.
- در ادامه، ساختار کلی مقاله به شرح زیر است: مبانی نظری و پیشینه پژوهش در بخش دوم ارائه شده است. در بخش سوم روش‌شناسی پژوهش بیان می‌شود که شامل زیربخش‌های مدل‌سازی مسئله و رویکرد حل مسئله است. در بخش چهارم نیز، به تحلیل داده و یافته‌های پژوهش پرداخته می‌شود و در نهایت در بخش پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه می‌شوند.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مکان‌یابی هاب. هاب به عنوان یک اصطلاح عمومی به مکان یا نقطه‌ای اشاره می‌کند که در آن کالا یا اطلاعات از چندین منبع گردآوری شده و سپس در گره‌هایی با عنوان هاب، تجمع می‌شوند و در ادامه، به سایر هاب‌های شبکه یا مقاصد پایانی منتقل می‌شود. از جمله مزایای استفاده از شبکه‌های هاب در زنجیره تامین می‌توان، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، بهبود مدیریت موجودی و افزایش کارایی و همچنین امکان ردیابی بهتر کالاها را نام برد. با این حال، استفاده از این نوع شبکه‌ها می‌تواند معایبی را نیز داشته باشد که شامل: وابستگی عملکرد شبکه به عملکرد هاب‌ها، افزایش زمان تحویل در مقایسه با ارسال مستقیم (به دلیل توقف در ایستگاه‌های هاب) و نیاز به سرمایه‌گذاری در زیرساخت هاب‌ها را نام برد. مسائل مربوط به مکان‌یابی هاب‌ها شامل مشخص کردن مکان هاب‌ها و تخصیص گره‌های شبکه به آن‌ها به صورتی است که مجموع هزینه‌های راه‌اندازی هاب‌ها و هزینه‌های جابجایی به حداقل مقدار برسد.

تحقیقات در مورد مسائل مکان‌یابی هاب با مطالعات اوکلی^۱ (۱۹۸۶) آغاز شد که اولین فرمول‌های ریاضی را در این حوزه پیشنهاد کرد. اوکلی در سال ۱۹۸۷ یک مسئله مکان‌یابی هاب با تخصیص یگانه و با ظرفیت نامحدود را مدل‌سازی نمود. کمپبل^۲ (۱۹۹۱) نیز در ادامه این تحقیقات گام مهمی در پیشرفت این حوزه برداشت. او مدلی برای مسئله با تخصیص چندگانه ارائه کرد. در این مسئله تعداد هاب‌های احداثی مشخص و به عنوان پارامتر ورودی به مسئله وارد می‌شود [۱۱].

در مقاله‌ای دیگر که توسط آلومور و همکاران^۳ (۲۰۱۲) صورت گرفت، مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی با چند بستر حمل‌ونقلی، با زمان تحویل به صورت پارامتر قطعی معرفی شد. محققان در این مقاله، سعی دارند دو نوع هاب (هوایی و زمینی) و لینک‌های بین‌شان را طوری بسازند که همه تقاضاها در بازه‌های زمانی تضمین‌شده برسند و در عین حال هزینه کل کمینه شود. برای این منظور نویسندگان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ارائه کردند. همچنین، مدل پیشنهادی در شبکه حمل‌ونقل ترکیه آزمایش و «تحلیل حساسیت» گسترده انجام شد، تا اثر پارامترهای هزینه و بازه‌های زمانی بر مکان هاب‌ها و انتخاب بستر مناسب حمل‌ونقل (جاده‌ای/هوایی) سنجیده شود. نتایج نشان می‌دهد هرچه قیود «تحویلی زمان قطعی» سخت‌تر و بدون انعطاف‌تر باشند، نیاز به لینک‌ها/هاب‌های هوایی و هزینه شبکه بیشتر می‌شود [۵].

محمدی و همکاران (۲۰۱۶) نیز در مطالعات خود به حداقل رساندن هزینه‌ها و زمان خدمت‌دهی پرداخته‌اند. آن‌ها در این مقاله، از روش‌های مختلف حمل‌ونقل در شبکه هاب استفاده کرده و مسئله پیشنهادی را به صورت تک‌دوره‌ای و تک‌محصولی در نظر گرفته‌اند. از نوآوری‌های مطالعات آن‌ها می‌توان به بررسی زمان انتظار مشتریان در صف اشاره نمود [۲۰]. عیوق و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل ریاضی برای مکان‌یابی و تخصیص تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین ارائه کردند. یکی از راهکارهای آن‌ها در این تحقیق، در نظر گرفتن اولویت‌بندی تقاضای مشتریان بود. هدف اصلی مدل پیشنهادی، به حداقل رساندن هزینه‌های مکان‌یابی و تخصیص بود. برای حل مدل، از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج نشان داد که عملکرد این الگوریتم برای حل مدل مناسب بوده است [۸]. در مطالعه دیگر، کریمی و بشیری (۲۰۱۸)

1. O'Kelly ME

2. Campbell

3. Alumur et al.

یک مسئله مکان‌یابی p-hub دینامیک جدید در یک محیط پویا پیشنهاد کرد. در این مدل، تسهیلات سیار در داخل گره‌های هاب وجود دارند که می‌توانند در دوره‌های بعدی به گره‌های دیگر منتقل شوند. این تسهیلات سیار می‌توانند به منظور پاسخگویی به تقاضا به گره‌های دیگر منتقل گردند. استفاده از چنین ویژگی‌هایی می‌تواند باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های ایجاد هاب‌های اضافی شود [۱۶]. پژوهش عادل پورقادر و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی یک مدل چندهدفه جدید برای مسئله مکان‌یابی هاب می‌پردازد که تقاضای پویا و مسائل زیست‌محیطی را در نظر می‌گیرد. این تحقیق تلاش می‌کند تا با بهینه‌سازی مکان‌های هاب، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، به بهبود عملکرد زیست‌محیطی نیز کمک کند. نتایج مدل پیشنهادی نشان‌دهنده توانایی آن در مدیریت تقاضاهای متغیر و کاهش اثرات منفی بر محیط‌زیست است. این مقاله در تلاش است تا راهکارهایی برای تصمیم‌گیری مؤثر در سطوح مدیریتی ارائه دهد [۲۴]. در مقاله‌ای دیگر توسط چراغی و همکاران (۲۰۱۵)، مسئله مکان‌یابی هاب میانه تک تخصیص و چندمحصولی با در نظر گرفتن روش‌های مختلف تامین مالی توسعه داده شد. در مدل پیشنهادی آن‌ها، با توسعه ساختار مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی هاب چندمحصوله با استفاده از حمل‌ونقل زمینی، هزینه تأسیس هاب‌های ترکیبی (جاده‌ای - ریلی) و هزینه حمل‌ونقل بین هاب‌ها و هاب به غیر هاب در تابع هدف کمینه شده است. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی، نقاط بهینه تأسیس هاب‌ها و همچنین بهترین شیوه تأمین منابع مالی با در نظر گرفتن محدودیت‌های مالی را تعیین می‌کند [۲].

زنجیره تامین کالاهای فسادپذیر. محصولات فسادپذیر (مانند: فرآورده‌های خونی، محصولات کشاورزی، دارویی، لبنی، بسیاری از محصولات صنعتی و غیره)، بخش زیادی از کالاها را در سراسر جهان تشکیل می‌دهند. به‌طور کلی، محصولات فسادپذیر را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد. دسته نخست شامل کالاهایی است که ارزش یا مطلوبیت آن‌ها به گذر زمان وابسته است؛ به‌گونه‌ای که با افزایش زمان، ارزش اقتصادی یا مطلوبیت مصرفی آن‌ها کاهش می‌یابد. نمونه‌هایی از این نوع محصولات عبارت‌اند از بلیت هواپیما، رزرو اتاق هتل یا سایر خدماتی که با سپری شدن زمان، کارایی خود را از دست می‌دهند. دسته دوم مربوط به کالاهایی است که دارای دوره عمر ثابت و مشخص هستند. این کالاها تا پایان دوره عمر خود از کیفیت و مطلوبیت نسبتاً ثابتی برخوردارند، اما پس از اتمام این دوره، به‌طور ناگهانی ارزش و قابلیت مصرف خود را از دست می‌دهند. نمونه‌هایی از این گروه شامل مواد غذایی فسادپذیر مانند لبنیات، میوه‌ها و گوشت است. این گروه از کالاها در ادبیات اقتصادی با عنوان محصولات فسادپذیر با دوره عمر ثابت شناخته می‌شوند. در دهه‌های اخیر، تقاضا برای محصولات فسادپذیر در بازارهای مختلف افزایش چشمگیری داشته است. در عین حال، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان این کالاها، بیش از پیش نگران تازگی این محصولات هستند. در ادامه این مبحث، به برخی از مقالاتی که مرتبط با توزیع کالاهای فسادپذیر هستند، اشاره خواهد شد.

اسمی‌زاده و بشیری (۲۰۱۴) با در نظر گرفتن فسادپذیری محصولات، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه در مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی ارائه کردند. هدف این پژوهشگران به حداقل رساندن درصد ضایعات در طول حمل‌ونقل و هزینه‌های شبکه و در عین حال افزایش تازگی محصول و رضایت مشتری بود [۱۳]. مسئله پیشنهادی هیاسات و همکاران^۱ (۲۰۱۷)، تک‌منبعی و تک‌محصولی بوده و تقاضای کالا قطعی است. هدف آن‌ها در این مقاله کاهش هزینه کل شامل: هزینه‌های تأسیس انبارها، نگهداری کالا و هزینه حمل‌ونقل است. همچنین، مسئله آن‌ها به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی شده است [۱۵]. موسوی و بزرگی‌امیری (۲۰۱۷) به مکان‌یابی هاب‌ها و زمان‌بندی وسایل نقلیه در توزیع کالاهای فسادپذیر پرداختند. آن‌ها فسادپذیری کالاها در شبکه توزیع و همچنین میزان انتشار دی‌اکسید کربن تولیدی توسط شبکه هاب را به‌منظور توجه به فاکتور پایداری مدنظر قرار داده و با در نظر گرفتن دوره عمر محصول و نقطه کاهش کیفیت، هدفی برای حداکثرسازی احتمال خرید در مدل خود در نظر گرفته‌اند. با این وجود، هزینه فسادپذیری کالا را در توابع هدف خود لحاظ نکرده‌اند [۲۲]. دیکایزر و همکاران^۲ (۲۰۱۷) نیز مکان‌یابی هاب‌های شبکه توزیع، میزان حمل کالا میان تأمین‌کنندگان و هاب‌های توزیع و نیز موجودی را در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی در صنعت غذا بررسی کرده‌اند. در این مطالعه، به تنوع در مدهای حمل‌ونقل و نرخ فسادپذیری کالا در تسهیلات مختلف توجه نشده است [۱۲]. سوادکوهی و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهش خود به مکان‌یابی مراکز توزیع

1. Hiassat et al.

2. De keizer et al.

دارو، جریان محصولات میان سطوح مختلف و تعیین سیاست‌های موجودی در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی پرداخته‌اند. آن‌ها تنها هزینه کالای منقضی‌شده را به‌عنوان هزینه فسادپذیری در تابع هدف خود لحاظ کرده‌اند و از تفاوت نرخ فسادپذیری محصول در تسهیلات حمل صرف‌نظر کرده‌اند. همچنین، با وجود اهمیت زمان در طراحی زنجیره تأمین محصولات فسادپذیر، تنها حداقل‌سازی هزینه کل زنجیره را به‌عنوان تابع هدف مدنظر قرار داده‌اند [۲۵]. لی و همکاران^۱ (۲۰۲۲) موضوع مکان‌یابی هاب مرکزی برای محصولات کشاورزی تازه را با درنظرگرفتن فسادپذیری محصول و عدم قطعیت در تقاضای مشتری بررسی کرده‌اند. برای این منظور ابتدا، با استفاده از رویکرد آزادسازی لاگرانژ، یک مدل بدون ظرفیت برای مکان‌یابی هاب محصولات کشاورزی تازه با تقاضای نامشخص بررسی و حل شد. سپس، یک مدل بهینه‌سازی استوار برای مسئله مکان‌یابی هاب با ظرفیت مربوطه ارائه گردید [۱۸]. احمدی توتکله و همکاران (۲۰۲۴) با درنظرگرفتن خاصیت فسادپذیری و قابلیت جایگزینی محصولات ناموجود، به طراحی و بهینه‌سازی تصمیمات سیستم‌های مدیریت موجودی توسط فروشنده پرداختند. هدف اصلی این پژوهش، ارائه رویکرد برنامه ریزی پویا تصادفی برای کنترل بهینه تصمیمات در این سیستم‌ها تحت عدم قطعیت پویا تقاضا است که توسط آن سطح سفارش‌دهی و موجودی محصولات فسادپذیر در شبکه دوسطحی شامل فروشنده و خریداران بهینه می‌شود. نتایج عددی نشان‌دهنده کارایی رویکرد حل برای این مسئله است و با استفاده از آن می‌توان هزینه‌ها را کنترل و در هر وضعیت، تصمیمات بهینه گرفته و همچنین سود را بهبود داد [۱].

استفاده از چند بستر حمل‌ونقلی. این روش به جابجایی محموله‌ها با بهره‌گیری از تمامی امکانات حمل‌ونقل موجود در یک مسیر اشاره دارد که می‌تواند شامل مدهای جاده‌ای، ریلی، هوایی و یا دریایی باشد. استفاده از چند بستر حمل‌ونقلی موجب افزایش کارایی و بهره‌وری شبکه‌های حمل‌ونقل و کاهش هزینه‌ها می‌شود. مدل‌سازی‌هایی که در زمینه سیستم‌های حمل‌ونقلی انجام شده است را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد: استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی. در بخش تصمیم‌گیری بلندمدت (استراتژیک)، مکان‌یابی زیرساخت‌ها و طراحی و توسعه شبکه حمل‌ونقل مدنظر قرار می‌گیرند. در سطح تاکتیکی (میان‌مدت)، تمرکز بر روی طراحی شبکه خدماتی است، که شامل تعیین مسیر برای مبدأ و مقصد بار و میزان بار در هر مسیر می‌شود. در تصمیم‌گیری عملیاتی، مدیریت زمان‌بندی خدمات، برنامه‌ریزی نیروی انسانی و تخصیص سایر منابع به فعالیت‌های یک زنجیره حمل‌ونقل را شامل می‌شود.

آرنولد و همکاران^۲ (۲۰۰۱) برای اولین بار، مسأله مکان‌یابی پایانه‌ها را در یک شبکه با چند بستر حمل‌ونقلی از جمله ریلی و جاده‌ای را بدون درنظرگرفتن ظرفیت، مورد تحلیل و بررسی قرار داد. همچنین، انتخاب روش حمل کالاها (حمل مستقیم جاده‌ای یا ترکیبی ریلی و جاده‌ای) و تخصیص آن‌ها به شبکه نیز در این مطالعه گنجانده شده بود [۷]. لی و همکاران^۳ (۲۰۱۷) در بررسی خود، عدم قطعیت در تقاضاهای حمل‌ونقل را در نظر گرفته و به طراحی شبکه حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای پرداختند و از یک مدل دو سطحی احتمالی مبتنی بر سناریو برای مکان‌یابی پایانه‌ها در یک شبکه با چند بستر حمل‌ونقلی و تخصیص جریان محموله به شبکه استفاده کردند [۱۹]. در تحقیقی که توسط فتوحی و همکاران (۲۰۱۷) انجام شد، علاوه بر عدم قطعیت در تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل، احتمال بروز اختلال در شبکه و عدم قطعیت در ظرفیت پاسخگویی نیز در نظر گرفته شده است. همچنین محققان در این مقاله از رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی مبتنی بر سناریو استفاده کردند [۱۴]. مقاله بعدی فتوحی و همکاران (۲۰۱۸) گسترش مقاله قبلی آن‌ها در سال قبل بود که در آن مسئله طراحی شبکه با چند بستر حمل‌ونقلی در چند دوره زمانی بررسی شد، به‌طوری‌که در تابع هدف به حداقل کردن امید ریاضی هزینه‌های شبکه تحت سناریوهای مختلف پرداخته شده است [۱۴]. در تحقیق لی و همکاران، هدف کاهش هزینه‌های ساخت پایانه‌ها در یک شبکه با چند بستر حمل‌ونقلی و هزینه‌های انتقال کالاها از مبدأ تا مقصد نهایی بوده و امکان انتقال مستقیم کالاها از مبدأ تا مقصد امکان‌پذیر نیست. در مقابل، در پژوهش وانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۸)، ضمن حمل کالاها توسط سیستم با چند بستر حمل‌ونقلی، حمل‌ونقل مستقیم جاده‌ای نیز مورد مطالعه قرار گرفته

1. Li et al.

2. Arnold et al.

3. Li et al.

4. Wang et al.

است [۲۶]. این دو تحقیق به طراحی شبکه حمل‌ونقل با توپولوژی هاب و اسپوک^۱ پرداخته‌اند. مکانیابی تسهیلات در شبکه‌هایی با چند بستر حمل‌ونقل در مطالعه ژانگ و همکاران^۲ (۲۰۱۷) نشان داده شده است، جایی که نویسندگان برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط چندهدفه (MINLP) را پیشنهاد می‌کنند که به حداقل رساندن هزینه‌ها و مالیات‌های زیست‌محیطی در یک شبکه زنجیره تأمین چهار سطحی را بررسی می‌کند [۲۷]. بایگان و همکاران (۲۰۲۴) به مکانیابی، مسیریابی و توزیع کالاهای امدادی در شرایط وقوع زلزله پرداخته‌اند. مدل‌سازی آن‌ها سه‌هدفه، چندکالایی و چندوسیله‌ای در فضای عدم قطعیت است. مدل ریاضی پیشنهادی آن‌ها با رویکرد محدودیت اسیلون تقویت شده، حل گردیده است [۹]. فرازمنند و پیشوایی (۲۰۱۸) در مقاله خود، به طراحی شبکه با چند بستر حمل‌ونقلی تحت شرایط عدم قطعیت با مطالعه موردی حمل‌ونقل سیمان در ایران پرداختند. در این پژوهش با توجه به عدم قطعیت موجود در تقاضاها و هزینه‌های حمل‌ونقل، یک مدل ریاضی استوار برای طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی بار با استفاده از دو روش حمل‌ونقل ریل و جاده در سطح ملی ارائه شده است. خروجی‌ها نشان می‌دهد که توسعه تعدادی از ایستگاه‌های راه‌آهن در کشور و انتقال حجم قابل‌توجهی از سیمان حمل‌شده از جاده به شبکه ریلی، موجب کاهش قیمت این محصول استراتژیک می‌شود [۳]. جدول ۱ برخی از مهمترین پژوهش‌های پیشین را برای مقایسه با پژوهش حاضر و خوانایی بیشتر ارائه می‌دهد.

جدول ۱. خلاصه‌ای از مرور ادبیات مکان‌یابی هاب

نویسندگان	نوع مسئله		چند محصولی	محصول فسادپذیر	تقاضای پویا	چند بستر حمل‌ونقل	نوع تخصیص			تعداد توابع هدف		نوع تابع هدف		روش حل	
	مکانیابی	هاب					یگانگی	چندگانه	تک هدفه	چندهدفه	حداقل کردن هزینه	حداقل کردن زمان سفر	سایر	تفویض	فرا ابتکاری
عادل پور قادر و همکاران [۲۴] (۲۰۲۱)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
وانگ و همکاران [۲۶] (۲۰۲۱)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
ژانگ و همکاران [۲۷] (۲۰۲۲)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
لی و همکاران [۱۸] (۲۰۲۲)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
بایگان و همکاران [۹] (۲۰۲۴)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
بایرام و همکاران ^۳ (۲۰۲۵) [۱۰]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
خالقی [۱۷] (۲۰۲۶)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
اسوریو مورا و همکاران [۲۳] (۲۰۲۰)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
امیری (۲۰۲۴) [۶]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
تحقیق حاضر	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

1. hub-and-spoke

2. Zhang et al.

3. Bayram et al.

مطالعات ارزشمند قبلی مانند مقاله پورقادر و همکاران (۲۰۲۱)، در استفاده از رویکرد ساخت، تعمیر و اجاره مراکز توزیع در مسئله هاب‌های توریستی برای کالاهای ضروری با مقاله حاضر مشابهت‌هایی داشته اما در ویژگی‌هایی مانند در نظر گرفتن چند محصول فسادپذیر با نرخ‌های فساد متفاوت، استفاده از بسترهای مختلف حمل‌ونقلی و نیز توجه به عامل زمان سفر و محدودیت‌های زمانی به عنوان فاکتوری مهم و حیاتی در این نوع از محصولات تفاوت دارد. از طرف دیگر، اگرچه مطالعاتی دیگر مانند مقالات اسوریو مور و همکاران (۲۰۲۰) و نیز امیری (۲۰۲۴)، در موضوعاتی مانند (چند محصولی بودن و استفاده از چند بستر حمل‌ونقلی در مسئله مکانیابی هاب)، با مقاله حاضر مشابهت دارند اما تفاوت‌های اساسی دیگری در نوع محصولات (فسادپذیر بودن)، نوسانات تقاضاهای فصلی و نیز حداقل کردن زمان سفر به صورت همزمان با هدف حداقل کردن هزینه‌های شبکه، وجود دارد. در نهایت، متمایز از پژوهش‌های پیشین، این مطالعه به دنبال ارائه مدلی جامع برای مسئله مکان‌یابی هاب است که به‌طور هم‌زمان ویژگی‌های چندمحصولی بودن، استفاده از بسترهای مختلف حمل‌ونقلی و ماهیت پویای تقاضاهای فصلی را در تصمیم‌گیری‌های شبکه لحاظ کرده و با تمرکز بر فاکتور زمان سفر، در کنار هزینه‌ها، ماندگاری و کیفیت کالاهای فاسدشدنی تضمین کند.

در ادامه تعریف مسئله، مفروضات، اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل به تفصیل تشریح می‌شوند تا چارچوب ریاضی مدل پیشنهادی به طور کامل معرفی گردد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

تعریف مسئله. در این مقاله، یک مدل مکان‌یابی هاب مراکز توزیع برای کالاهای فصلی فسادپذیر با هدف مدیریت تقاضای کالاهای کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین ارائه شده است. از آنجایی که تقاضای کالاهای در برخی فصل‌ها افزایش یا کاهش می‌یابد، لذا تقاضا به‌صورت پویا در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به اینکه مراکز توزیع به‌عنوان مکان هاب در نظر گرفته می‌شوند، این مراکز در شرایط مختلف فصلی با هزینه‌های متفاوت ساخت و یا اجاره مدل‌سازی می‌شوند. مسئله دارای دو هدف کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین و زمان سفر است، که هزینه‌های مختلف زنجیره تأمین شامل هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه مکان‌یابی هاب، هزینه فساد محصولات در حین حمل میان سطوح مختلف و هزینه‌های کمبود می‌باشد. همچنین زمان سفر کالا از سطح تأمین‌کننده تا سطح خرده‌فروش حداقل می‌شود. در این مدل، افق برنامه‌ریزی برای یک سال در نظر گرفته شده است.

مفروضات مسئله. از مهم‌ترین مفروضاتی که در این تحقیق در نظر گرفته شده است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در این مسئله، کمان‌ها و هاب‌ها دارای ظرفیت محدود هستند.
- تقاضای کالاهای به‌صورت پویا می‌باشد (تقاضا در فصل‌های متفاوت تغییر می‌کند).
- تخصیص در شبکه هاب به‌صورت چندگانه می‌باشد.
- برای انتقال جریان در شبکه هاب، چند بستر حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است.
- کالاهای به‌صورت اقلام فسادپذیر در نظر گرفته می‌شوند که برای مدت طولانی قابل نگهداری نیستند.
- میزان تقاضای هر نوع کالا مشخص است و به‌عنوان ورودی به مسئله داده می‌شود.
- با توجه به اینکه مراکز توزیع به‌عنوان مکان هاب در نظر گرفته می‌شوند، این مراکز در شرایط فصلی مختلف تحت شرایط ساخت یا اجاره مدل‌سازی می‌شوند (هاب‌های تأسیس شده در کل سال ثابت هستند و برای فصل با تقاضای بالا، هاب اجاره می‌شود).
- مکان‌های بالقوه برای تسهیلات هاب به‌صورت نقاط گسسته در نظر گرفته می‌شوند.
- کمبود مجاز می‌باشد.

لیست اندیس‌های مسئله.

F: مجموعه نقاط مبدا (تعداد تامین کنندگان)

D: مجموعه نقاط در دسترس برای تاسیس یا اجاره هاب‌ها (محل‌های مراکز توزیع)

R: مجموعه مقصدها (تعداد خرده فروشان)

S: مجموعه فصل‌ها $s = \{1234\}$

M: مجموعه وسایل نقلیه از تامین کننده به مرکز توزیع (روش حمل هوایی)

M': مجموعه وسایل نقلیه از مرکز توزیع به مرکز خرده فروشی (روش حمل زمینی)

P: مجموعه کالاهای مختلف

لیست پارامترهای مسئله. A_{fd}^{mps} : ظرفیت حمل محصول p از تامین کننده f به مرکز توزیع d توسط وسیله نقلیه m در فصل s A_{dr}^{mps} : ظرفیت حمل محصول p از مراکز توزیع d به مرکز خرده فروشی r توسط وسیله نقلیه m' در فصل s C_{fd}^{ms} : هزینه ثابت حمل از تامین کننده f به مرکز توزیع d توسط وسیله نقلیه m در فصل s C_{dr}^{ms} : هزینه ثابت حمل مرکز توزیع d به مرکز خرده فروشی r توسط وسیله نقلیه m' در فصل s h_d : هزینه تاسیس مرکز توزیع d h_{ds} : هزینه اجاره مرکز توزیع d در فصل s θ : حداکثر تعداد مراکز توزیع ساخته شده θ' : حداکثر تعداد مراکز توزیع اجاره شده dem_{rps} : میزان تقاضای خرده فروش r از محصول p در فصل s W_{fps} : ظرفیت عرضه تامین کننده f از محصول p در فصل s l_{dps} : ظرفیت مرکز توزیع d از محصول p در فصل s T_{fdm} : زمان حمل و نقل از تامین کننده f به مرکز توزیع d توسط وسیله نقلیه m T_{dr}^{ms} : زمان حمل و نقل از مرکز توزیع d به مرکز خرده فروشی r توسط وسیله نقلیه m' α_{fd}^{mps} : درصد فسادپذیری محصول p از تامین کننده f به مرکز توزیع d بوسیله حمل m در فصل s β_{dr}^{mps} : درصد فسادپذیری محصول p از مرکز توزیع d به خرده فروش r بوسیله حمل m' در فصل s $c\alpha_{mp}$: هزینه فاسدشدن هرواحد کالای p بوسیله حمل m $c\beta_{m'p}$: هزینه فاسدشدن هرواحد کالای p بوسیله حمل m' K_p : جریمه کمبود هر واحد کالای نوع P μ : عدد بزرگ**لیست متغیرهای تصمیم مسئله.** O_d : اگر مرکز توزیع d ساخته شود ۱؛ در غیر اینصورت ۰ O_{ds} : اگر مرکز توزیع d در فصل s اجاره شده باشد ۱؛ در غیر اینصورت ۰ x_{fd}^{mps} : مقدار کالاهای ارسال شده نوع p از تامین کننده f به مرکز توزیع d توسط وسیله نقلیه m در فصل s

y_{dr}^{mps} : مقدار کالاهای ارسال شده نوع p از مرکز توزیع d به مرکز خرده فروشی r توسط وسیله نقلیه m در فصل s
 G_{fd}^{ms} : اگر وسیله نقلیه m برای جابجایی از تأمین کننده f به مرکز توزیع d در فصل s استفاده شود ۱ در غیراینصورت.

G_{dr}^{ms} : اگر وسیله نقلیه m برای جابجایی از مرکز توزیع d به خرده فروش r استفاده شود ۱ در غیراینصورت ۰

b_{rps} : میزان کمبود هر واحد کالای نوع P برای خرده فروش r در فصل s

مدل‌سازی ریاضی مسئله.

اهداف مسئله در ادامه معرفی می‌شود.

$$\min z_1 = \sum_{ds} (h_d \times O_d + h'_{ds} \times O'_{ds}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$+ \sum_f \sum_d \sum_m \sum_s [C_{fd}^{ms} \times G_{fd}^{ms}] + \sum_f \sum_d \sum_m \sum_s [C_{dr}^{ms} \times G_{dr}^{ms}]$$

$$+ \sum_r \sum_p \sum_s b_{rps} \times K_p + \sum_f \sum_d \sum_m \sum_p \sum_s x_{fd}^{mps} \times \alpha_{fd}^{mps} \times c\alpha_{mp}$$

$$+ \sum_d \sum_r \sum_m \sum_p \sum_s y_{dr}^{mps} \times \beta_{dr}^{mps} \times c\beta_{mp}$$

$$\min z_2 = \sum_f \sum_d \sum_m \sum_s [T_{fdm} \times G_{fd}^{ms}] + \sum_d \sum_r \sum_m \sum_s [T_{drm} \times G_{dr}^{ms}] \quad \text{رابطه (۲)}$$

تابع هدف (۱) مجموع هزینه‌ها را کمینه می‌کند. قسمت اول مربوط به هزینه‌های تأسیس یا اجاره مرکز توزیع (هاب‌ها) می‌باشد. قسمت دوم مربوط به هزینه‌های ثابت حمل از تأمین کننده به مرکز توزیع است. قسمت سوم هزینه‌های ثابت حمل از مرکز توزیع به خرده‌فروش را نشان می‌دهد. همچنین قسمت چهارم هزینه‌های کمبود خرده‌فروش را نشان می‌دهد. در نهایت، مجموع هزینه‌های فسادپذیری کالا در حین حمل از تأمین کننده تا مرکز توزیع (هاب‌ها) و هزینه‌های فسادشدن در حین حمل از مرکز توزیع تا خرده‌فروش محاسبه می‌شود. تابع هدف (۲) زمان سفر کالا از تأمین کننده تا خرده‌فروش را کمینه می‌کند.

$$G_{fd}^{ms} \leq O_d + O'_{ds} \quad \forall f d m s \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$G_{dr}^{ms} \leq O_d + O'_{ds} \quad \forall d r m s \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_p x_{fd}^{mps} \leq G_{fd}^{ms} \times \mu \quad \forall f d m s \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_p y_{dr}^{mps} \leq G_{dr}^{ms} \times \mu \quad \forall d r m s \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\sum_f \sum_m x_{fd}^{mps} \leq l_{dps} (O_d + O'_{ds}) \quad \forall d p s \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\sum_d \sum_m x_{fd}^{mps} \leq W_{fps} \quad \forall d r m s \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$O_d + O'_{ds} \leq 1 \quad \forall d s \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\sum_f \sum_m \sum_p [x_{fd}^{mps} \times (1 - \alpha_{fd}^{mps})] \geq \sum_r \sum_m \sum_p y_{dr}^{mps} \quad \forall s d \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\sum_d O_d \leq \theta \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sum_d \sum_s O'_{ds} \leq \theta' \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$x_{fd}^{mps} \leq A_{fd}^{mps} \times G_{fd}^{ms} \quad \forall f d m p s \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$y_{dr}^{mps} \leq A_{dr}^{mps} \times G_{dr}^{ms} \quad \forall d r m p s \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\sum_d \sum_m [y_{dr}^{mps} \times (1 - \beta_{dr}^{mps})] + b_{rps} = dem_{rps} \quad \forall r p s \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$y_{dr}^{mps} x_{fd}^{mps} b_{rps} \geq 0 \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$G_{dr}^{ms}, O_d, O'_{ds} = 0 \text{ or } 1 G_{fd}^{ms} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

محدودیت‌های (۳) و (۴) نشان می‌دهند که حمل کالاها از تأمین‌کنندگان به هاب‌ها (مراکز توزیع) و از مراکز توزیع به خرده‌فروشان به شرط تأسیس یا اجاره هاب است. رابطه (۵) نشان‌دهنده برقراری ارتباط بین دو متغیر x_{fd}^{mps} و G_{fd}^{ms} است. رابطه (۶) نیز ارتباط بین دو متغیر y_{dr}^{mps} و G_{dr}^{ms} را نشان می‌دهد. رابطه (۷) ظرفیت تحویل کالای هر مرکز توزیع ساخته شده یا اجاره شده را مشخص می‌کند. در (۸) ظرفیت عرضه هر یک از تأمین‌کنندگان بیان شده است. محدودیت (۹) نشان می‌دهد هر مرکز توزیع می‌تواند تنها امکان ساخت و یا تنها امکان اجاره را داشته باشد. رابطه (۱۰) بیان می‌کند که میزان کالای سالم دریافتی مراکز توزیع بیشتر از میزان کالاهای ارسالی به خرده‌فروشان است. روابط (۱۱) و (۱۲) ظرفیت کل هاب‌های تأسیس/اجاره شده را در سال محدود می‌کنند. محدودیت (۱۳) و (۱۴) حداکثر ظرفیت برای هر یک از بسترهای حمل‌ونقل را نشان می‌دهد. رابطه (۱۵) نشان‌دهنده ارضای تقاضای هر خرده‌فروش می‌باشد. تقاضای هر خرده‌فروش در هر فصل برابر با میزان کالاهای سالم دریافتی از مراکز توزیع به همراه کمبود هر نوع محصول در آن فصل است. محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) نوع و علامت متغیرها را مشخص می‌کنند.

رویکردهای حل مسئله. در این مقاله از ۲ روش برای تک هدفه کردن مسئله استفاده می‌شود، در ادامه هر یک از روش‌ها، به صورت مختصر معرفی می‌شوند.

- **روش نرمال کردن^۱.** با در نظر گرفتن این مطلب که مدل مسئله شامل دو هدف حداقل کردن هزینه‌ها و زمان سفر است، از روش نرمال کردن در نرم‌افزار کدنویسی GAMS برای تک‌هدفه کردن مدل مسئله استفاده شده است. مسئله حداقل‌سازی دو هدفه زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} & \text{Min}(f_1(x) \ f_2(x)) \\ & s t \\ & x \in S \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

یک بار مسئله با تابع هدف اول و محدودیت‌ها حل شده و مقدار f_1^b به‌دست می‌آید، سپس مقادیر به‌دست آمده برای متغیرها در تابع هدف دوم قرار داده می‌شود و مقدار f_2^w به‌دست می‌آید. بار دیگر مسئله با تابع هدف دوم و محدودیت‌ها حل شده و مقدار f_2^b به‌دست می‌آید. و این بار مقادیر متغیرها، در تابع هدف اول قرار گرفته و مقدار f_1^w به‌دست می‌آید. در نهایت هر یک از مقادیر در ماتریس نتیجه^۲ که آن را ماتریس فی می‌نامند، به‌صورت زیر جایگذاری می‌شود:

1. normalization
2. pay off

$$\varphi = \begin{pmatrix} f_1^b & f_2^w \\ f_1^w & f_2^b \end{pmatrix} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

به‌طوری‌که f_1^b ، f_2^b مقادیر بهینه و f_1^w ، f_2^w بدترین مقادیر توابع f_1 ، f_2 هستند. با توجه به اینکه توابع هدف مقیاس‌های متفاوتی دارند، بنابراین با استفاده از رابطه (۲۰) نرمال می‌شوند:

$$\text{Min } N = \tau \left[\frac{f_1 - f_1^b}{f_1^w - f_1^b} \right] + (1 - \tau) \left[\frac{f_2 - f_2^b}{f_2^w - f_2^b} \right] \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$0 \leq \tau \leq 1$$

رابطه (۲۰) با نرمال‌سازی، دامنه ابتدایی توابع هدف را بر بازه $[0, 1]$ تصویر می‌کند و به این ترتیب مسئله بهینه‌سازی چندهدفه در یک فضای بدون مقیاس حل می‌شود.

- **روش اپسیلون-محدودیت^۱**: یکی از روش‌های پرکاربرد در مواجهه با مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه، روش اپسیلون-محدودیت نام دارد. در این رویکرد، تمرکز بر بهینه‌سازی یک تابع هدف اصلی است، در حالی که سایر توابع هدف به‌صورت محدودیت‌هایی در نظر گرفته می‌شوند که نباید از یک آستانه (اپسیلون) معین فراتر روند. مسئله MOMP^۲ زیر را در نظر بگیرید:

$$\text{MAX} (f_1(x) f_2(x) \dots f_p(x)) \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

st

$$x \in S$$

که در آن x بردار متغیرهای تصمیم‌گیری می‌باشد. $f_1(x)$ ، $f_2(x)$ ، $f_p(x)$ نیز p تابع هدف مسئله و S فضای شدنی مسئله هستند. در روش ϵ -constraint یکی از توابع هدف با استفاده از توابع هدف دیگر که به‌عنوان محدودیت در نظر گرفته شده‌اند، بهینه می‌شود.

$$\text{MAX} f_1(x) \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

t.s

$$f_2(x) \geq e_2$$

$$f_3(x) \geq e_3$$

...

$$f_p(x) \geq e_p$$

$$x \in S$$

- با تغییر پارامتری در سمت راست محدودیت‌های توابع هدف (e_i)، راه‌حل‌های مؤثر مسئله به‌دست می‌آید.
- **روش اپسیلون-محدودیت تقویت‌شده^۲**: در رویکرد اپسیلون محدودیت کلاسیک، علی‌رغم دارا بودن مزایای بسیاری نسبت به سایر روش‌ها، در برخی موارد نیازمند توجه ویژه است:

 ۱. **محاسبه دامنه توابع هدف در مجموعه کارا**: یکی از چالش‌های موجود در روش اپسیلون-محدودیت، تعیین دامنه مناسبی برای هر یک از توابع هدف است.
 ۲. **تضمین کارا بودن جواب به دست آمده**: در این روش، تضمین کارا بودن جواب به‌دست‌آمده نیازمند بررسی دقیق محدودیت‌ها و توابع هدف است تا اطمینان حاصل شود که جواب بهینه در مجموعه کارا قرار دارد.

1. ϵ _constraints
 2. multiple Attribute Decision making
 3. The augmented ϵ -constraint method

۳. **افزایش زمان حل مسئله:** با توجه به نیاز به محاسبه دامنه توابع هدف و تضمین کارا بودن جواب‌ها، زمان حل مسئله در روش محدودیت اِپسیلون کلاسیک ممکن است افزایش یابد.

برای غلبه بر این چالش‌ها، رویکرد اِپسیلون محدودیت تقویت‌شده ارائه شده است. این روش برای محاسبه مقادیر جدول نتایج نهایی، از رویکرد لکسیکوگراف برای هر تابع هدف استفاده کرده و محدودیت‌های مربوط به توابع هدف فرعی را با افزودن متغیرهای کمکی به تساوی تبدیل می‌کند [۲۱]. در روش لکسیکوگراف، بهینه‌سازی توابع هدف توسط تصمیم‌گیرنده بر اساس میزان اهمیت، اولویت‌بندی می‌شوند. در این روش، ابتدا تابع هدف با اولویت بیشتر به صورت تک‌هدفه بهینه می‌شود. فرض کنید $f_1(x)$ تابع هدف با اولویت بیشتر و جواب بهینه آن f_1^* باشد، برای بهینه‌سازی تابع هدف دوم، با اضافه کردن محدودیت $f_1(x) = f_1^*$ جواب بهینه‌سازی اول را نگه‌داشته و مقدار بهینه تابع هدف دوم به دست می‌آید. مدل روش اِپسیلون-محدودیت تقویت‌شده برای مسئله حداقل‌سازی به صورت زیر می‌باشد، و در آن ϑ عددی کوچک و r_i دامنه تابع هدف i ام می‌باشد [۴].

$$\text{Min } [f_1(x) - \vartheta \times \left(\frac{s_2}{r_2} + \frac{s_3}{r_3} + \dots + \frac{s_p}{r_p} \right)]$$

t.s

$$f_2(x) + s_2 = e_2$$

$$f_3(x) + s_3 = e_3$$

رابطه (۲۳)

...

$$f_p(x) + s_p = e_p$$

$$x \in S$$

$$s_i \in R +$$

گام‌های روش اِپسیلون-محدودیت تقویت‌شده به شرح زیر است (شکل ۱):

۱. محاسبه مقادیر جدول نتایج نهایی: با استفاده از روش لکسیکوگراف، مقادیر جدول نتایج نهایی به دست می‌آیند.
 ۲. انتخاب تابع هدف اصلی: یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شود.
 ۳. تعیین بهترین و بدترین مقدار توابع هدف فرعی: بهترین و بدترین مقدار هر یک از توابع هدف فرعی از جدول نتایج نهایی مشخص می‌شوند.
 ۴. محاسبه دامنه توابع هدف فرعی: دامنه هر یک از توابع هدف فرعی بر اساس مقادیر به دست آمده در مرحله قبل محاسبه می‌شود.
 ۵. تقسیم دامنه توابع هدف فرعی: دامنه توابع هدف فرعی با توجه به تعداد پاسخ‌های پارتوی دلخواه به تعداد از قبل مشخص شده تقسیم می‌شوند.
 ۶. هر یک از مقادیر به دست آمده از این تقسیم‌بندی برای تابع هدف f_i به عنوان یکی از e_p ها در نظر گرفته می‌شود.
 ۷. تابع هدف اصلی را به عنوان تابع هدف مدل و توابع هدف دیگر در محدودیت‌ها به صورت مدل (۲۳) قرار داده می‌شوند.
 ۸. مدل جدیدی که ایجاد شده را به ازای هر یک از مقادیر e_p ها حل می‌کنیم و در پایان، جواب‌های حاصل شده به ازای هر یک از این مقادیر، یکی از پاسخ‌های پارتوی مسئله است.
- الگوریتم اِپسیلون-محدودیت تقویت‌شده از حالت آزاد شروع کرده و به تدریج فضای جواب را محدود می‌کند. در واقع، برای یک مسئله حداقل‌سازی، ابتدا از بیشترین اِپسیلون‌ها (مقادیر سمت راست) آغاز کرده و به تدریج در تکرارهای بعد، مقادیر اِپسیلون‌ها را کاهش می‌دهد.

فرم کلی یک مدل بهینه سازی چندهدفه	$\bullet \text{Min } (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))$ $\bullet x \in X$
روش محدودیت اسیلون	$\bullet \text{Min } f_1(x)$ $\bullet f_i(x) \leq e_i \quad \forall i = 2, 3, \dots, n$ $\bullet x \in X$
روش محدودیت اسیلون تقویت شده	$\bullet \text{Min } f_1(x) - \sum_{i=2}^n \varphi_i s_i$ $\bullet f_i(x) + s_i = e_i \quad \forall i = 2, 3, \dots, n$ $\bullet x \in X$ $\bullet s_i \geq 0$

شکل ۱. فرم کلی روش اسیلون محدودیت

۴. تحلیل داده و یافته‌های پژوهش

جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مثال عددی شامل تعداد دو تأمین‌کننده (f_1, f_2) ، پنج مکان بالقوه برای تأسیس یا اجاره مراکز توزیع $(d_5, d_4, d_3, d_2, d_1)$ و ظرفیت حداکثر ۲ هاب برای تأسیس و ۳ هاب برای اجاره در کل سال فرض شده است. همچنین تعداد ده خرده‌فروش $(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9)$ با تقاضاهای پویا در چهار فصل سال در نظر گرفته شده است. به علت اینکه کالاها فسادپذیر هستند و فاصله مراکز توزیع تا تأمین‌کنندگان زیاد است، روش حمل‌ونقل هوایی (M) برای ارسال کالاها از تأمین‌کننده به هاب‌ها و همچنین روش حمل‌ونقل جاده‌ای (M') به صورت کامیون و تریلی برای ارسال کالاها از مراکز توزیع به خرده‌فروشان در نظر گرفته شده است. همچنین دو نوع کالا (p_1, p_2) در چهار فصل یک سال مد نظر قرار گرفته است. کمبود در این مدل مجاز است. سایر داده‌های مسئله در قالب جدول ۲ ارائه شده است. داده‌های مربوط به هزینه بر حسب دلار و داده‌های مربوط به زمان بر حسب دقیقه می‌باشد.

جدول ۲. اطلاعات مسئله

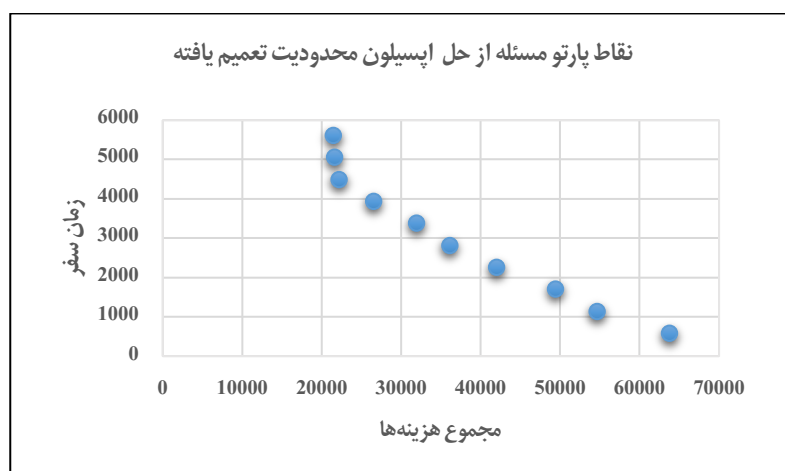
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
Uniform (0,300)	dem _{rps}	Uniform (1000,1500)	A _{fd} ^{mps}
Uniform (1000,2000)	W _{fps}	Uniform (500,600)	A _{dr} ^{m ps}
Uniform (600,650)	l _{dps}	Uniform (40,45)	C _{fd} ^{ms}
Uniform (5,7)	K _p	Uniform (20,25)	C _{dr} ^{m s}
Uniform (120,300)	T _{fdm}	Uniform (1200,1400)	h _d
Uniform (60,120)	T _{dr} ^{dr m}	Uniform (350,400)	h _{ds}
Uniform (0.07,0.09)	α _{fd} ^{mps}	Uniform (2,7)	cα _{mp}
Uniform (0.03,0.04)	β _{dr} ^{m ps}	Uniform (1,5)	cβ _{m p}

نتایج حاصل از حل با روش اسیلون - محدودیت تقویت شده. در ادامه، مدل پیشنهادی طی ۱۰ تکرار با نرم‌افزار گمز حل گردید و نتایج و جبهه پارتو نیز ترسیم شده است.

جدول ۳. مقادیر توابع هدف به دست آمده از روش اپسیلون محدودیت تقویت یافته

شماره تکرار	زمان سفر (دقیقه)	مجموع هزینه‌ها (دلار)
اول	۵۶۰۸,۰۸۳۴۹	۲۱۵۷۳,۶۵۷۱۳
دوم	۵۰۴۶,۷۳۹۹۱	۲۱۷۲۹,۷۱۶۳۶
سوم	۴۴۸۳,۴۰۶۸۹	۲۲۳۱۴,۸۱۷۲۶۹
چهارم	۳۹۲۵,۶۲۴۳۵	۲۶۶۷۸,۳۴۷
پنجم	۳۳۶۶,۴۲۵۴۹	۳۰۵۲,۶۸۵۶۴
ششم	۲۸۰۶,۴۷۰۴۹	۳۶۲۲۹,۶۷۰۵۳
هفتم	۲۲۴۲,۱۵۷۵۷	۴۲۱۵۰,۹۷۹۸۹
هشتم	۱۶۸۷,۵۶۷۶۵	۴۹۵۳۳,۳۸۲۲۲
نهم	۱۱۲۷,۹۲۶۸	۵۴۷۷۰,۶۶۲۱۷
دهم	۵۶۸۱,۹۴۲۶۴	۶۳۸۵۱,۵۳۳۸

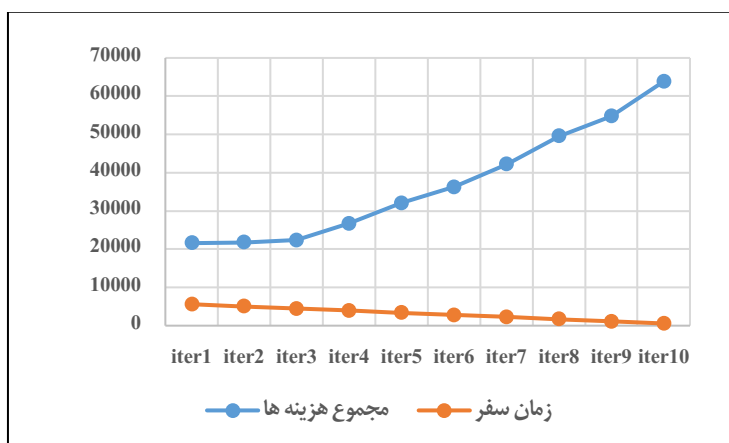
همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، هرچه مقدار تابع هدف اول (مجموع هزینه‌ها) بیشتر شود، تابع هدف دوم (زمان سفر) کمتر می‌شود. یعنی برای کاهش زمان سفر مجبور به پرداخت هزینه بیشتری هستیم و بالعکس. نمودار جبهه پارتو مسئله در شکل ۲ رسم شده است.



شکل ۲. نقاط پارتو به دست آمده از روش اپسیلون محدودیت تعمیم یافته

در شکل ۲ محدوده بهینه مسئله مشخص شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار تابع هدف اول، مقدار تابع هدف دوم کاهش و به بیان دیگر بهبود می‌یابد. نکته قابل توجه این است که در این مسئله ما با دو تابع هدف حداقل‌سازی سروکار داریم که با هم رابطه عکس دارند.

در شکل ۳ نیز، نمودار تغییرات توابع هدف در مقایسه با یکدیگر در ده تکرار، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند مجموع هزینه‌ها از تکرار سوم به بعد افزایش چشمگیری پیدا می‌کند.



شکل ۳. نمودار تغییرات توابع هدف نسبت به یکدیگر

نتایج حاصل از حل با روش نرمال‌سازی.

جدول ۴. مقادیر مربوط به ماتریس بازده (pay off)

مقادیر جدول pay off	
z1_b	۲۱۵۷۳,۶۵۷
z1_w	۷۱۷۵۷,۳۲۷
z2_b	۰,۰,۰
z2_w	۰,۸۳۵۶۰,۸

بر اساس اطلاعات جدول ۲ و با فرض ظرفیت ۳ هاب برای اجاره و ۲ هاب برای تأسیس در کل سال، مسئله با نرمال‌کردن توابع هدف در نرم‌افزار گمز حل شد (جدول ۴ ملاحظه شود). وزن دو تابع هدف، مجموع هزینه‌ها و زمان سفر، یکسان در نظر گرفته ($\tau = 0,5$) در ادامه، نحوه‌ی مکانیابی و تخصیص نقاط هر یک از فصل‌های سال در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده است. در جدول ۵، مقادیر توابع هدف به ازای تغییرات τ نشان داده شده است.

جدول ۵. مقادیر توابع هدف به ازای تغییرات τ

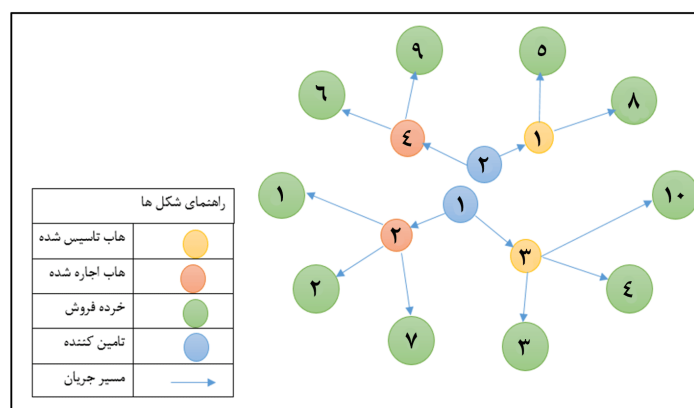
τ	مجموع هزینه‌ها	زمان سفر
۰,۱	۳۶۹۹۰,۱۵۶	۲۵۹۸,۴۳
۰,۲	۲۲۳۹,۶۶	۴۳۳۸,۸۷۳
۰,۳	۲۲۴۰۹,۷۱	۴۴۱۲,۲۴۴
۰,۴	۲۲۳۴۷,۵۵۹	۴۴۵۲,۶۱۵
۰,۵	۲۱۹۲۹,۵۵۷	۴۷۷۱,۳۳۶
۰,۶	۲۱۷۸۰,۰۸۳	۴۹۵۴,۱۵۷
۰,۷	۲۱۷۱۵,۶۹۸	۵,۶۹,۷۴۲
۰,۸	۲۱۶۱۰,۱۰۴	۵۳۶۳,۸۶۹
۰,۹	۲۱۵۷۴,۶۲۸	۵۵۵۹,۲۰۸

نحوه مکان‌یابی و تخصیص هاب‌ها در چهار فصل سال. شکل ۴ نحوه تخصیص هر یک از هاب‌ها یا مراکز توزیع را به تامین‌کنندگان و همچنین نحوه تخصیص خرده‌فروشان به مراکز توزیع در فصل اول را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فصل اول، ۲ مرکز توزیع تاسیس (d_1, d_2) و ۲ مرکز توزیع (d_2, d_4) اجاره می‌شود.

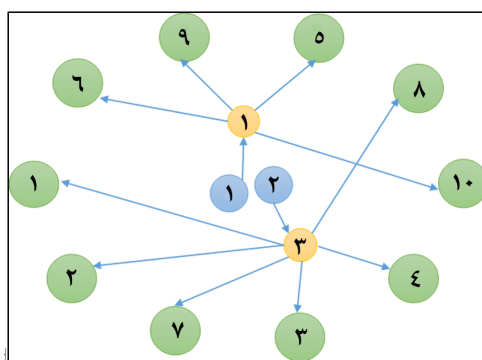
شکل ۵ نیز، نحوه تخصیص هر یک از هاب‌ها یا مراکز توزیع را به تامین‌کنندگان و همچنین نحوه تخصیص خرده‌فروشان به مراکز توزیع در فصل دوم را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۵، در فصل دوم تنها دو مرکز توزیع (d_1, d_2) تاسیس می‌شود.

شکل ۶ نیز، نحوه تخصیص هر یک از هاب‌ها یا مراکز توزیع را به تامین‌کنندگان و همچنین نحوه تخصیص خرده‌فروشان به مراکز توزیع در فصل سوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مراکز توزیع (d_1, d_2) تاسیس و مرکز توزیع d_4 اجاره شده است.

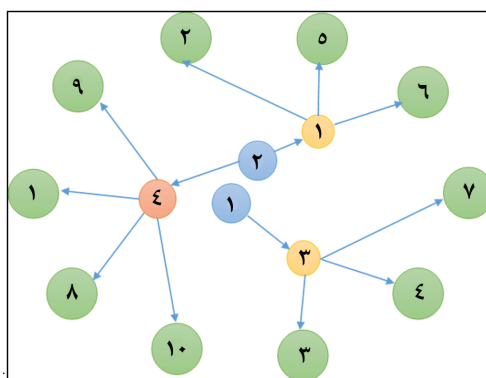
شکل ۷ نیز، نحوه تخصیص هر یک از هاب‌ها یا مراکز توزیع را به تامین‌کنندگان و همچنین نحوه تخصیص خرده‌فروشان به مراکز توزیع در فصل چهارم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مراکز توزیع (d_1, d_2) تأسیس شده‌اند و مانند فصل دوم هیچ هابی اجاره نشده است. نکته قابل توجه این است که در این فصل، خرده‌فروشان (r_1, r_2, r_7) به مراکز توزیع تخصیص داده نشده‌اند، بنابراین میزان تقاضای آن‌ها برآورده نشده، پس در این فصل باید انتظار بیشترین میزان کمبود را داشت.



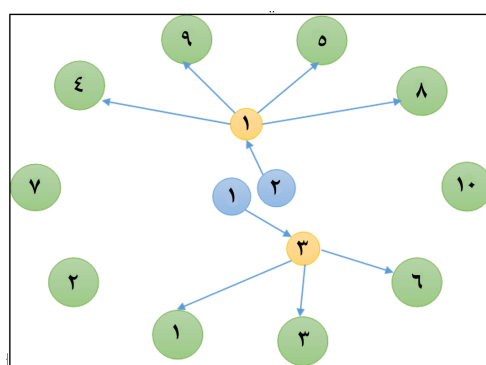
شکل ۴. نحوه مکان‌یابی و تخصیص هاب‌ها در فصل اول



شکل ۵. نحوه مکان‌یابی و تخصیص هاب‌ها در فصل دوم



شکل ۶. نحوه مکانیابی و تخصیص هاب‌ها در فصل سوم



شکل ۷. نحوه مکانیابی و تخصیص هاب‌ها در فصل چهارم

تفسیر روند تغییرات مکان‌یابی و تخصیص هاب‌ها در طی چهار فصل سال. همان‌طور که در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شد، مراکز (d_1, d_2) به طور دائم در سال (هر ۴ فصل) تاسیس شده‌اند. در فصل اول، مراکز توزیع (d_2, d_4) همچنین در فصل سوم مرکز توزیع d_4 به دلیل تقاضای بالای خرده‌فروشان اجاره شده‌اند تا علاوه بر، برآورده شدن نیاز مشتریان، هزینه‌های کل شبکه نیز تا حدودی کاهش یابند. در فصل دوم و چهارم، با توجه به تقاضای مشتریان، از نظر اقتصادی به صرفه نبوده که مرکز توزیعی اجاره شود. در جدول ۶، میزان کمبود در فصل‌های دوم و چهارم مشخص شده است. کمبود در فصل اول و سوم صفر می‌باشد و همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمبود در فصل دوم برای کالای نوع ۲ در خرده‌فروشان (I_8, I_9) دیده می‌شود. همچنین طبق نتایج جدول ۶، در فصل چهارم با کمبود زیادی مواجه هستیم. در جدول ۷، میزان کالاهای ارسالی از تأمین‌کنندگان به مراکز توزیع (هاب‌ها) و در جدول ۸ نیز میزان کالاهای ارسالی از هاب‌ها به خرده‌فروشان توسط دو وسیله نقلیه جاده‌ای در طی چهار فصل سال نشان داده شده است.

جدول ۶. میزان کمبود هر فصل

فصل چهارم	فصل دوم	نوع کالا	خرده فروشان
۹۵۷۷۵	۰	${}_1P$	${}_1R$
۱۹۹۰۱۳۳	۰	${}_2P$	
۴۶۹۰۸۸	۰	${}_2P$	${}_2R$
۴۹۸۱۷	۰	${}_1P$	${}_1R$
۷۱۳۰۲۳۹	۰	${}_2P$	

فصل چهارم	فصل دوم	نوع کالا	خرده فروشان
۷۹۹۰۲۹	۶۴۷۰۴۰	۲P	۸R
.	۷۶۸۰۱۸	۲P	۹R
۳۰۷۰۶۲	.	۱P	۱۰R
۸۹۸۰۱۶	.	۲P	

جدول ۷. میزان کالاهای ارسالی از تأمین کنندگان به مراکز توزیع

شماره فصل	نوع کالا	۱F			۲F		
		۱D	۲D	۳D	۱D	۳D	۴D
۱	۱P	-	۸۰۰'۶۳۸	۶۰۳'۶۲۷	۴۹۱'۶۰۴	-	۴۷۴۹'۵۷۳
	۲P	-	۲۰۴'۴۸۸	۹۲۸'۶۴۲	۵۶۵'۵۰۹	-	۳۴۷'۵۲۵
۲	۱P	۴۰۴'۶۲۰	-	-	-	۶۵۵'۶۳۱	-
	۲P	۸۷۲'۶۱۷	-	-	-	۳۱۲'۶۴۸	-
۳	۱P	-	-	۴۵۰'۶۴۱	۸۴۱'۶۰۶	-	۹۳۰'۱'۶۳۷
	۲P	-	-	۶۶۴'۴۱۲	۹۰۱'۵۳۷	-	۵۴۰'۶۱۰
۴	۱P	-	-	۴۴۱'۶۴۵	۷۳۱'۶۳۶	-	-
	۲P	-	-	۱۲۴'۶۴۸	۵۴۰'۶۳۱	-	-

جدول ۸. میزان کالاهای ارسالی از مراکز توزیع به خرده‌فروشان

			rR	rR	rR	ΔR	sR	vR	λR	qR	νR	
1	iD	m_2	iP	-	-	-	209,20	-	-	271,14	-	-
			rP	-	-	-	269,20	-	-	270,58	-	-
		m_1	iP	77,296	-	-	-	-	-	-	-	
			rP	112,93	-	-	-	-	-	-	-	-
	rD	m_2	iP	-	-	-	-	280,57	-	-	-	
			rP	-	-	-	-	139,09	-	-	-	-
		m_1	iP	-	-	-	-	-	-	-	114,84	
			rP	-	-	-	-	-	-	-	-	108,49
		m_2	iP	-	288,01	102,95	-	-	-	-	-	-
			rP	-	283,03	271,15	-	-	-	-	-	-
	rD	m_2	iP	-	-	-	-	207,42	-	-	278,78	-
			rP	-	-	-	-	306,51	-	-	222,40	-
2	iD	m_2	iP	-	-	-	290,34	28,898	-	-	5,653	285,79
			rP	-	-	-	143,056	156,81	-	-	85,166	150,70
	rD	m_1	iP	-	-	-	-	-	-	87,549	-	-
			rP	-	-	-	-	-	-	25,281	-	-

			۱R	۲R	۳R	۴R	۵R	۶R	۷R	۸R	۹R	۱۰R
۳	m_2	۱P	-	-	-	-	-	-	۵۱,۸۸۱	-	-	-
		۲P	۱۲۲,۲۴	۵۹,۷۳	۱۴۰,۵۸	-	-	-	۱۵۶,۳۰۹	-	-	-
	m_1	۱P	-	-	-	۴,۶۹۵	-	-	-	-	-	-
		۲P	-	-	-	۱۳۰,۴۵	-	-	-	-	-	-
	۱D	۱P	۲۹۲,۶۷	-	-	-	۱۶۳,۹۲	-	-	-	-	-
		۲P	۲۶۰,۴۸	-	-	-	۲۰۱,۰۲	-	-	-	-	-
	m_2	۱P	-	۲۸۰,۶۹	۱۶۸,۷۳	-	-	-	۱۵۹,۷۸	-	-	-
		۲P	-	۴۴,۸۴	۱۱۱,۹۴	-	-	-	۲۱۲,۴۱	-	-	-
	m_1	۱P	-	-	-	-	-	-	-	۲۸۲,۲۹	-	۳۰۷,۰۳
		۲P	-	-	-	-	-	-	-	۲۴,۹۳۰	-	۱۹۹,۶۳
	۲D	۱P	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۴۳,۳۸	-
		۲P	-	-	-	-	-	-	-	-	۳,۹۹۸	-
۴	m_2	۱P	-	-	۱۶۶,۳۵	۱۰۶,۵۲	-	-	-	۱۴۰,۱۲	۱۹۳,۴۳	-
		۲P	-	-	۳۵,۴۲۹	۲۲۴,۵۲	-	-	-	۱۸۹,۱۷	۱۱۰,۳۸	-
	m_1	۱P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		۲P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	۳D	۱P	-	۱۵۸,۶۹	-	-	۲۷۷,۸۸	-	-	-	-	-
		۲P	-	۲۳۵,۸۸	-	-	۱۴۵,۳۹	-	-	-	-	-

شاخص‌های ارزیابی

- **معیار میانگین انحرافات از جواب ایده‌آل.** میانگین انحرافات از جواب ایده‌آل به معنای محاسبه فاصله میان نقاط بهینه و یک جواب ایده‌آل است. ابتدا باید یک جواب ایده‌آل برای هر یک از اهداف تعیین گردد. این جواب معمولاً شامل بهترین مقادیر ممکن برای هر معیار است. سپس برای هر نقطه بهینه، انحراف آن از جواب ایده‌آل محاسبه می‌شود و در نهایت میانگین انحرافات محاسبه می‌شود. اگر مقدار MID^1 کوچک‌تر باشد، نشان‌دهنده این است که نقاط بهینه نزدیک‌تر به جواب ایده‌آل هستند و بنابراین کیفیت بهتری دارند. فرمول کلی به صورت رابطه (۲۴) است.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i^* - x_i|}{|n|} \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

- **معیار بیشترین گستردگی.** طول قطر مکعب فضایی را که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های نامطلوب به کار می‌رود، اندازه‌گیری می‌کند که در رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود. هر چه این مقدار بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده کیفیت بهتر نتایج است.

$$DM = \sqrt{(\max f_{1i} - \min f_{1i})^2 + (\max f_{2i} - \min f_{2i})^2} \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

- **معیار یکنواختی.** میزان فاصله نسبی را با استفاده از رابطه (۲۶) محاسبه می‌کند. هر چه این مقدار کوچک‌تر باشد، نتیجه بهتر خواهد بود.

رابطه (۲۶)

$$s = \left(\frac{1}{n_{pf}} \sum_{i=1}^{n_{pf}} (d_i - \bar{d})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \text{ where } \bar{d} = \frac{1}{n_{pf}} \sum_{i=1}^{n_{pf}} d_i$$

تحلیل حساسیت. در ادامه، حساسیت مدل در سه بخش نسبت به تغییر در ابعاد مسئله، شامل ظرفیت هاب‌های اجاره‌شده در سال، هزینه‌های اجاره هاب در هر فصل و تأثیر آن‌ها بر توابع هدف تحلیل و بررسی شده است:

- **تحلیل حساسیت برای ابعاد مسئله.** در این بخش با تغییر تعداد نقاط مقصد (تقاضا)، تعداد تأمین‌کنندگان، انواع محصول و انواع حمل از مراکز توزیع به مقاصد و حل مسئله در اندازه‌های کوچک و متوسط مطابق با جدول ۹ به تحلیل حساسیت مسئله پرداخته شده است. مقادیر پارامترهای ورودی به‌طور ثابت و تصادفی با توزیع یکنواخت مطابق با جدول (۲) است. لازم به ذکر است که برای هر ۱۰ مسئله تصادفی، یک روش حمل از تأمین‌کننده به مراکز توزیع در نظر گرفته شده است (حمل هوایی). نتایج تحلیل حساسیت برای ابعاد مسئله در جدول ۱۰ آورده شده‌اند. ستون اول این جدول، شماره مسئله را نشان می‌دهد. ستون دوم، مجموع هزینه‌ها را نمایش می‌دهد. ستون سوم، تعداد هاب‌های تأسیس شده در کل سال را نشان می‌دهد و ستون‌های چهارم، پنجم، ششم و هفتم به‌ترتیب هاب‌های اجاره‌ای یا همان مراکز توزیع اجاره‌ای در چهار فصل سال را نمایان می‌سازند.

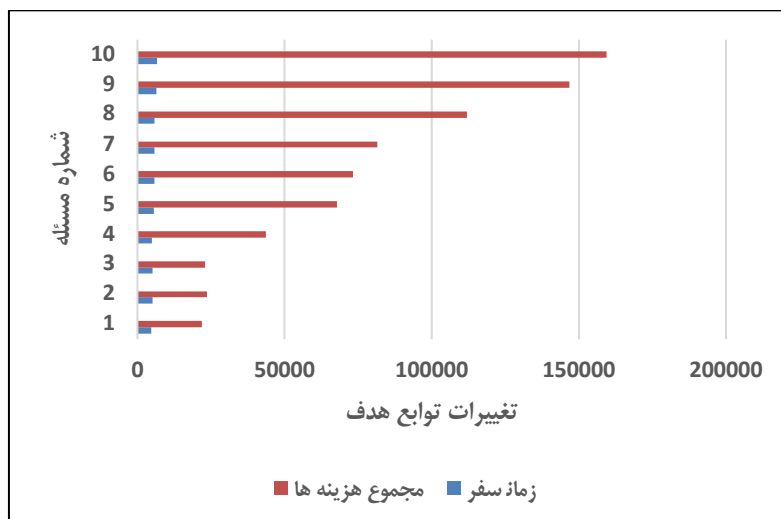
جدول ۹. اندازه مسائل

شماره مسئله	زمان سفر	هاب‌های تأسیس شده	هاب‌های اجاره شده فصل ۱	هاب‌های اجاره شده فصل ۲	هاب‌های اجاره شده فصل ۳	هاب‌های اجاره شده فصل ۴
۱	۲	۱۰	۲	۳	۲	۲
۲	۲	۱۱	۲	۳	۳	۲
۳	۳	۱۱	۲	۳	۳	۲
۴	۳	۱۲	۲	۳	۳	۲
۵	۳	۱۳	۲	۳	۴	۳
۶	۳	۱۴	۲	۳	۵	۳
۷	۴	۱۴	۲	۳	۵	۳
۸	۴	۱۵	۲	۳	۵	۳
۹	۴	۱۶	۲	۳	۶	۳
۱۰	۴	۱۷	۲	۳	۶	۳

جدول ۱۰. تأثیر ابعاد مسئله بر هزینه‌ها و زمان سفر

شماره مسئله	مجموع هزینه‌ها	زمان سفر	هاب‌های تأسیس شده	هاب‌های اجاره شده فصل ۱	هاب‌های اجاره شده فصل ۲	هاب‌های اجاره شده فصل ۳	هاب‌های اجاره شده فصل ۴
۱	۲۱۹۲۹,۵۵۷۲	۴۷۷۱,۳۳	d_f, d_1	d_f, d_f	-	d_f	-
۲	۲۳۶۸۹,۸۱	۵۰۶۹,۹۸	d_f, d_5	d_f	d_f	d_f	d_f
۳	۲۲۹۹۵,۷۲	۵۰۵۱,۷۰	d_f, d_1	d_f	d_f	d_f	d_f
۴	۴۳۶۷۳,۰۴۰	۴۹۵۷,۳۲۸	d_f, d_f	d_f	d_f	d_f	d_f
۵	۶۷۸۳۳,۷۰	۵۶۲۰,۰۹	d_f, d_f	d_f	d_f	d_f	d_f
۶	۷۳۱۵۸,۳۳	۵۸۹۱,۷۸	d_f, d_5	d_f	d_f	d_f	d_f
۷	۸۱۴۳۷,۴۴	۵۷۰۱,۰۶۵	d_f, d_1	d_f	d_f	d_f	d_f
۸	۱۱۱۹۳۳,۵۰	۵۸۹۵,۸۴	d_f, d_5	d_f	d_f	d_f	d_f
۹	۱۴۶۶۷۷,۳۷	۶۳۵۵,۷۰	d_f, d_1	d_f	d_f	d_f	d_f
۱۰	۱۵۹۳۳۳,۷۱	۶۷۵۷,۸۰	d_f, d_f	d_f	d_f	d_f	d_f

با مشاهده نتایج این جدول مشخص می‌شود که با افزایش ابعاد مسئله، هزینه‌های کل و زمان سفر افزایش می‌یابد. در واقع، با افزایش نقاط مقصد (افزایش تقاضا)، بدیهی است که زمان سفر و مجموع هزینه‌ها افزایش می‌یابد که نمودار شکل ۸ گویای این نکته می‌باشد.



شکل ۸. تغییرات توابع هدف نسبت به تغییر ابعاد مسئله

تحلیل حساسیت حداکثر تعداد هاب‌های اجاره شده. در این بخش، مسئله به منظور تعیین نقش تعداد هاب‌های اجاره شده بر هزینه و زمان سفر بررسی می‌شود. با توجه به اینکه در مثال عددی، تعداد هاب‌های اجاره شده حداکثر ۳ هاب در طی سال بود، مقدار ظرفیت کمتر و بیشتر از این مقدار در نظر گرفته می‌شود. انتظار می‌رود با افزایش حداکثر تعداد هاب‌های اجاره شده، کمبود و هزینه‌ها کاهش یافته و همچنین زمان سفر افزایش یابد. از طرف دیگر، با کاهش حداکثر تعداد هاب‌های اجاره شده، هزینه‌ها افزایش و زمان سفر کوتاه‌تر شود. همان‌طور که در جدول ۱۱ نشان داده شده است، طبق پیش‌بینی انجام شده، ظرفیت تعداد هاب‌های اجاره شده رابطه مستقیمی با زمان سفر و همچنین رابطه معکوسی با کمبود و مجموع هزینه‌ها دارد.

جدول ۱۱. تأثیر حداکثر تعداد هاب‌های اجاره شده بر هزینه‌ها و زمان سفر

هاب‌های اجاره شده فصل ۴	هاب‌های اجاره شده فصل ۳	هاب‌های اجاره شده فصل ۲	هاب‌های اجاره شده فصل ۱	هاب‌های تاسیس شده	زمان سفر	مجموع هزینه‌ها	حداکثر تعداد هاب‌های اجاره‌ای در سال
0	d_f	۰	d_f	d_f, d_1	۴۵۴۲,۸۰۸	۲۵۰۹۹,۸۴۶	۲
0	d_f	۰	d_f, d_f	d_f, d_1	۴۷۷,۳۳۶	۲۱۹۲۹,۵۵۷	۳
d_f	d_f	۰	d_f, d_d	d_f, d_1	۴۹۵۴,۹۵۹	۱۹۰۸۴,۷۵۹	۴

جدول ۱۲. تأثیر حداکثر تعداد هاب‌های اجاره شده بر کمبود

فصل چهارم	فصل سوم	فصل دوم	فصل اول	حداکثر تعداد هاب‌های اجاره‌ای در سال
۶۵۳,۸۴۳	۰	۵۹,۴۱۶	۷۴۱,۷۸	۲
۶۵۳,۸۴۱	۰	۵۹,۴۱۵	۰	۳
۰	۰	۱۱۲,۴۰۱	۰	۴

نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهد که در شرایطی که حداکثر تعداد هاب‌های اجاره‌ای از ۲ به ۴ عدد در سال افزایش می‌یابد، میزان هزینه‌ها خیلی کاهش یافته اما در عوض زمان سفر به میزان زیادی افزایش خواهد یافت چرا که با افزایش تعداد هاب‌های اجاره‌ای و تأسیس شده، کل مسافت طی شده افزایش پیدا می‌کند. همچنین در شرایطی که ظرفیت هاب‌های اجاره‌ای به دو عدد در سال کاهش می‌یابد، میزان کمبود سالانه بیشترین مقدار خواهد بود.

تحلیل حساسیت هزینه اجاره هاب. در این بخش، تأثیر هزینه اجاره هاب بر مجموع هزینه‌ها و زمان سفر مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین، هزینه اجاره هاب با ۲۰ درصد افزایش و کاهش ارزیابی می‌شود. نتایج آن در جدول ۱۳ نمایش داده شده است.

جدول ۱۳. تحلیل تأثیر هزینه اجاره هاب بر مجموع هزینه‌ها و زمان سفر

هاب‌های اجاره شده فصل ۴	هاب‌های اجاره شده فصل ۳	هاب‌های اجاره شده فصل ۲	هاب‌های اجاره شده فصل ۱	هاب‌های تأسیس شده	زمان سفر	مجموع هزینه‌ها	تغییرات هزینه اجاره هاب
-	d_f	-	d_f	d_f, d_i	۴۷۷۱,۳۳۶	۲۱۷۱۳,۲۴۸	۰,۸
-	d_f	-	d_f, d_f	d_f, d_i	۴۷۷۱,۳۳۶	۲۱۹۲۹,۵۵	۱
-	d_f	-	d_f, d_f	d_f, d_i	۴۷۷۱,۳۳۶	۲۲۱۴۵,۸۶	۱,۲

در جدول (۱۳) همان‌طور که انتظار می‌رود، هزینه اجاره هاب تأثیر مستقیمی بر مجموع هزینه‌ها دارد، اما تأثیری بر زمان سفر نمی‌گذارد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، به بررسی مسئله مکان‌یابی هاب چندکالایی با در نظر گرفتن تقاضای پویا و چند بستر حمل‌ونقلی برای کالاهای فصلی فسادپذیر دوهدفه پرداخته شده است. مسئله به‌عنوان یک مدل MILP (برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط) فرموله شد. همچنین، به منظور نزدیک شدن مسئله به واقعیت، تقاضا در این مسئله به‌صورت پویا و فصلی در نظر گرفته شده است. در این مسئله، به مکان‌یابی هاب‌ها (مراکز توزیع) تحت شرایط ساخت یا اجاره، به عنوان راهکاری برای مدیریت نوسانات بالای تقاضا در فصل‌های مختلف سال، توجه و تأکید می‌شود.

در این مسئله، کاربرد بسترهای مختلف حمل‌ونقلی (هوایی و جاده‌ای)، با ویژگی‌های منحصر به فرد خود، نقش بسزایی در توزیع بهتر محصولات ایفا می‌کنند. به عنوان مثال، با توجه به ماهیت فسادپذیر کالاها، بهره‌گیری از سیستم حمل‌ونقل هوایی موجب افزایش سرعت در جابجایی آن‌ها می‌شود. از سوی دیگر، سیستم جاده‌ای حمل‌ونقل، به‌واسطه خاصیت دسترسی‌پذیری که دارد، دسترسی به اکثر مناطق را امکان‌پذیر ساخته و توزیع کالا را تسهیل می‌نماید.

نتایج تحلیل حساسیت‌ها نشان داد با افزایش تعداد مقاصد و ابعاد مسئله، هزینه‌های کل و زمان سفر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش حداکثر تعداد هاب‌های اجاره‌ای، هزینه‌های کل و نیز میزان کمبود کاهش می‌یابد. پس زمانی که تقاضاها به‌صورت موقت افزایش می‌یابد، می‌توان به‌جای تأسیس دائمی هاب‌ها، با اجاره هاب به‌صورت فصلی، هزینه‌ها را تا حد قابل‌توجهی کاهش داد. اما از طرف دیگر، با افزایش حداکثر تعداد هاب‌های اجاره‌ای، تعداد کل هاب‌های تأسیس شده و اجاره‌ای افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه مسافت طی شده و زمان سفر نیز افزایش پیدا می‌کند.

در نهایت، می‌توان گفت، این امر (افزایش تعداد هاب‌های اجاره‌ای) اگرچه منجر به کاهش هزینه‌های کل و کمبود می‌گردد، اما به دلیل افزایش فاصله بین هاب‌ها و نقاط تقاضا، زمان سفر افزایش می‌یابد که این نتیجه بیانگر یک تعارض بین هزینه و سطح خدمت‌رسانی در زنجیره تأمین محصولات فسادپذیر است.

دستاوردهای تحقیق و توصیه‌های مدیریتی. هدف بنیادین تحلیل نتایج در مسائل گوناگون، کسب درک و بینش‌های مدیریتی است. در این زمینه، مدیران می‌بایست همیشه این نکته را در نظر داشته باشند که شرایط در دنیای واقعی همواره در حال دگرگونی و تحول است. از این

رو، مدیران باید برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های خود را با توجه به شرایط پویای محیطی تنظیم نمایند. لذا نحوه برخورد با پارامترهای مسئله باید به‌گونه‌ای باشد که انعطاف‌پذیری لازم را برای مواجهه با تغییرات شرایط داشته باشد.

انتخاب مکان تسهیلات، میزان جریان کالا در سطوح مختلف و انتخاب نوع وسیله حمل‌ونقل با توجه به اهداف مکان‌یابی، مهم‌ترین تصمیماتی هستند که شرکت‌ها در سطوح استراتژیک و تاکتیکی مسائل مکان‌یابی هاب با آن‌ها مواجه هستند. این موضوع به‌خصوص در مورد کالاهای فسادپذیر نظیر مواد غذایی اهمیت دوچندانی داشته و می‌تواند عامل موفقیت یا عدم موفقیت کسب‌وکار تلقی گردد. به همین جهت، این مطالعه با تأکید بر اهمیت درنظرگرفتن نوع محصول و توجه به خلأهای تحقیقاتی در این حوزه، به طراحی یک مسئله مکان‌یابی هاب چندکالایی با درنظرگرفتن تقاضای پویا و چند بستر حمل‌ونقلی، و تمرکز بر کالاهای فسادپذیر پرداخته است.

علاوه بر این، توجه به تفاوت نرخ فساد محصولات در حمل‌ونقل می‌تواند باعث تغییر رویکرد مدیران در اتخاذ سیاست‌های کلان در این حوزه گردد و مدیران شرکت‌ها را به سمت بهره‌گیری از تسهیلات دارای تکنولوژی بالاتر سوق دهد. یکی از نتایج این موضوع، علاوه بر کاهش هزینه فاسدشدن محصولات، افزایش بهره‌وری کل شبکه خواهد بود. همچنین، ترکیبی از ابزارهای مختلف حمل‌ونقل نه تنها انعطاف‌پذیری را فراهم می‌کند، بلکه این امکان را می‌دهد که مسیر بهینه‌ای انتخاب شود که نسبتاً سریع و ارزان خواهد بود. بنابراین، در مسائلی که کالاها از نوع فسادپذیر هستند، به جهت کاهش زمان سفر و حفظ تازگی محصولات، استفاده از شیوه‌های متفاوت حمل‌ونقل ضروری است.

با توجه به یافته‌های حاصله از این مقاله، می‌توان اظهار داشت که بهتر است پیش از اتخاذ تصمیمات استراتژیک، مانند مکان‌یابی، تأسیس و اجاره هاب‌ها، ابتدا به طراحی شبکه و بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی مسئله بر اهداف مدنظر مدیریت پرداخته شود. پس از آن، متناسب با نتایجی که به‌دست آمده است، می‌توان به تصمیم‌گیری، سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری اقدام نمود. به عنوان نمونه، در این مطالعه، پارامتر مربوط به حداکثر تعداد هاب‌های اجاره‌ای تأثیر بسزایی بر توابع هدف هزینه و زمان سفر دارد و با توجه تناقض این اهداف باهم، باید در این رابطه به گونه‌ای تصمیم‌گیری شود تا بهترین تعادل و موازنه بین حداقل شدن هزینه‌های شبکه و افزایش زمان سفر در زنجیره تامین کالاهای فسادپذیر برقرار شود.

از منظر کاربردی، مدل توسعه‌یافته در این پژوهش می‌تواند به عنوان یک ابزار برای تصمیم‌گیری مدیران لجستیک در صنایعی که با تقاضای موجی و کالاهای حساس به زمان سروکار دارند، عمل کند. این مدل به سازمان‌ها کمک می‌کند تا با ترکیب هوشمندانه بسترهای مختلف حمل‌ونقل و استفاده از ظرفیت‌های موقت (اجاره‌ای)، علاوه بر کاهش هزینه‌های ثابت، نرخ ضایعات را کاهش داده و سطح پاسخگویی به مشتری را در فصول پرتقاضا ارتقا بخشند. نمونه‌هایی از این صنایع، شامل موارد زیر است:

- مدیریت زنجیره تامین محصولات کشاورزی و باغی مانند میوه‌های فصلی پرتقاضا و به شدت فاسدشدنی مثل توت فرنگی و ...
- لجستیک کالاهای اساسی در زمان پیک سفر در شهرهای توریستی برای اقامت فاسدشدنی مثل لبنیات، گوشت و ...
- توزیع اقلام دارویی و واکسن‌های خاص در زمان اپیدمی‌های فصلی
- مدیریت توزیع در فروشگاه‌های آنلاین در مناسبت‌های خاص برای کالاهای سوپرمارکتی و ...

پیشنهادهای پژوهش‌های آینده. پژوهش‌های آتی در مورد موضوع این تحقیق که می‌توان به آن‌ها اشاره کرد، شامل موارد زیر می‌باشند:

- مدل پیشنهادی در این مقاله، به صورت دوهدفه بررسی شد. در تحقیقات آینده می‌توان مسئله را با توابع هدف دیگری نظیر اهداف پایداری و یا تاب‌آوری نیز بررسی کرد.
- همچنین، می‌توان در گام بعدی، مدل را در ابعاد بزرگ‌تر با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری حل کرده و اعتبارسنجی نمود.
- به منظور نزدیک شدن بیشتر به دنیای واقعی، می‌توان از مطالعه موردی استفاده کرده و سطوح بیشتری از زنجیره تأمین را در نظر گرفت.

- استفاده از رویکردهای مسیریابی، به منظور تعیین مسیر کوتاه‌تر و کم‌هزینه‌تر برای ارسال و دریافت به‌موقع محصولات فسادپذیر، می‌تواند راهی برای توسعه مقاله حاضر باشد.
- در این تحقیق، محدودیت‌های مدل با استفاده از عدد بزرگ M تعریف شده‌اند که تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج بهینه‌سازی دارند. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده، مقادیر مختلف M مورد بررسی قرار گیرد تا تأثیر آن بر کیفیت نتایج تحلیل شود. همچنین، انجام تحلیل حساسیت بر روی M می‌تواند به شناسایی بهترین مقدار این پارامتر کمک کند و پایداری نتایج به دست آمده را ارزیابی نماید.

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 منافع ندارند.

منابع

1. Ahmadi Tootkaleh, E., Afshar Najafi, B., & Seifbarghi, M. (2024). Inventory Control of Perishable Products in a VMI System with the Ability of Replacing Unavailable Products: Stochastic Dynamic Programming Approach. *Journal of Industrial Management Perspective*, 14(2), 181-205, (In Persian).
2. Cheraghi, E., & Razmi, J. (2015). Modelling a Multi-Product P-hub Median Problem by Considering Methods of Finance. *Journal of Industrial Management Perspective*, 4(4), 55-74, (In Persian).
3. Arazmand, M., & Pishvae, M. S. (2018). Modeling multimodal network design problem under uncertainty conditions: A case study of cement transportation in Iran. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(3), 115-139, (In Persian).
4. Aghaei, J., Amjady, N., & Shayanfar, H. A. (2011). Multi-objective electricity market clearing considering dynamic security by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method. *Applied Soft Computing*, 11(4), 3846-3858.
5. Alumur, S. A., Yaman, H., & Kara, B. Y. (2012). Hierarchical multimodal hub location problem with time-definite deliveries. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(6), 1107-1120.
6. Amiri, Z. (2024). Multimodal uncapacitated hub location problems with multi-commodities: an application in Finland supply chain. [Master's thesis, Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT]. LUTPub
7. Arnold, P., Peeters, D., Thomas, I., & Marchand, H. (2001). Pour une localisation optimale des centres de transbordement intermodaux entre réseaux de transport: formulation et extensions. *Canadian Geographer/Le Géographe canadien*, 45(3), 427-436.
8. Ayough, A., Farhadi, F., Zandieh, M., & Rastkhadiv, P. (2021). Genetic algorithm for obstacle location-allocation problems with customer priorities. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 17(4), 1753.
9. Bayegan, B., Mehrabian, A., Attari, M. Y. N., DoostiDylami, M. J., & Katul, I. (2024). The Mathematical Model for Location-Routing Problem of Relief Logistics Considering the Types of People Under Conditions of Uncertainty. *Scientific Journal of Supply Chain Management*, 26(1).
10. Bayram, V., Aydoğan, Ç., & Kargar, K. (2025). Multi-period hub network design from a dual perspective: An integrated approach considering congestion, demand uncertainty, and service quality optimization. *European Journal of Operational Research*, 326(1).
11. Campbell, J. F. (1994). Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European journal of operational research*, 72(2), 387-405.
12. De Keizer, M., Akkerman, R., Grunow, M., Bloemhof, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. (2017). Logistics network design for perishable products with heterogeneous quality decay. *European journal of operational research*, 262(2), 535-549.
13. Esmizadeh, Y., & Bashiri, M. (2014). Applying hierarchical hub location problem on perishable good distribution systems. In *Joint International Symposium on The Social Impacts of Developments in Information, Manufacturing and Service Systems, Istanbul, Turkey* (pp. 260-269).
13. Fotuhi, F., & Huynh, N. (2017). Reliable intermodal freight network expansion with demand uncertainties and network disruptions. *Networks and Spatial Economics*, 17(2), 405-433.
14. Fotuhi, F., & Huynh, N. (2018). A reliable multi-period intermodal freight network expansion problem. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 138-150.

15. Hiassat, A., Diabat, A., & Rahwan, I. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. *Journal of manufacturing systems*, 42, 93-103.
16. Karimi, B., & Bashiri, M. (2018). Multi-commodity multimodal splittable logistics hub location problem with stochastic demands.
17. Khaleghi, A. (2026). Sustainable dynamic hub network design considering ramp-type time-dependent demand for perishable seasonal products. *Process Integration and Optimization for Sustainability*.
18. Li, S., Han, W., & Liu, L. (2022). Robust optimization of the hub location problem for fresh agricultural products with uncertain demand. *IEEE Access*, 10, 41902-41913.
19. Li, S. X., Sun, S. F., Wang, Y. Q., Wu, Y. F., & Liu, L. P. (2017). A two-stage stochastic programming model for rail-truck intermodal network design with uncertain customer demand. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 20(3), 611-621.
20. Mohammadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Siadat, A., & Rahimi, Y. (2016). A game-based meta-heuristic for a fuzzy bi-objective reliable hub location problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 50, 1-19.
21. Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.
22. Musavi, M., & Bozorgi-Amiri, A. (2017). A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 766-778.
23. Osorio-Mora, A., Núñez-Cerda, F., Gatica, G., & Linfati, R. (2020). Multimodal capacitated hub location problems with multi-commodities: an application in freight transport. *Journal of Advanced Transportation*, 2020(1), 2431763.
24. Pourghader Chobar, A., Adibi, M. A., & Kazemi, A. (2021). A novel multi-objective model for hub location problem considering dynamic demand and environmental issues. *Journal of industrial engineering and management studies*, 8(1), 1-31.
25. Savadkoobi, E., Mousazadeh, M., & Torabi, S. A. (2018). A possibilistic location-inventory model for multi-period perishable pharmaceutical supply chain network design. *Chemical engineering research and design*, 138, 490-505.
26. Wang, R., Yang, K., Yang, L., & Gao, Z. (2018). Modeling and optimization of a road-rail intermodal transport system under uncertain information. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 72, 423-436.
27. Zhang, D., Zou, F., Li, S., & Zhou, L. (2017). Green supply chain network design with economies of scale and environmental concerns. *Journal of Advanced Transportation*, 2017(1), 6350562.