



## The Location-allocating Hub Problem with Direct Transportation Capability Considering Congestion and Tardiness Time in Hubs

**Pardis Roozkhosh** 

Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Faculty of Economics and Administrative sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: pardis.roozkhosh@mail.um.ac.ir

**Nasser Motahari Farimani\*** 

\*Corresponding Author, Associate Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Economics and Administrative sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: n.motahari@um.ac.ir

### Abstract

**Objective:** This paper seeks to find the optimal number of hubs and their location to keep the preparation time and congestion in the hubs and costs at a minimum. Also, this study considers the tardiness time for the conditions that the customer's need is not answered in the specified time, which can help to make the problem conditions more realistic. Therefore, in this study, the scheduled time and the real-time system are considered. This paper considers the tardiness and congestion time for hub optimization problems with single, multiple, and multiple direct transport allocations. The decision variables in this model determine the number of hubs, the capacity of the hubs, and their location. Congestion and tardiness also affect service time, especially if the capacity and cost of hubs are limited.

**Methods:** This paper uses a mathematical model to solve the hub problem of optimizing the allocation – location of single, multiple, and multiple with direct transportation. GAMS software is used to find the optimal number of hubs and locations as two objective functions are optimized. The first objective function includes transportation costs, hub setup, and tardiness costs, and the second one consists of the handling time in the hubs and the congestion inside the hubs. The sensitive analysis is investigated for the service time based on the congestion and tardiness time.

**Results:** This model is tested on AP (Australian Post) data for single, multiple, and multiple with direct shipping allocation models. This study also solves the exact model for 100 nodes allocated to all three models. The hubs' capacity, congestion, and tardiness determine the number of hubs. In this paper, hubs are considered small, medium, and large. Congestion levels are also considered changeable. In addition, a comparison is made between single and multiple allocations concerning cost and capacity limitation to investigate service time. The findings indicate that a hub with limited cost and capacity

needs more service time. The lexicography method is also used to convert objective functions into one function.

**Conclusion:** The more the number of hubs increases, the total costs, including the transportation and hub establishment costs will also increase. Therefore, considering the transportation costs and the establishment of the hub, it can be said that single and multiple allocations can be used in some situations. However, multiple allocations with direct transport have the lowest transportation costs because goods based on the costs are transported through the non-hub and hub nodes. In general, the results indicate that using the multiple allocation model with direct transport can reduce the total transport cost, and a single allocation has the highest transport costs. This paper is helpful for managers and business owners who first want to identify points for building their product or service warehouse. Secondly, they want to have the most optimal type of allocation for transportation from different cities.

**Keywords:** Allocation, Location, Tardiness time, Congestion, Handling time, Hub.

**Citation:** Roozkhosh, Pardis & Motahari Farimani, Nasser (2023). The Location-allocating Hub Problem with Direct Transportation Capability Considering Congestion and Tardiness Time in Hubs. *Industrial Management Journal*, 15(1), 150-179. (in Persian)

---

Industrial Management Journal, 2023, Vol. 15, No 1, pp.150-179

Published by University of Tehran, Faculty of Management

<https://doi.org/10.22059/IMJ.2022.343575.1007947>

Article Type: Research Paper

© Authors

Received: May 24, 2022

Received in revised form: October 15, 2022

Accepted: December 07, 2022

Published online: April 19, 2023



پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی

## مسئله مکان‌یابی و تخصیص هاب با قابلیت حمل و نقل مستقیم با در نظر گرفتن تراکم و دیرکرد در هاب

پردیس روزخوش

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: pardis.roozkhosh@mail.um.ac.ir

ناصر مطهری فریمانی\*

\* نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: n.motahari@um.ac.ir

### چکیده

**هدف:** این مقاله به دنبال یافتن تعداد بهینه هاب‌ها و مکان‌یابی آن‌هاست؛ به طوری که بتواند زمان آماده‌سازی و تراکم در هاب‌ها و هزینه‌ها را در حداقل مقدار خود نگه دارد. همچنین این مطالعه زمان دیرکرد را برای شرایطی در نظر می‌گیرد که نیاز مشتری در زمان تعیین شده پاسخ داده نشود که می‌تواند به واقعی‌تر شدن شرایط مسئله کمک کند. از آنجایی که افزایش تراکم، باعث می‌شود که کالاها دیر به دست متقاضی برسد، در این مقاله برای اولین بار، زمان دیرکرد و تراکم با هم، برای مسئله بهینه‌سازی هاب‌های چندگانه با حمل و نقل مستقیم حل شده و نتایج آن با تخصیص تکی و چندگانه مقایسه شده است.

**روش:** این مقاله با استفاده از مدل ریاضی، به حل مسئله بهینه‌سازی مکان‌یابی و تخصیص هاب می‌پردازد. نرم‌افزار گمز برای یافتن تعداد بهینه هاب‌ها و نیز مکان‌یابی به کار گرفته شده است. همچنین، از روش لکسیکوگراف برای تبدیل توابع هدف به یک تابع هدف استفاده شده است.

**یافته‌ها:** این مدل روی داده‌های پُست استرالیا، برای سه مدل تخصیص آزمون شد. سه حالت تخصیص با یکدیگر از نظر هزینه و زمان مقایسه شدند. به علاوه، مدل پیشنهادی این پژوهش توانست مسئله را برای ۱۰۰ گره در هر سه مدل تخصیص به‌طور دقیق حل کند. همچنین تعداد هاب‌ها با توجه به ظرفیت و تراکم هاب‌ها و زمان دیرکرد مشخص شد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج حاکی از آن است که استفاده از مدل تخصیص چندگانه با حمل و نقل مستقیم، قادر است هزینه‌های کل حمل و نقل و زمان آماده‌سازی را کاهش دهد و بیشترین هزینه و زمان حمل و نقل را تخصیص تکی تحمیل می‌کند.

**کلیدواژه‌ها:** تخصیص، مکان‌یابی، زمان دیرکرد، تراکم، زمان آماده‌سازی، هاب.

**استناد:** روزخوش، پردیس و مطهری فریمانی، ناصر (۱۴۰۲). مسئله مکان‌یابی و تخصیص هاب با قابلیت حمل و نقل مستقیم با در نظر گرفتن تراکم و دیرکرد در هاب. *مدیریت صنعتی*، ۱۵(۱)، ۱۵۰-۱۷۹.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۳۰

doi: <https://doi.org/10.22059/IMJ.2022.343575.1007947>

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۲، دوره ۱۵، شماره ۱، صص. ۱۵۰-۱۷۹

ناشر: دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

نوع مقاله: علمی پژوهشی

© نویسندگان

## مقدمه

برنامه‌ریزی حمل‌ونقل به بررسی تقاضا برای ترافیک و میزان رشد ترافیک می‌پردازد تا با استفاده از آن در مورد راهبرد امکانات حمل‌ونقل موجود یا امکانات جدید، مانند شبکه راه‌ها، ریل، فرودگاه‌ها و غیره تصمیم‌گیری شود. دستیابی به سطح سرویس بهتر، بهبود ایمنی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، رشد اقتصادی و افزایش دسترسی، اهداف نهایی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل است. تأثیر چنین ویژگی‌ای سبب شده است تا نگرش‌های گذشته در خصوص حمل‌ونقل تغییر یابد و به حمل‌ونقل به‌عنوان یک بخش اقتصادی - خدماتی مهم نگریسته شود (بهرامی، صفری، توکلی مقدم و یزدی، ۱۳۹۶؛ گرابر و هول<sup>۱</sup>، ۲۰۰۲). رشد تجارت الکترونیکی و افزایش تعداد بسته‌ها باعث افزایش حجم ترافیک می‌شود (دی‌ام‌ا<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸؛ دمیر، کیراز و ارگین<sup>۳</sup>، ۲۰۲۲). به‌طور خلاصه، این روند به افزایش ازدحام، سروصدا و آلودگی، به‌ویژه در مناطق شهری منجر می‌شود که بر افراد ساکن در آنجا و همچنین آب و هوا تأثیر منفی دارد. هاب‌های شهری یکی از راه‌های کاهش این مسئله است که با دریافت کالاها از عرضه‌کننده‌های مختلف به هاب و همکاری در تحویل به‌موقع، باعث بهبود حمل‌ونقل می‌شوند (آندرو، همبر و رودریگر<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰). مدل‌های مکان‌یابی هاب در مورد مکان‌های مشترک و تصمیم‌گیری‌های مسیریابی در سیستم‌های شبکه صحبت می‌کنند. تصمیم‌گیری‌های مکانی بر انتخاب گره‌های مناسب برای هاب شدن متمرکز است، در حالی که مسیریابی بر یافتن مسیری که بتواند تقاضای موجود بین جفت گره‌ها را از طریق هاب‌های انتخاب شده، انجام دهد استوار است (فرناندز و سگالمبرو<sup>۵</sup>، ۲۰۲۰؛ مهرگان، جعفرنژاد و محمدی، ۱۳۹۷). ایده شبکه‌های مراکز فعالیت را گلدمن<sup>۶</sup>، در سال ۱۹۶۹ مطرح کرد. برای اولین بار، اوکلی در سال ۱۹۹۲ مقدار هزینه ثابت را به‌عنوان هزینه ایجاد هاب در تابع هدف مدل به‌کار برد. در این مدل، تعداد هاب به‌جای اینکه از قبل به‌صورت ثابت فرض شود، به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، تعداد هاب به‌جای اینکه از قبل به‌صورت ثابت فرض شود، به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود (اوکلی<sup>۷</sup>، ۱۹۹۲). اولین نسل از تحقیقات مکان‌یابی مراکز واسطه، تحقیقات کمبل<sup>۸</sup> (۱۹۹۴) و میلر و اوکلی<sup>۹</sup> (۱۹۹۴) بود که در تفهیم سیستم‌های واسطه‌ای پیشرفت زیادی داشتند و مدل‌های پایه‌ای با تمرکز عمده بر کمینه‌کردن هزینه جریان و هزینه ثابت تسهیلات را توسعه دادند (میلر و اوکلی، ۱۹۹۴؛ کمبل، ۱۹۹۴؛ ارنست و کریشنامورتی<sup>۱۰</sup>، ۲۰۰۲). فرمول‌بندی سه‌ن و پارک<sup>۱۱</sup> (۱۹۹۸) برای حالتی که واحد هزینه جریان متقارن و متناسب با فاصله است، کاهش بیشتری در تعداد متغیرها و محدودیت‌ها ایجاد کرد. ابری<sup>۱۲</sup> (۲۰۰۱)، فرمول‌بندی دیگری برای مسئله تخصیص تکی  $p$ -میان‌ه ارائه داد که به  $O(n^2)$  متغیر و

1. Garber & Hoel
2. DMO
3. Demir, Kiraz, & Ergin
4. Anderluh, Hemmelmayr, & Rüdiger
5. Fernández & Sgalambro
6. Goldman
7. O'Kelly
8. Campbell
9. Miller & O'Kelly
10. Campbell, Ernst, & Krishnamoorthy
11. Sohn & Park
12. Ebery

$O(n^2)$  محدودیت نیاز دارد. این فرمول‌بندی نسبت به تمام مدل‌های دیگر قبلی ارائه‌شده در ادبیات، از متغیرهای کمتری استفاده می‌کند. اگرچه در عمل، زمان محاسباتی مورد نیاز برای حل این فرمول‌بندی جدید، بزرگ‌تر از زمان مورد نیاز برای حل فرمول‌بندی ارنست و کریشنامورتی<sup>۱</sup> (۱۹۹۶) است (آلومر و کایا<sup>۲</sup>، ۲۰۰۸). نیکل و اسکوبل<sup>۳</sup> (۲۰۰۱)، مسائل مکان‌یابی مراکز واسطه در شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی شهری را بررسی کردند. در این مورد، غیرواقعی است که فرض کنیم تمام مراکز واسطه به‌طور مستقیم به هم متصل‌اند یا اینکه هزینه‌ها متناسب با فاصله‌های اقلیدسی هستند و بنابراین نامساوی مثلی را برآورده می‌کنند. کانتراس، فرناندز و مارین<sup>۴</sup> (۲۰۰۹)، مسئله مورد بررسی مربوط به طراحی شبکه مسیره‌های قطار پرسرعت اسپانیا به‌صورت یک درخت است؛ به نحوی که هر شهر با جمعیت بیش از ۱۰,۰۰۰ نفر در فاصله حداکثر ۵۰ کیلومتری یکی از ایستگاه‌های قطار باشد. در سال ۱۹۹۹، کارا<sup>۵</sup> نشان داد که مسئله  $p$ -میان‌ه NP-Hard است. به‌علاوه حتی اگر مکان مراکز واسطه ثابت باشد قسمت تخصیص<sup>۶</sup> مسئله NP-Hard باقی می‌ماند. کاربرد شبکه‌های پستی توسط ارنست و کریشنامورتی<sup>۷</sup> (۱۹۹۶ و ۱۹۹۹)، بررسی شد که بر اساس سیستم تحویل مرسولات شهرهای بزرگ استرالیا بود. مدل متفاوت دیگری از مکان‌یابی مراکز فعالیت برای شبکه‌های پستی توسط دونالدسون، جوهادسون، رادلیف و ژنگ<sup>۸</sup> (۱۹۹۹) بررسی شده است که مدل برنامه‌ریزی عدد صحیحی را با امکان مسیره‌های جریان‌ها با حداقل یک مرکز واسطه ارائه داده و از مدل برای ارزیابی مکان‌یابی مراکز مرتب‌سازی و انبار بین راهی (مراکز واسطه) در توزیع پست در آمریکا استفاده کردند. مدل آن‌ها شامل محدودیت‌های زمانی و امکان ارتباط مستقیم بین مبدأ / مقصدها بود (کمبل، ارنست و کریشموراتی<sup>۹</sup>، ۲۰۰۲).

در مطالعات پیشین، زمان‌های در نظر گرفته شده برای مسائل مکان‌یابی و تخصیص هاب‌ها غالباً به‌صورت زمان‌های برنامه‌ای یا پیش‌بینی شده هستند (در این مقاله زمان برنامه‌ای با عنوان زمان سرویس بیان شده است)، بدین معنی که کل زمان در دسترس، از پیش برنامه‌ریزی شده و نمی‌توان از مقدار در نظر گرفته شده تجاوز کرد. در صورتی که کل زمان مورد نیاز برای برآوردن تقاضای مشتری طولانی‌تر از مدت زمان برنامه‌ای باشد، زمان برنامه‌ای پاسخ‌گوی این شرایط نیست، از این رو با وارد کردن زمان دیرکرد به مدل، می‌توان به بهبود مدل‌های مکان‌یابی هاب کمک کرد. از سوی دیگر، به‌کارگیری هم‌زمان زمان تأخیر در هاب‌ها که به‌دلیل تراکم درون‌هایی اتفاق می‌افتد، به همراه زمان دیرکرد علاوه‌بر دیگر زمان‌های در نظر گرفته شده در مطالعات پیشین (هف، پیر، هریر و متی<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۷؛ حسن‌زاده، بشیری و امیری<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۸؛ آلومر، نیکل، ردنبرک و سالدانها<sup>۱۲</sup>، ۲۰۱۸؛ مراکه و یامان<sup>۱۳</sup>، ۲۰۱۷) می‌تواند به واقعی‌تر شدن فضای

1. Ernst and Krishnamoorthy
2. Alumur & Kara
3. Nickel and schobel
4. Contreras, Fernandez, & Marin
5. Kara
6. Allocation
7. Ernst and Krishnamoorthy
8. Donaldson, Johnson, Ratliff, & Zhang,
9. Campbell, Ernst, & Krishnamoorthy
10. Hoff, Peir ó, Corber á n, & Mart í
11. Hasanzadeh, Bashiri, & Amiri
12. Alumur, Nickel, Rohrbeck, & Saldanha-da-Gama
13. Meraklı & Yaman

مسئله کمک کند. در این پژوهش با به کارگیری زمان تأخیر ناشی از تراکم به همراه زمان دیرکرد برای مدل تخصیص تکی، چندگانه و چندگانه با حمل مستقیم، ابتدا با هدف حداقل کردن هزینه‌های حمل‌ونقل، تأسیس هاب‌ها و هزینه‌های دیرکرد مسئله مدل شده و جواب به دست آمده، به عنوان یک مقدار عملی برای کل هزینه‌ها محسوب می‌شود؛ سپس مسئله با تابع هدف جدید حداقل سازی زمان‌های آماده‌سازی و سطح تراکم هاب‌ها و افزودن تابع هدف قبلی به عنوان محدودیت به مدل جدید حل می‌شود. مدل کردن مسئله در نرم‌افزار GAMS باعث حل قطعی آن برای ۱۰۰ گره شده است که این موضوع نیز باعث برتری مدل نسبت به مطالعات پیشین آلومر و همکاران (۲۰۱۸) شده است. در ادامه پیشینه پژوهش، مدل ریاضی، نتایج حاصل از مدل و در نهایت جمع‌بندی ارائه می‌شود.

### پیشینه پژوهش

در مسائلی که تعداد زیادی از نقاط عرضه و تقاضا وجود دارد، به منظور اقتصادی‌تر نمودن فرایند حمل‌ونقل و کم کردن تعداد حمل‌ونقل‌ها مفهوم گره‌های هاب مطرح می‌شود (ابراهیمی، مهرجردی، حسینی نصب و زحمتکش<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵). مسئله مکان‌یابی هاب، کاربردهای گوناگونی در زمینه‌های مختلف داشته است، از جمله: حمل‌ونقل زمینی بار (کانه‌ها و سیلو)، حمل‌ونقل هوایی مسافر، حمل‌ونقل هوایی بار، حمل‌ونقل ریلی و سرویس‌های پستی (ارنست و کریشنامورتی، ۱۹۹۹)، شبکه‌های ارتباطی و سرویس‌های اورژانسی. اگر نیاز باشد هر گره غیرهاب فقط به یک گره هابی متصل باشد، از تخصیص تکی و در صورتی که امکان تخصیص هر گره غیرهاب به بیش از یک هاب وجود داشته باشد، مسئله از نوع چندگانه است. براساس تحقیقات گذشته مدل مکان‌یابی و تخصیص هاب به دو دسته مدل‌های تخصیص تکی و چندگانه تقسیم شده است.

### مدل تخصیص تکی

اولین مدل ریاضی برای مسئله مکان‌یابی تک تخصیص بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت توسط اوکلی<sup>۲</sup> در شبکه حمل‌ونقل هوایی آمریکا ارائه شد (اوکلی، ۱۹۸۷). فرمول‌بندی اوکلی به مسئله تخصیص تکی  $p$ -میان<sup>۳</sup> اشاره دارد. در سال ۱۹۹۶، اسکورین<sup>۴</sup> و اوکلی یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته برای مسئله تک تخصیص مکان‌یابی میان با  $p$  هاب بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت ارائه کردند. همچنین در سال ۱۹۹۶، ارنست و کریشنامورتی یک مدل ریاضی برای مسئله تک تخصیص مکان‌یابی با  $p$  تعداد هاب معرفی کردند که در مقایسه با مدل‌های قبلی، تعداد متغیر و محدودیت کمتری داشت.

در سال ۲۰۰۱، ابری یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته جدید برای مسئله تک تخصیص مکان‌یابی میان با  $p$  تعداد هاب بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت ارائه کرد که اولین مدلی بود که برای این نوع مدل ارائه شده بود. وی نشان داد که مدل از لحاظ زمان حل کامپیوتری بسیار کاراست و توانایی حل مسائل با اندازه بالا را دارد. سیلوا و

1. Ebrahimi, Hossini-Nasab, mehrjerdi, & Zahmatkesh  
2. O'Kelly  
3. P-median  
4. Skorin-Kapov

همکاران در سال ۲۰۰۹ سه نوع روش ابتکاری برای حل مسئله هاب با تخصیص تکی و بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت را معرفی کردند و کارایی این روش‌ها را در مورد مسائل بزرگ سنجیدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده دستیابی به جواب بهینه در زمان بسیار کوتاه‌تر بود، که امکان حل مسائل در اندازه‌های بالا را در زمان کم فراهم کرد. ایلچ، یروسویک، برمبرگ و ملدنوسویک<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۰ یک روش فرا ابتکاری جست‌وجوی همسایگی برای حل مسئله یاد شده معرفی کردند. آن‌ها با هدف مکان‌یابی بهینه مراکز با کمترین هزینه جریان مواد بین همه مراکز تقاضای مبدأ و مقصد روش حل کارایی را از نظر کیفیت جواب‌ها و زمان حل ارائه کردند. پکر، کارا، کمبل و آلومر<sup>۲</sup> (۲۰۱۶) به شناسایی ویژگی‌های کلی مکان‌یابی بهینه هاب برای تخصیص تکی براساس داده‌های اساسی مسئله پرداختند. رستمی، کمرلینگ، بوچیم و کلوسن<sup>۳</sup> (۲۰۱۸)، مسئله مکان‌یابی هاب تخصیص تکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا را ارائه و از رویکرد شاخه و برش استفاده کردند. اسماعیلی و سیدزاده<sup>۴</sup> (۲۰۲۰)، یک مسئله قیمت و مکان‌یابی هاب ترکیبی در یک شبکه را ارائه دادند.

### مدل تخصیص چندگانه

اولین مدل ریاضی خطی عدد صحیح برای مسئله چند تخصیصی مکان‌یابی میانه با  $P$  تعداد هاب توسط کمپل در سال ۱۹۹۲ ارائه شد. همچنین او در سال ۱۹۹۴ برای مسائل مکان‌یابی میانه با  $P$  تعداد هاب بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت نیز مدل ریاضی معرفی کرد. لوزکین، کرسیلنیکو و بور<sup>۵</sup> (۲۰۱۹)، یک مسئله بهینه‌سازی تصادفی غیرخطی برای حداقل کردن هزینه‌های تأسیس و حمل‌ونقل هاب با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و بدون محدودیت ظرفیت برای مدل تخصیص چندگانه ارائه کردند. مونمی، گلاره، نقیح و جوسین<sup>۶</sup> (۲۰۲۰)، به توزیع فاصله‌های نامتوازن جریان سطح هاب در ساختار شبکه هاب و اسپوک<sup>۷</sup> مدل‌های هاب میانه پرداختند.

گلو، سرارسلن و تپکو<sup>۸</sup> (۲۰۱۸) نیز، به مسئله مکان‌یابی هاب پرداختند، آن‌ها با استفاده از الگوریتم اذرحام ذرات (PSO) ظرفیت‌های هاب‌ها را محاسبه و از مجموعه داده‌های (AP)<sup>۹</sup> استفاده کردند.

وقتی تعداد هاب در شبکه به صورت ثابت فرض نشود، برای معرفی انواع دیگری از مسائل تک تخصیصی و چند تخصیصی مکان‌یابی هاب، مفهوم ظرفیت در سیستم به کار برده می‌شود. اولین مدل ریاضی مسائل تک تخصیصی و چند تخصیصی مکان‌یابی هاب با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت و بدون در نظر گرفتن آن توسط کمپل در سال ۱۹۹۴ مطرح شده است. با توجه به اینکه محاسبه راه‌حل‌های دقیق این مسئله‌های مکان‌یابی هاب معمولاً NP-hard است، نیاز به توسعه الگوریتم‌های مقیاس‌پذیر برای این مسائل وجود دارد. وندلتا و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۲۰) یک پیشنهاد جدید در مورد

1. Ilić, Urošević, Brimberg, & Mladenović
2. Paker, Kara, Campbell, & Alumur
3. Rostami, Kämmerling, Buchheim, & Clausen
4. Esmaeili & Sedehzade
5. Lozkins, Krasilnikov, & Bure
6. Monemi, Gelareh, Nagih, & Jones
7. Hub and Spoke
8. glua, Serarlanb, & Topcu
9. Australia Post
10. Wandelta et al.

سرعت بخشیدن به تکنیک‌های استاندارد راه‌حل به اختصار (EHLC) که از شباهت‌های ساختاری بین شبکه‌های اصلی و شبکه‌های فرعی/متراکم استفاده می‌کند، پیشنهاد دادند. مطالعات پیشین صورت گرفته در حوزه حمل‌ونقل با تخصیص تکی و چندگانه بیشتر به مسئله تقاضا و عدم قطعیت در آن پرداخته‌اند. اگر چه برخی مطالعات مانند آلومر و همکاران (۲۰۱۸)، روزخوش و مطهری<sup>۱</sup> (۲۰۲۲) و کاظمی، زنجیرانی و اسماعیلیان (۱۴۰۱) زمان‌های آماده‌سازی و تراکم ناشی از هاب را در نظر گرفته‌اند؛ اما این زمان، یک زمان برنامه‌ای است که فقط مدت زمان از پیش تعیین شده را مشخص می‌کند.

به‌طور کلی، در سال‌های اخیر مطالعات زیادی صورت گرفته است که به مسئله مکان‌یابی و تخصیص هاب برای تخصیص تکی یا چندگانه با در نظر گرفتن تراکم یا ظرفیت در سال‌های اخیر پرداخته‌اند؛ اما آن‌ها مسئله تخصیص هاب چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم را مورد بررسی قرار نداده‌اند. برای مثال می‌توان به پژوهش‌های غفاری نسب و مطلب‌زاده<sup>۲</sup> (۲۰۲۱)، هو، وانگ و لی<sup>۳</sup> (۲۰۲۱)، وو و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۲۲) اشاره کرد. همچنین اگرچه مسئله مکان‌یابی و تخصیص هاب با در نظر گرفتن زمان دیرکرد در هاب برای تخصیص تکی و چندگانه در مطالعه روزخوش و مطهری (۲۰۲۲)، صورت گرفته است؛ اما همان‌طور که آلومر و همکاران (۲۰۱۸)، نشان دادند تخصیص چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم دارای کمترین هزینه حمل‌ونقل است. پس اگر این مسئله با در نظر گرفتن زمان دیرکرد و تراکم برای مسئله تخصیص چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم در نظر گرفته شود می‌تواند بهینه‌ترین حالت ممکن برای این دسته از مسائل باشد. همچنین به دلیل اینکه مسئله مکان‌یابی و تخصیص تکی، چندگانه، چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم اخیراً با زمان تراکم مورد بررسی قرار گرفته است، در رابطه با زمان دیرکرد و تراکم با یکدیگر برای تخصیص چندگانه هنوز مطالعه‌ای صورت نگرفته است و از آنجایی که این نوع تخصیص برای هاب دارای کمترین هزینه و زمان آماده‌سازی است، این پژوهش می‌تواند بسیار مفید واقع شود؛ زیرا نخست اینکه در نظر گرفتن زمان دیرکرد در رسیدن محموله به مقصد در مدل، باعث واقعی شدن مسئله می‌شود و دوم اینکه یکی از مهم‌ترین دلایلی که باعث ایجاد دیرکرد در هاب‌ها می‌شود، سطح تراکم و ظرفیت هر هاب است که باعث افزایش زمان سرویس می‌شود، پس در نظر گرفتن تراکم در هاب‌ها و زمان دیرکرد در کنار یکدیگر مفهوم مدل را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند. این پژوهش می‌تواند برای ایجاد هاب‌های جدید برای پخش کالاها و خدمات (هاب‌های لجستیکی) که زمان سرویس محدودی دارند و تجاوز از زمان قول داده شده به مشتری موجب هزینه برای آن‌ها می‌شود، مفید باشد. برای مثال کارخانه‌ای مانند (کارخانه‌های خودروسازی، پست، ساخت یا توزیع لوازم حساس پزشکی و...) که می‌خواهد چندین انبار پخش در شهرهای مختلف ایجاد کند، اول باید بداند در کدام شهرها انبار (هاب) خود را ایجاد کند که بیشترین پوشش و دسترسی را به سایر شهرها داشته باشد و دوم، ارتباطش با کارخانه و سایر هاب‌ها (شهرهایی که در آن‌ها انبار ساخته شده است) را به نحوی تنظیم کند که کمترین فاصله و هزینه حمل‌ونقل را داشته باشد. از طرفی زمانی که از کارخانه و یا انبار یک شهر (هاب) به هاب دیگر محموله منتقل می‌شود

1 Roozkhosh & Motahari

2. Ghaffarinasab, N., & Motallebzadeh

3. Hu, Hu, Wang & Li

4. Wu, Qureshi, & Yamada



ممکن است به دلیل شلوغی و ازدحام درون انبار، مدت زمانی طول بکشد تا کالاها جابه‌جا و تفکیک و آماده‌توزیع شوند. اگر این مدت بیشتر از زمان از قبل قول داده شده به مشتری طول بکشد، مقداری هزینه به‌عنوان دیرکرد به شرکت تحمیل می‌شود؛ به این معنا که تراکم درون انبار، می‌تواند عاملی برای زمان دیرکرد باشد. برخی از مطالعات اخیر در جدول ۱ عنوان شده و با پژوهش حاضر مقایسه شده‌اند تا جایگاه پژوهش مشخص شود.

جدول ۱. مقایسه پژوهش‌های انجام شده با پژوهش حاضر

مطالعه	ویژگی‌های مدل	نوع مدل	هدف مطالعه	نمونه موردی
آلومر و همکاران، ۲۰۱۸	در نظر گرفتن تراکم در هاب برای مدل تخصیص تکی، چندگانه، چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم	برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح مختلط	حداقل کردن زمان آماده‌سازی و تراکم در هاب	داده‌های پست استرالیا
غفاری نسب و مطلب زاده، ۲۰۲۱	در نظر گرفتن تراکم برای هاب میانه بدون ظرفیت	برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم، الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی شده تبرید	حداقل کردن هزینه‌ها	مثال عددی
هو و همکاران، ۲۰۲۱	مسئله مکان‌یابی و تخصیص هاب تکی با در نظر گرفتن ظرفیت و تراکم در هاب	برنامه‌ریزی تصادفی با محدودیت‌های شانس مشترک	حداقل کردن هزینه‌ها	داده‌های پست استرالیا
بایران، یلدیز و فرهام، ۲۰۲۲	در نظر گرفتن تراکم و ظرفیت برای مسئله مکان‌یابی و تخصیص هاب تکی	برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم اعداد صحیح مختلط مبتنی بر مسیر	حداقل کردن هزینه‌ها	شرکت ساختمانی و صنعتی
وو و همکاران، ۲۰۲۲	در نظر گرفتن ظرفیت هاب در مسئله تخصیص چندگانه	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	حداقل کردن هزینه‌ها	داده‌های پست استرالیا
روزخوش و مطهری، ۲۰۲۲	در نظر گرفتن ظرفیت و دیرکرد برای هاب در مسئله تخصیص تکی و چندگانه	برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط، الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات	حداقل کردن زمان آماده‌سازی و تراکم در هاب	داده‌های پست استرالیا
پژوهش حاضر	در نظر گرفتن ظرفیت، تراکم و دیرکرد برای هاب در مسئله‌های تخصیص تکی، چندگانه و چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	حداقل کردن زمان آماده‌سازی و تراکم در هاب	داده‌های پست استرالیا

## روش‌شناسی پژوهش

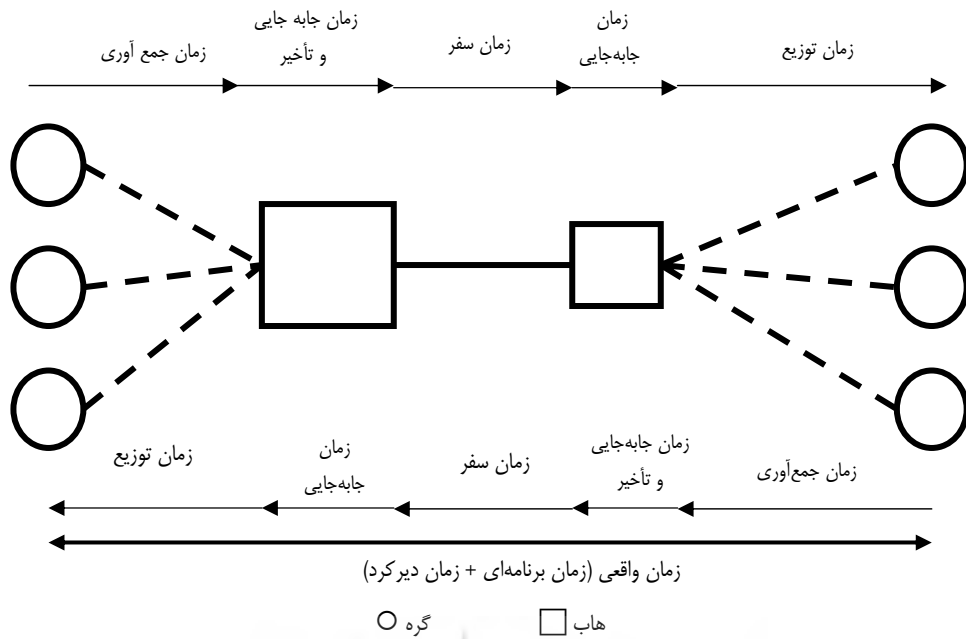
مدل‌های مکان‌یابی هاب، ابزارهای ارزشمندی برای تصمیم‌گیری در تعیین ضمانت زمان تحویل و همچنین تراکم در طراحی شبکه‌های تأمین هستند. به‌طور کلی مسائل مکان‌یابی هاب، به‌دنبال تعیین مکان هاب در شبکه حمل‌ونقل و حداقل کردن هزینه، زمان یا تراکم هستند. منظور از زمان، تقریباً همواره زمان آماده‌سازی است. همچنین هزینه‌هایی که

معمولاً حداقل کردن آن‌ها مدنظر قرار می‌گیرند. هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه نصب و راه‌اندازی هاب و سایر هزینه‌های ثابت است. هزینه کل، معمولاً به تعداد هاب و ظرفیت آن‌ها بستگی دارد. به‌طور کلی، تعداد هاب‌ها با افزایش زمان سرویس کاهش می‌یابد؛ از این رو محدوده زمان سرویس در این گونه مسائل موضوع کلیدی است. مسائل مکان‌یابی هاب از این بابت که هر گره بتواند کالاها را به یک یا چند هاب عرضه کند، به دو دسته مسئله تخصیص تکی و مسئله تخصیص چندگانه تقسیم می‌شود. در تخصیص تکی، هر گره فقط می‌تواند کالاها را به یک هاب عرضه کند؛ در حالی که در تخصیص چندگانه می‌تواند کالاها را به بیش از یک هاب عرضه نماید (آلومر و همکاران، ۲۰۱۸).

معمولاً محدودیت زمان سرویس با در نظر گرفتن زمان سفر بر روی شبکه و همچنین زمان جابه‌جایی و تأخیر در هاب‌ها مدل می‌شود؛ یعنی زمان سرویس را مجموع این سه زمان تعریف می‌کنند. موضوع تراکم هاب از این جهت مطرح است که سبب افزایش تأخیر در خدمات و جابه‌جایی‌های درون هاب می‌شود و در عمل ممکن است سبب شود که زمان سرویس از محدوده مجاز خود خارج گردد که باعث ایجاد زمان دیرکرد می‌شود. در واقع زمان سرویس زمان برنامه‌ای انجام عملیات حمل‌ونقل است که زمان آن از قبل برنامه‌ریزی شده است. زمان واقعی زمانی است که بیشتر از زمان برنامه‌ریزی شده در عمل تحقق پیدا کرده که ممکن است از زمان برنامه‌ای بیشتر طول کشیده باشد تا محموله به‌دست‌گرفته تقاضا دهنده برسد. پس زمان دیرکرد اختلاف بین زمان واقعی و برنامه‌ریزی شده است (زمان برنامه‌ای منهای زمان واقعی برابر است با زمان دیرکرد). در ادامه، مدل‌های ریاضی برای تخصیص تکی، چندگانه و چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم توضیح داده می‌شود؛ به‌طوری که در این سه مدل دو هدف دارد؛ یکی حداقل کردن کل هزینه حمل‌ونقل و دومی، حداقل کردن زمان‌های آماده‌سازی و تراکم در هاب‌ها که از طریق روش لکسیکوگراف حل می‌گردد (مطهری، قنبرزاده و مدرس<sup>۱</sup>، ۲۰۲۲؛ مدرس، مطهری و امروزی<sup>۲</sup>، ۲۰۲۳ الف).

ابتدا مسئله با تابع هدف اول (هزینه‌های حمل‌ونقل) حل شده و پس از آن، این تابع هدف به‌عنوان محدودیت به مدل اضافه و مسئله با تابع هدف دوم حل می‌شود (یافندگان، روزخوش، مدرس، روزخوش، ۲۰۲۳). برای نشان دادن دقیق‌تر این زمان‌ها شکل ۱ به‌کار گرفته شده که از یک تخصیص تکی جهت نمایش همه زمان‌های مورد نظر استفاده شده است. در این شکل، دایره‌ها گره‌های مبدأ - مقصد و مربع‌ها هاب‌ها را نشان می‌دهد.

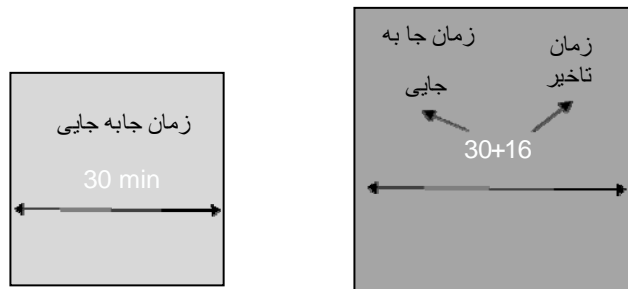
همچنین شکل ۲، دو هاب را نشان می‌دهد. رنگ کم‌رنگ نشان‌دهنده تراکم کمتر و رنگ تیره‌تر نشان‌دهنده تراکم بیشتر در هاب است. برای مثال، هاب کم‌رنگ به‌دلیل تراکم کمتر، مدت زمانی که طول می‌کشد تا محموله از هاب ارسال شود، ۳۰ دقیقه است؛ اما در هاب تیره‌تر، به‌دلیل وجود تراکم، ارسال محموله از هاب طول می‌کشد و ۴۶ دقیقه زمان می‌برد. در جدول ۲ تعریف دقیق عملیاتی هر یک از آن‌ها بیان شده است.



شکل ۱. کل زمان‌های در نظر گرفته شده بین جفت‌گره مبدأ - مقصد

جدول ۲. تعریف عملیاتی زمان‌ها

زمان	تعریف عملیاتی
زمان جمع‌آوری	مدت زمانی است که طول می‌کشد محموله از گره عرضه‌کننده به هاب اول برسد.
زمان تراکم (تأخیر)	زمان تأخیر به دلیل تراکم ناشی از ظرفیت هاب (زمان تراکم با توجه به ظرفیت هاب تغییر می‌کند) در هاب اول طول می‌کشد و زمان جابه‌جایی در هنگام دریافت و ارسال محموله را افزایش می‌دهد.
زمان جابه‌جایی	مدت زمانی که در هاب به دلیل مرتب‌سازی و بارگیری طول می‌کشد.
زمان سفر	زمان حمل‌ونقل بین دو هاب است.
زمان دیرکرد	مدت زمانی که بیشتر از کل زمان اعلام شده به گره تقاضا دهنده (زمان سرویس) طول می‌کشد (اختلاف بین زمان واقعی و برنامه‌ای).
زمان توزیع	مدت زمانی است که طول می‌کشد تا محموله از هاب آخر به دست گره تقاضا دهنده برسد.
زمان سرویس	کل زمان اعلامی به گره تقاضا دهنده که قرار است محموله از گره عرضه‌کننده به گره تقاضا دهنده برسد (زمان برنامه‌ای).



شکل ۲. زمان تأخیر ناشی از تراکم و زمان جابه‌جایی درون هاب

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده، در مربع سمت چپ تراکم درون هاب زیاد است؛ از این رو زمان تأخیر آن نیز نسبت به مربع سمت راست بیشتر است. برخی از پرسش‌های متداول در مسائل مکان‌یابی هاب را که در این مطالعه نیز مورد توجه قرار گرفته است، می‌توان این گونه جمع‌بندی کرد: کدام گره‌ها هاب باشند؟ اندازه هاب‌ها چقدر باشد؟ آیا در نظر گرفتن تراکم تأثیری روی کاهش یا افزایش هزینه‌ها دارد؟ آیا در نظر گرفتن زمان دیرکرد تأثیری روی انتخاب مسیر هاب دارد؟ با در نظر گرفتن مفروضات مدل، کدام تخصیص از تخصیص تکی گرفته تا چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم کمترین هزینه را دارد؟

مسائل مکان‌یابی هاب به دنبال این هستند که این سؤالات را به گونه‌ای پاسخ دهند که ضمن بهینه‌سازی تابع هدف که معمولاً از جنس هزینه است، محدودیت‌ها را نیز ارضا کنند. علاوه بر محدودیت خاصی که هر مسئله مکان‌یابی هاب به اقتضای شرایط می‌تواند داشته باشد، محدودیت‌هایی چون رعایت ظرفیت هاب، توجه به مسیرهای جریان در شبکه، رعایت محدوده مجاز زمان سرویس در تحویل بین هر جفت گره، تقریباً در زمره محدودیت‌هایی عام برای این مسائل تلقی می‌شوند. مفروضات معمول که در زمان برنامه‌ریزی برای این مسائل در نظر گرفته می‌شوند عبارت‌اند از:

۱. تقاضای ترافیک کاملاً متقابل وجود دارد؛ یعنی هر گره می‌تواند جریان را به گره‌های دیگر بفرستد یا از گره‌های دیگر جریان دریافت کند.
۲. اگر حمل‌ونقل مستقیم بین گره‌های غیرهابی مجاز باشد، هر حمل‌ونقل از طریق حداقل یک هاب انجام می‌شود.
۳. همه هاب‌ها به هم متصل هستند؛ یعنی شبکه هاب باید یک گراف کامل را ایجاد کند.
۴. هاب‌ها ظرفیت محدودی دارند. ظرفیت‌های تسهیلات هاب، جریان‌های درون شبکه را محدود می‌کنند. در حقیقت، جریان‌های ورودی و خروجی برای هر هاب باید کوچک‌تر یا مساوی ظرفیت آن هاب باشد. فرض می‌شود این ظرفیت به میزان ورود جریان غیرپردازش شده در هاب‌ها اشاره دارد.
۵. محدودیت زمان سرویس برای ارسال بین جفت گره‌ها وجود دارد؛ یعنی هر جفت گره مبدأ (مقصد) باید در این محدوده زمانی محدود، خدمات خود را دریافت کنند.
۶. فقط یک محدودیت زمانی برای کل شبکه وجود دارد.
۷. زمان سرویس‌دهی بین دو گره با در نظر گرفتن زمان سفر در شبکه و همچنین زمان جابه‌جایی در هاب‌ها محاسبه می‌شود؛ یعنی کل زمانی که طول می‌کشد تا یک گره جریان خود را دریافت کند، از مجموع زمانی که طول می‌کشد تا یک هاب جریان را از گره‌ها دریافت کند، آن را در هاب جابه‌جا و آماده ارسال کند، به هاب و یا گره مقصد بفرستد یا از هاب مقصد به گره مورد نظر فرستاده شود، محاسبه می‌شود.
۸. زمان جابه‌جایی در هاب به ظرفیت و سطح تراکم هاب بستگی دارد.
۹. سطح تراکم از یک هاب، بستگی به درصد استفاده از ظرفیت آن دارد؛ یعنی مثلاً اگر یک هاب ۹۰ درصد ظرفیتش پر باشد، آنگاه سطح تراکم (ازدحام) نسبت به زمانی که ظرفیتش ۵۰ درصد پر است بیشتر خواهد بود.
۱۰. سطوح تراکم گسسته‌اند و به صورت یک طیف پیوسته تعریف نشده است.

مدل تخصیص تکی، چندگانه و چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم با در نظر گرفتن مفروضات بالا مدل‌سازی می‌شوند. به‌طوری که مدل برای سه سطح ظرفیت (بزرگ، متوسط و کوچک) که بسته به میزان پر بودن هر یک از هاب‌ها زمان تأخیر ناشی از تراکم تغییر می‌کند و با به‌کارگیری زمان دیرکرد همراه است، نوشته شده است. نمادها، پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در مدل در جدول ۳ معرفی شده‌اند.

جدول ۳. معرفی نمادها و متغیرهای مدل

نوع	نماد	شرح
مجموعه‌ها	$n \in N$	مجموعه گره‌ها
	$c \in C$	مجموعه واحدهای در دسترس برای هاب‌ها (هر یک ظرفیت مطمئن دارند)
	$g \in G$	مجموعه سطح تراکم در نظر گرفته شده در هاب‌ها
پارامترهای جریان	$o_i = \sum_j w_{ij}$	جریانی که از گره $i$ آغاز می‌شود.
	$w_{ij}$	جریان برای فرستادن از گره $i$ به گره $j$
	$D_i = \sum_j w_{ij}$	جریان به مقصد گره $j$
	$\Gamma^c$	ظرفیت هاب با ظرفیت سطح $c$
	$\gamma$	حد بالای استفاده از ظرفیت برای تراکم یک هاب در سطح $g$
پارامترهای هزینه	$f_k^c$	هزینه ثابت برای مکان‌یابی هاب با سطح ظرفیت $c$ در گره $k$
	$C_{ij}$	هزینه حمل‌ونقل بین گره $i$ و $j$
	$\alpha$	ضریب تخفیف برای اتصالات بین هابی <sup>۱</sup>
	$\chi$	ضریب مقیاس‌گذاری برای هزینه‌های جمع‌آوری <sup>۲</sup>
	$\delta$	ضریب مقیاس‌گذاری برای هزینه‌های توزیع <sup>۳</sup>
	$a_j$	هزینه دیرکرد تقاضای مشتری $j$ ام
پارامترهای زمان	$t_{ij}$	زمان سفر بین گره $i$ و $j$
	$\Delta^c$	زمان جابه‌جایی در یک هاب با سطح ظرفیت $c$
	$\tau_g$	فاکتور تراکم (تأخیر نسبی در زمان تعیین شده توسط سطح تراکم $g$ )
	$T$	محدودیت زمان سرویس
	$S_j$	مدت زمان رسیدن تقاضای $j$ ام دیرتر از زمان تحویل
متغیرهای تصمیم تخصیص تکی	$x_{ik} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	اگر گره $i$ به هاب $k$ تخصیص یابد یک در غیر این صورت صفر است.
	$y_{kl}^i$	مقدار جریان آغاز شده در گره $i$ که از هاب $k$ به $l$ مسیریابی می‌شود.
	$r_k$	زمان آماده‌سازی هاب $k$
	$z_k^{cg} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	اگر هاب با ظرفیت $c$ و سطح تراکم $g$ در $k$ مکان‌یابی شود، یک در غیر این صورت صفر می‌شود.

1. discount factor for inter-hub connections
2. scaling factor for collection costs
3. scaling factor for distribution costs

شرح	نماد	نوع
کسری از جریان که از گره $i$ به گره $j$ که از هاب $k$ به $l$ فرستاده می‌شود.	$y_{ij}^{kl}$	متغیرهای تصمیم تخصیص چندگانه
اگر هیچ ترافیکی از $i$ به $j$ از طریق هاب $k$ به $l$ مسیریابی نشده باشد، یک درغیر این صورت صفر می‌شود.	$\hat{y}_{ij}^{kl} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	
زمان جمع‌آوری در هاب $k$ با توجه به ترافیکی که قرار است به هاب $l$ ارسال شود.	$r_{kl}^{in}$	
زمان توزیع در هاب $l$ با توجه به جریان ورودی از هاب $k$ ، یعنی طولانی‌ترین زمان برای انتقال جریان به گره‌های غیرهابی تخصیص داده شده به هاب $l$ که از هاب $k$ وارد می‌شوند.	$r_{kl}^{out}$	
اگر همه تقاضا از گره $i$ به گره $j$ مستقیماً ارسال شود، یک است، درغیر این صورت صفر می‌شود.	$S_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	متغیرهای تصمیم تخصیص چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم

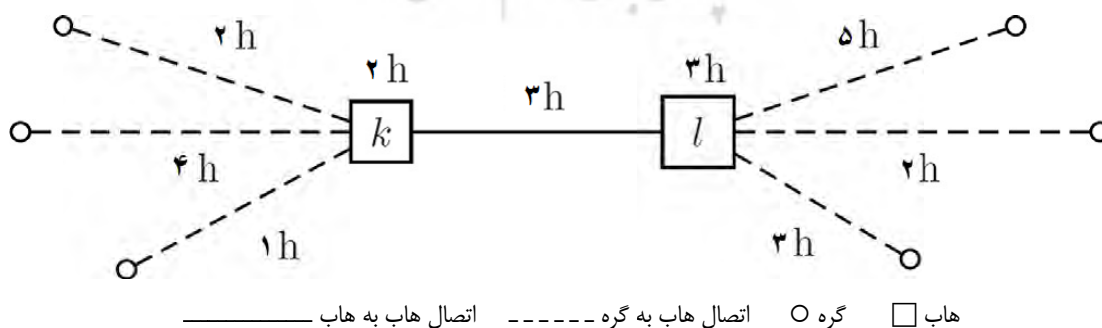
هر یک از پارامترهای زمانی مانند زمان جمع‌آوری، زمان توزیع، زمان‌های آماده‌سازی و... که در شکل ۱ نیز نشان داده شد.

### مسئله مکان‌یابی و تخصیص هاب تکی

همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، قرار است که مسئله مکان‌یابی هاب در سه مدل مختلف تخصیص تکی، چندگانه و چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم مورد بررسی قرار گیرد. از این رو، ابتدا مدل‌سازی تخصیص تکی طرح موضوع می‌گردد و سپس در ادامه به ساخت مدل تخصیص چندگانه وارد خواهیم شد.

هاب  $\square$     گره  $\circ$     اتصال هاب به گره -----    اتصال هاب به هاب —————

شکل ۱، مسئله تخصیص تکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است در این حالت، حمل‌ونقل برای عرضه کالاها از گره  $l$  به گره  $k$  باید از طریق هاب‌های  $k$  و  $l$  صورت بگیرد که برای هاب  $k$  و  $l$  ظرفیت خاصی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳. نمایش مسئله مکان‌یابی هاب در حالت تخصیص تکی

در مدل تخصیص تکی، دیرترین زمان جمع‌آوری در هاب مقصد به‌عنوان زمان آماده‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

برای هر هاب زمان جابه‌جایی کالاها محاسبه می‌شود یعنی هنگامی که جریان به هاب می‌رسد، این جریان باید در هاب با توجه به مقصد نهایی خود جابه‌جا و مرتب شده تا آماده بارگیری و انتقال شود. زمان تأخیر بر اساس سطح تراکم، فقط برای هاب  $k$  در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا در هاب اول ( $k$ ) تفکیک و مرتب‌سازی برحسب مقصد نهایی انجام می‌گیرد که با بیشتر شدن سطح تراکم در هاب این زمان بیشتر می‌شود. همچنین زمان‌های جمع‌آوری کالاهایی که از گره‌ها به هاب  $k$  می‌رسند، متفاوت است؛ اما هاب دوم ( $l$ ) از هاب اول جریان خود را دریافت می‌کند و زمان دریافت تمام کالا یکسان و کالاها براساس مقصد خود مرتب شده به هاب  $l$  وارد می‌شوند، پس زمان تأخیر ناشی از سطح تراکم، فقط برای هاب اول لحاظ می‌شود. زمان سفر بین هاب‌ها در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای تصمیم در این مدل زمان آماده‌سازی (زمانی که طول می‌کشد تا دیرترین گره جریان خود را به هاب برساند)، متغیر جریان (متغیری که جریان گره مبدا را از هاب اول به هاب دوم انتقال می‌دهد) و متغیر تخصیص (متغیری که نشان‌دهنده این است که گره باید به کدام هاب متصل باشد، در واقع هر گره به یک هاب تخصیص می‌یابد) در نظر گرفته می‌شوند.

سطوح تراکم در ابتدای مدل‌سازی تعریف می‌شوند. برای مثال سه سطحی که به‌طور رایج تراکم را با آن تعریف می‌کنند، سطوح ۷۰ درصد، ۸۵ درصد و ۱۰۰ درصد است. در واقع هر کدام از این درصدها ( $\gamma^g$ ) حاکی از کران‌های بالا در استفاده از ظرفیت هاب برای هر سطح تراکم ( $g$ ) است. وقتی میزان استفاده از ظرفیت بین ۰ تا ۷۰ درصد باشد هاب در سطح اول تراکم است که در اصطلاح فاقد تراکم نامیده می‌شود. وقتی میزان استفاده از ظرفیت بین ۷۰ تا ۸۵ درصد باشد، هاب در سطح دوم تراکم است که در اصطلاح تراکم سبک گفته می‌شود. وقتی میزان استفاده از ظرفیت بالاتر از ۸۵ درصد باشد، هاب در سطح سوم تراکم است که به اصطلاح پرتراکم گفته می‌شود (مدرس و همکاران، ۲۰۲۳ ب).

همچنین در مدل‌سازی ضریبی به نام ضریب تراکم ( $\tau$ ) وجود دارد که نشان می‌دهد با توجه به سطح تراکم بالاتر، زمان حمل در یک هاب چقدر افزایش می‌یابد. قاعده معمول این است که در وضعیت تراکم سبک، زمان پردازش در هاب‌ها در  $\tau^g = 1 + \tau$  و در وضعیت پرتراکم در  $\tau^g = (1 + \tau)^2$  ضرب می‌شود. برای هر ترکیبی از هزینه و ظرفیت ثابت، هنگامی که مقدار ضریب تراکم ( $\tau$ ) افزایش می‌یابد، تعداد هاب‌هایی که باز می‌شوند افزایش یافته یا یکسان باقی می‌ماند. مدل تخصیص تکی با در نظر گرفتن هزینه‌های دیرکرد به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$\text{Min} \sum_{k \in N} \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} \gamma^g z_k^{cg} + \sum_{k \in N} r_k \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (c_{ik} \chi_{0i} + c_{ki} \delta D_i) x_{ik} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} \alpha c_{kl} y_{kl}^i + \sum_{k \in N} \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} f_k^c z_k^{cg} + \sum_j s_j \cdot a_j \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\sum_{k \in N} x_{ik} = 1 \quad i \in N \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{g \in G} z_k^{cg} = x_{kk} \quad k \in N \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\sum_{l \in N} y_{kl}^i \leq O_i x_{ik} \quad i, k \in N \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\sum_{l \in N} y_{kl}^i - \sum_{l \in N} y_{lk}^i = O_i x_{ik} - \sum_{j \in N} w_{ij} x_{jk} \quad i, k \in N \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\sum_{i \in N} O_i x_{ik} \leq \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} \Gamma^c \gamma^g z_k^{cg} \in N \quad k \in N \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\tilde{r}_k \geq t_{ik} x_{ik} \quad i, k \in N \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\tilde{r}_k + \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} \Delta^c \tau_g z_k^{cg} + t_{kl} + \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} \Delta^c z_l^{cg} + \tilde{r}_l - s_j \leq T \quad l, k \in N \quad \text{رابطه ۹}$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad i, k \in N \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$y_{kl}^i \geq 0 \quad i, k, l \in N \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$z_k^{cg} \in \{0,1\} \quad \begin{matrix} c \in C \\ g \in G \\ k \in N \end{matrix} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

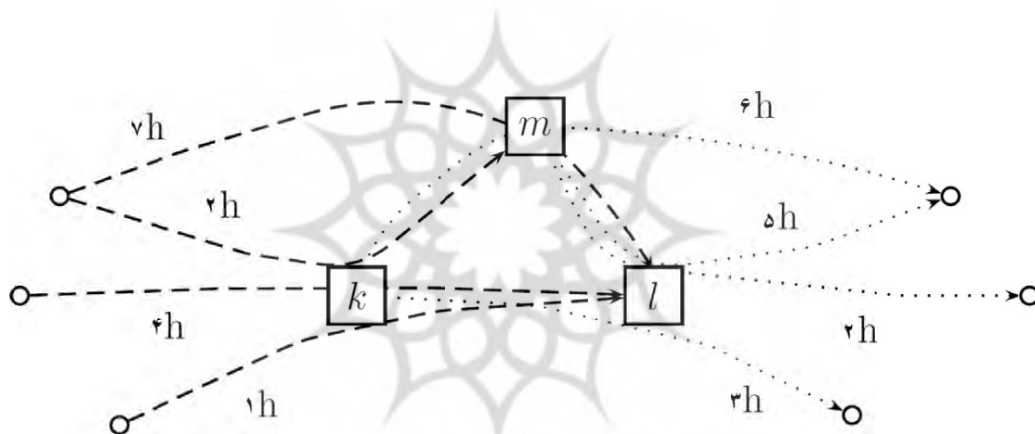
به طوری که تابع هدف ۱ زمان آماده سازی و سطح تراکم را حداقل می کند. تابع هدف ۲ کل هزینه های حمل و نقل، تأسیس هاب ها و دیرکرد را حداقل می کند (مسئله ابتدا با این تابع هدف حل می شود و سپس طبق روش لکسیکوگراف به عنوان یک مقدار عملی در محدودیت ها قرار می گیرد). محدودیت ۳ تضمین می کند هر گره دقیقاً به یک هاب تخصیص یابد (بازاری، پویا، سلیمانی و روزخوش<sup>۱</sup>، ۲۰۲۳). محدودیت ۴ نشان می دهد که وقتی یک هاب مستقر شود، باید دقیقاً یک سطح ظرفیت تنظیم شود که به سهم خود سطح تراکم را استنتاج کند. محدودیت ۵ از مسیریابی صحیح جریان از طریق شبکه هاب اطمینان حاصل می کند (آلومر و همکاران، ۲۰۱۸). محدودیت ۶ تضمین می کند  $i$  فقط باید به



یک هاب متصل باشد و کل جریان‌های ورودی و خروجی مربوط به گره  $i$  باید به همان هاب متصل باشد. محدودیت ۷ نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت در هر هاب برای کل جریانی است که به آن هاب می‌رسد (روزخوش و مطهری، ۲۰۲۲). محدودیت ۸ مرزهای بالایی را برای زمان آماده‌سازی را در نظر می‌گیرد (جبارعاملی و جبارزاده، ۱۳۹۶). محدودیت ۹ زمان سرویس را محدود می‌کند که در آن  $s_j$  مدت زمان رسیدن تقاضای  $z$ ام دیرتر از زمان تحویل و  $a_j$  هزینه دیرکرد تقاضای مشتری  $z$ ام است.

### مکان‌یابی و تخصیص هاب چندگانه

در بخش قبلی، مدل ریاضی برای مکان‌یابی هاب با رویکرد تخصیص تکی ارائه شد. رویکردی که به نظر می‌رسد به دلیل محدود کردن ارسال تقاضا فقط به یک هاب، نتایج مطلوبی نداشته باشد و نیازمند رویکردی چندگانه برای رفع این نقص باشیم (مدرس، فریمانی و امروزی، ۲۰۲۲). در این بخش ساخت مدل با رویکرد چندگانه پیگیری خواهد شد. شکل ۴، مسئله تخصیص چندگانه را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمایش مسئله مکان‌یابی هاب در حالت تخصیص چندگانه

همان طور که از شکل مشخص است در این در تخصیص چندگانه مطابق هر گره عرضه می‌تواند به بیشتر از یک هاب تخصیص یابد. در این حالت زمان آماده‌سازی برای هر هاب با جریان ورودی به هر هاب و خروجی از آن محاسبه می‌شود. بدین صورت که دیرترین زمان جریان ورودی از گره  $i$ ام به هاب  $k$ ام که به مقصد هاب  $m$ ام مورد نظر می‌رود برابر زمان جمع‌آوری (آماده‌سازی) ورودی آن هاب و دیرترین زمان توزیع برای گره  $z$ ام که از هاب  $k$ ام به هاب  $m$ ام تخصیص یافته است، زمان آماده‌سازی خروجی در نظر گرفته می‌شود (حجازی و روزخوش، ۲۰۱۹). برای مثال  $r_{km}^{in}$  برابر با دیرترین زمان جمع‌آوری ورودی به هاب  $m$ ام است که از گره  $i$ ام و هاب  $k$ ام جریان دریافت می‌کند که با توجه به شکل ۵ برابر با ۲ ساعت است و  $r_{km}^{out}$  برابر است با دیرترین زمان توزیع هاب  $m$ ام که از هاب  $k$ ام جریان خود را دریافت کرده و به مقصد گره  $z$ ام می‌رود، در شکل ۵ این زمان برابر ۶ ساعت است. همچنین علاوه بر متغیرهای تصمیم حالت

تخصیص تکی، متغیر جریان به صورت باینری (این متغیر برای اطمینان از این است که کل جریان از طریق هاب‌ها فرستاده شود) و متغیرهای زمان جمع‌آوری در هاب  $k$  و زمان توزیع در هاب  $l$  به جای متغیر زمان آماده‌سازی حالت قبلی (در این حالت چون هر گره به بیشتر از یک هاب تخصیص می‌یابد، زمان آماده‌سازی همان طور که در بالا توضیح داده شد، محاسبه می‌شود)، فرموله می‌شود. مدل تخصیص چندگانه با در نظر گرفتن هزینه‌های دیرکرد به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Min} \sum_{k \in N} \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} \gamma^g z_k^{cg} + \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} r_{kl}^{in} + \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} r_{kl}^{out} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} (\chi c_{ik} + \alpha c_{kl} + \delta c_{lk}) w_{ij} y_{ij}^{kl} + \sum_{k \in N} \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} f_k^c z_k^{cg} + \sum_j s_j \cdot a_j \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{l \in N} y_{ij}^{kl} = 1 \quad i, j \in N \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{g \in G} z_k^{cg} \leq 1 \quad k \in N \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_{l \in N} y_{ij}^{kl} \leq \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} z_k^{cg} \quad i, j, k \in N \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\sum_{k \in N} y_{ij}^{kl} \leq \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} z_l^{cg} \quad i, j, l \in N \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_{ij} \sum_{l \in N} y_{ij}^{kl} \leq \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} \Gamma^c \gamma^g z_k^{cg} \quad k \in N \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$\hat{y}_{ij}^{kl} \geq y_{ij}^{kl} \quad i, j, k, l \in N \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$\tilde{r}_{kl}^{in} \geq t_{ik} \hat{y}_{ij}^{kl} \quad i, j, k, l \in N \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$\tilde{r}_{kl}^{out} \geq t_{ij} \hat{y}_{ij}^{kl} \quad i, j, k, l \in N \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\tilde{r}_{kl}^{in} + \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} \Delta^c t^g z_k^{cg} + t_{kl} + \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} \Delta^c z_l^{cg} + \tilde{r}_{kl}^{out} - s_j \leq T \quad k, l \in N \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$y_{ij}^{kl} \geq 0 \quad i, j, k, l \in N \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$\hat{y}_{ij}^{kl} \in \{0, 1\} \quad i, j, k, l \in N \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$z_k^{cg} \in \{0, 1\} \quad \begin{array}{l} c \in C \\ g \in G \\ K \in N \end{array} \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

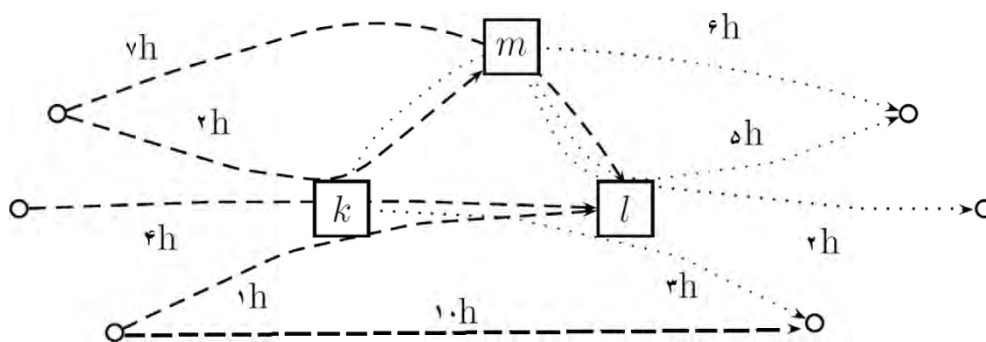
تابع هدف ۱۳ تضمین می‌کند زمان آماده‌سازی و سطح تراکم حداقل شوند. تابع هدف ۱۴ کل هزینه‌های حمل‌ونقل، تأسیس هاب و دیرکرد را حداقل می‌کند. محدودیت ۱۵ تضمین می‌کند که ارسال کل تقاضای بین هر جفت گره از طریق هاب‌ها انجام می‌شود. محدودیت ۱۶ وجود حداکثر یک ظرفیت و یک سطح تراکم برای هاب را تضمین می‌کند (واندلتا، دايا، ژنگا، ژاو و سان، ۲۰۲۰). محدودیت ۱۷ نشان می‌دهد که هیچ جریان از طریق گره‌ای که هاب نیست، نمی‌تواند هدایت شود. محدودیت ۱۸ تضمین می‌کند هیچ جریان از طریق گره‌ای که هاب نیست، نمی‌تواند هدایت شود. محدودیت ۱۹ بیان می‌کند که برای هر هاب دقیقاً یک ظرفیت و یک سطح تراکم وجود دارد. محدودیت ۲۰ نشان می‌دهد متغیر جریان نسبی حداکثر می‌تواند به اندازه متغیر جریان باینری باشد. محدودیت ۲۱ بیان می‌کند که زمان جمع‌آوری، حداکثر به اندازه زمان سفر از گره به هاب  $k$  با توجه به نسبت جریانی است که حمل می‌کند. محدودیت ۲۲ تضمین می‌کند که زمان توزیع حداکثر به اندازه زمان سفر از هاب  $k$  به گره با توجه به نسبت جریانی است که حمل می‌کند. محدودیت ۲۳ زمان سرویس در شبکه را محدودیت می‌کند.

### مسئله مکان‌یابی و تخصیص هاب چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم

در بخش قبلی، مدل ریاضی برای مکان‌یابی هاب با رویکرد تخصیص چندگانه ارائه شد. هر چند که این رویکرد نسبت به رویکرد تخصیص تکی، رویکردی ارتقایافته و کامل‌تری است؛ ولی به نظر می‌رسد به دلیل محدود کردن ارسال تقاضا فقط از طریق هاب، چندان نتایج واقع بینانه‌ای نداشته باشد و نیازمند رویکردی باشیم که حمل‌ونقل مستقیم بین برخی گره‌ها را مجاز بداند. در این بخش ساخت مدل با رویکرد تخصیص چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم پیگیری خواهد شد. شکل ۱، یک مسئله تخصیص چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، این مورد مانند تخصیص چندگانه است، با این تفاوت که حمل‌ونقل بین

گره‌های غیرهابی نیز مجاز است. برای به دست آوردن الگویی برای فرمت این مسئله می‌توان همان مجموعه متغیرهای تصمیم را که قبلاً برای مسئله تخصیص چندگانه معرفی شده‌اند در نظر گرفت. علاوه بر این موارد، به دلیل وجود حمل‌ونقل غیرهابی، برای اطمینان از این که حمل‌ونقل از گره  $\lambda$  م به گره  $\lambda$  م از طریق هاب‌ها و یا به صورت مستقیم صورت گرفته، متغیر جدیدی معرفی می‌گردد (مدرس، کاظمی، امروزی، روزخوش، ۲۰۲۳).



شکل ۵. نمایش مسئله مکان‌یابی هاب در حالت تخصیص چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم

در کل قرار بر این است که مانند مدل‌های پیشین، ابتدا مدل با تابع هدف بهینه‌سازی مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل و تأسیس هاب‌ها حل شده و جواب حاصل به عنوان یک مقدار عملی در نظر گرفته شود (رجبی، روزخوش، فریمانی، ۲۰۲۲)، سپس مدل با هدف بهینه‌سازی زمان‌های آماده‌سازی و سطح تراکم و در نظر گرفتن تابع هدف قبلی (مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل و تأسیس هاب‌ها) در محدودیت‌ها حل می‌شود. مدل تخصیص چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم با در نظر گرفتن هزینه‌های دیرکرد به صورت زیر بیان می‌شود:

روابط ۱۵ تا ۲۲

$$t_{ij} s_{ij} \leq T \quad i, j \in N \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{l \in N} y_{ij}^{kl} + s_{ij} = 1 \quad i, j \in N \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$s_{ij} \leq 1 - \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} z_i^{cg} \quad i, j \in N \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} (\chi c_{ik} + \alpha c_{kl} + \delta c_{lk}) w_{ij} y_{ij}^{kl} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \mu c_{ij} w_{ij} s_{ij} + \sum_{k \in N} \sum_{c \in C} \sum_{g \in G} f_k^c z_k^{cg} + \sum_j s_j \cdot a_j \leq F_r \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$y_{ij}^{kl} \geq 0 \quad i, j, k, l \in N \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$\hat{y}_{ij}^{kl} \in \{0,1\} \quad i, j, k, l \in N \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

$$z_k^{cg} \in \{0,1\} \quad \begin{array}{l} c \in C \\ g \in G \\ K \in N \end{array} \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

تابع هدف ۱۳ و محدودیت‌های ۱۵ تا ۲۲ مشابه مدل چندگانه است. محدودیت ۲۷ محدودیت زمان سرویس برای گره‌های غیرهابی را در نظر می‌گیرد. محدودیت ۲۸ نشان می‌دهد که انتقال جریان یا مستقیم است یا از طریق هاب‌ها صورت می‌گیرد (آلومر و همکاران، ۲۰۱۸). محدودیت ۲۹ نشان می‌دهد حمل‌ونقل یا مستقیم است یا از طریق هاب‌ها صورت می‌گیرد (روزخوش، پویا و آگاروال<sup>۱</sup>، ۲۰۲۲) و محدودیت ۳۰ کل هزینه‌های حمل‌ونقل را محدود می‌کند؛ به طوری که حداکثر به اندازه مقدار عملی به دست آمده از تابع هدف اولیه باشد. این محدودیت برای اولین بار در این مقاله استفاده شده است.

### یافته‌های پژوهش

در این بخش آنالیز حساست و نتایج حل مدل برای سه حالت تخصیص تکی، چندگانه و چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم بررسی می‌شود. مجموعه داده‌های پست استرالیا (AP)، مجموعه داده ای استاندارد برای مسائل حمل‌ونقل و به ویژه مسائل مکان‌یابی هاب در سطح دنیاست. این داده‌ها برای اولین بار توسط ارنست و کریشنامورتی در سال ۱۹۹۶ معرفی شد که نمونه‌هایی با حداکثر دو پست گره را در بر می‌گیرد و شامل مختصات هر گره و همچنین تقاضا بین هر جفت گره است. داده‌های پست استرالیا (AP) از لحاظ این که هزینه و ظرفیت، آزاد (L) یا محدود (T) در نظر گرفته شود به ۴ مجموعه داده‌ای متمایز تقسیم می‌شود و عبارت‌اند از LL، LT، TL و TT که برای اشاره تنظیمات هزینه و ظرفیت ثابت به‌طور خاص از این دستور استفاده شده است (آلومر و همکاران، ۲۰۱۸).

مثال عددی معرفی شده در این بخش از داده‌های AP اقتباس شده‌اند. در این مثال شبکه از ۵ گره تشکیل شده است. همچنین هاب‌ها در سه ظرفیت متفاوت در نظر گرفته شده‌اند: کوچک (S)، متوسط (M) و بزرگ (L). ظرفیت هاب در اندازه متوسط از مقادیر متوسط داده‌های AP به دست آمده است. برای به دست آوردن ظرفیت‌ها و هزینه‌های هاب‌های کوچک و بزرگ، این مقادیر متوسط ۲۰ درصد انحراف داده می‌شود. مدت زمان جابه‌جایی در یک هاب متوسط، ۲/۵ ساعت لحاظ شده است. این زمان همچنین برای هاب‌هایی با اندازه‌های کوچک و بزرگ ۲۰ درصد متفاوت است. سطوح تراکم هاب نیز به همان صورت مرسوم و در سه سطح تعریف شده‌اند با مقادیر آستانه‌ای ۷۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد. فرض بر این است که هزینه‌های حمل‌ونقل به صورت خطی به فاصله اقلیدسی بین گره‌ها بستگی دارند. همچنین

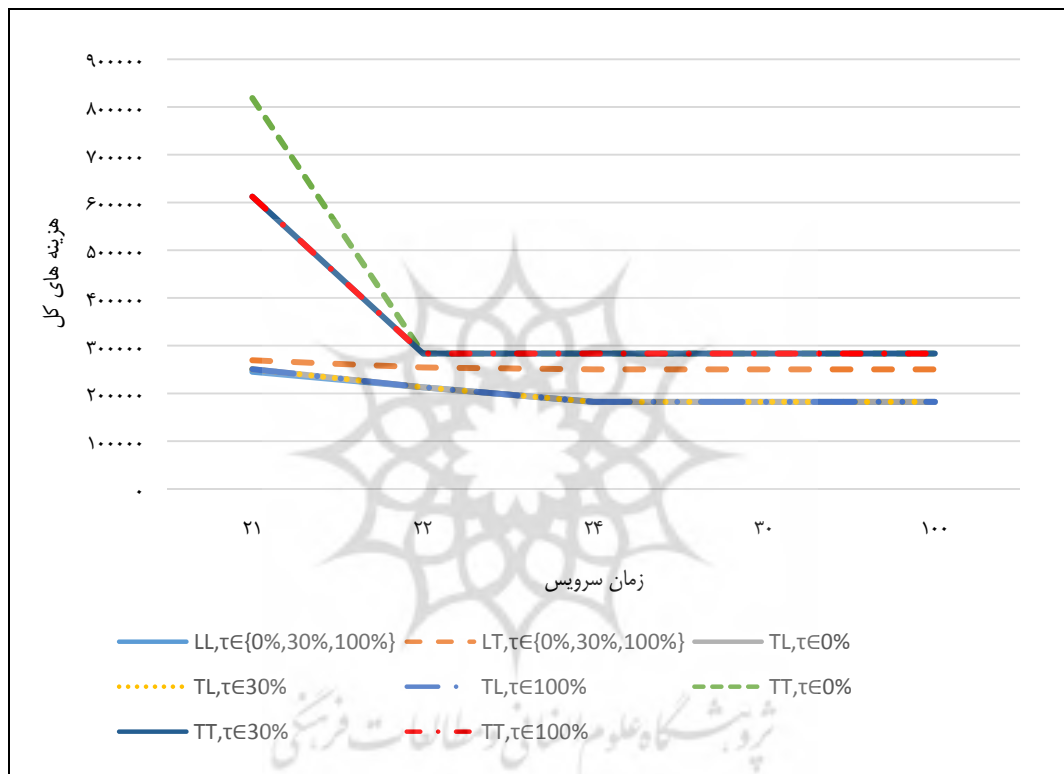
1. Roozkhosh, Pooya & Agarwal  
2. Loose  
3. Tight

زمان سفر بین گره‌ها به‌طور خطی به فاصله بستگی دارد. از فاکتور مقیاس‌گذاری  $t$  برای زمان سفر استفاده شد که هر چه تعداد گره‌های شبکه بیشتر شود زمان سفر نیز بیشتر می‌شود تا جایی که اطمینان حاصل شود، رعایت محدودیت زمان سرویس امکان‌پذیر است. این محدودیت زمانی عمدتاً برای شبکه‌های حمل‌ونقل سریع اعمال می‌شود (زمانی که تأخیر در حمل‌ونقل خیلی مهم باشد). توجه کنید که در مسائل مکان‌یابی هاب حتی می‌توان زمان سرویس را نامحدود در نظر گرفت. منظور از نامحدود در نظر گرفتن زمان، انتخاب یک عدد نسبتاً بزرگ برای زمان سرویس است. برای مثال، در مجموعه داده‌های AP، عدد ۱۰۰ ساعت یک مقدار به اندازه کافی بزرگ است و در عمل به معنای محدودیت زمانی نیست. پارامترهای مدل به‌صورت جدول ۴ است.

جدول ۴. پارامترها برای مثال داده‌های پستی

مقدار	پارامتر	توصیف	
۴۰، ۲۰، ۱۰	$N$	تعداد گره‌ها	مجموعه‌ها
M, S, L	$C$	ظرفیت سطوح	
3	$G$	تعداد سطوح تراکم	
جریان‌های داده AP	$w_{ij}$	جریان‌ها	جریان‌ها و هزینه‌ها
میانگین هزینه‌های محدود داده AP	$f_k^M$	هزینه ثابت: هاب متوسط T	
میانگین هزینه‌های آزاد داده AP	$f_k^L$	هزینه ثابت: هاب متوسط L	
$0.1 f_k^M$	$f_k^S$	هزینه ثابت: هاب کوچک T, L	
$1/2 f_k^M$	$f_k^L$	هزینه ثابت: هاب بزرگ T, L	
هزینه‌های داده‌های AP	$C_{ij}$	هزینه حمل نقل هر واحد جریان	
0.75	$\alpha$	فاکتور تخفیف برای حمل‌ونقل بین هابی	
۳	$\chi$	فاکتور مقیاس‌گذاری برای هزینه‌های جمع‌آوری	
۲	$\delta$	فاکتور مقیاس‌گذاری برای هزینه‌های توزیع	
۴	$\mu$	فاکتور مقیاس‌گذاری برای حمل‌ونقل مستقیم	
میانگین مقادیر محدود داده AP	$\Gamma_k^M$	ظرفیت هاب متوسط T	ظرفیت‌ها
میانگین مقادیر آزاد داده AP		ظرفیت هاب متوسط L	
$0.1 \Gamma_k^M$		ظرفیت هاب کوچک T, L	
$1/2 \Gamma_k^M$	$\Gamma_k^L$	ظرفیت هاب بزرگ T, L	
۲/۵ ساعت	$\Delta^M$	زمان جابه‌جایی: هاب متوسط	زمان
۲ ساعت	$\Delta^S$	زمان جابه‌جایی: هاب کوچک	
۳ ساعت	$\Delta^L$	زمان جابه‌جایی: هاب بزرگ	
$t_{ij}$	$t_{ij}$	زمان حمل‌ونقل	
فاصله اقلیدوسی داده‌های AP	$d_{ij}$	فاصله‌ها	
۲۴ و ۲۱	$T$	زمان سرویس	تراکم
۲ ساعت	$S_i$	مدت زمان رسیدن تقاضای زام دیرتر از زمان تحویل	
۷۰٪، ۸۵٪، ۱۰۰٪	$\gamma^g$	UBs (حدود بالا) روی ظرفیت استفاده شده برای سطح تراکم g	تراکم
$(1 + \tau)^{g-1}$ $\tau \in \{0\%, 30\%, 100\%\}$	$\tau_g$	زمان تأخیر مربوط به سطح تراکم g	

مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شد و نتایج آن در ادامه توضیح داده می‌شود. مقایسه‌های کل هزینه‌های حمل‌ونقل و تأسیس هاب در تخصیص تکی، چندگانه و چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم برای زمان‌های سرویس مختلف و مقدار تراکم مختلف در هاب‌ها برای ۱۰ هاب برای حالت‌های  $TL, \tau \in \{0\%, 30\%, 100\%}$  و  $LL, TT$  در شکل ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. در شرایطی که زمان سرویس بین ۲۱ تا ۱۰۰ ساعت در نظر گرفته شده و تراکم در هاب (۰ درصد، ۳۰ درصد و ۱۰۰ درصد) (با توجه به مطالعات پیشین این سه سطح برای تراکم در هاب‌ها در نظر گرفته شده است) و زمان دیرکرد برای هاب لحاظ شده است.



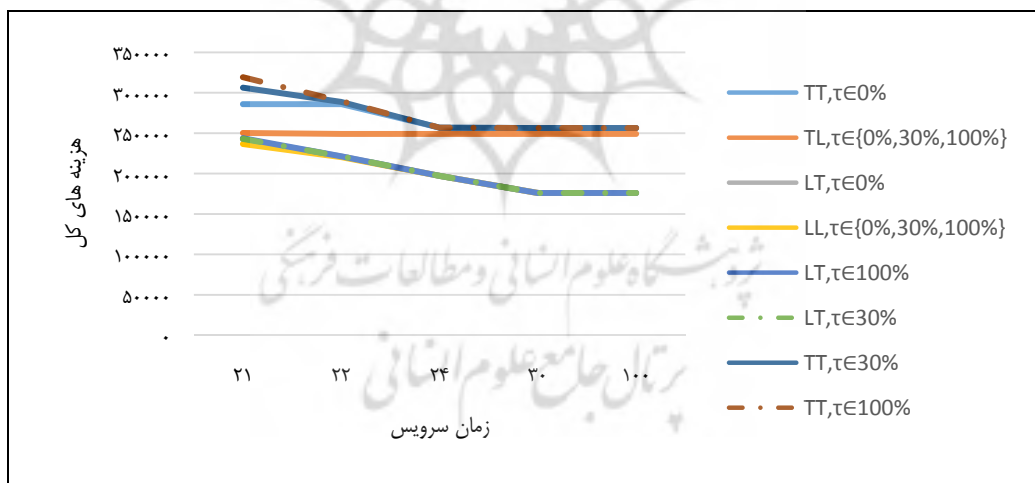
شکل ۶. مقایسه کل هزینه‌های حمل‌ونقل و تأسیس هاب برای زمان‌های سرویس مختلف و مقدار تراکم مختلف در هاب‌ها در تخصیص تکی

با توجه به شکل ۶ مشخص است که اگر هم هزینه‌ها و هم ظرفیت در هاب محدود باشد بیشترین هزینه برای حمل‌ونقل وجود دارد. از طرفی هرچه زمان آماده‌سازی بیشتر شود در پایین آمدن کل هزینه‌ها تأثیر مثبت دارد. برای تخصیص چندگانه نیز همانند تخصیص تکی مقایسات برای حالت‌های  $TL, \tau \in \{0\%, 30\%, 100\%}$  و  $LL, TT$  در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۷ مشخص است، هزینه‌های کل در مقایسه با تخصیص تکی کاهش یافته است و در این حالت نیز با افزایش زمان آماده‌سازی و در نظر گرفتن هزینه و ظرفیت آزاد (نامحدود) برای هاب‌ها کمترین هزینه را دارد.



شکل ۷. مقایسه کل هزینه‌های حمل‌ونقل و تأسیس هاب برای زمان‌های سرویس مختلف و مقدار تراکم مختلف در هاب‌ها در تخصیص چندگانه

همان‌طور که گفته شد شکل ۸ نیز مقایسه‌های کل هزینه‌های حمل‌ونقل و تأسیس هاب در تخصیص چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم نشان می‌دهد.



شکل ۸. مقایسه کل هزینه‌های حمل‌ونقل و تأسیس هاب برای زمان‌های سرویس مختلف و مقدار تراکم مختلف در هاب‌ها در تخصیص چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است هزینه‌های کل در مقایسه با تخصیص تکی و چندگانه کاهش یافته است. نتایج بالا برای زمانی است که محدودیت تعداد هاب‌ها وجود نداشته باشد. مدل برای دو صورت دیگر نیز نوشته شده است: یکی در نظر گرفتن محدودیت حداکثر و حداقلی برای تعداد هاب‌ها (یعنی تعداد هاب بین دو مقدار خاص قرار گیرد) و دیگری ثابت در نظر گرفتن تعداد هاب‌ها می‌باشد. تعداد هاب‌های باز شده با توجه به سایز هاب و آزاد یا محدود بودن هزینه‌های ثابت و ظرفیت در مدل برای ۵۰ گره در شرایطی که محدودیتی برای هاب‌ها وجود نداشته باشد، در



جدول ۵ نشان داده شده است. مدل برای سه حالت LL, TL, TT و LL و ضریب تراکم ۳۰ درصد و برای دو مقدار زمان سرویس حل شده است.

جدول ۵. تعداد هاب‌های باز شده با توجه به سایز هاب و آزاد یا محدود بودن هزینه‌های ثابت و ظرفیت

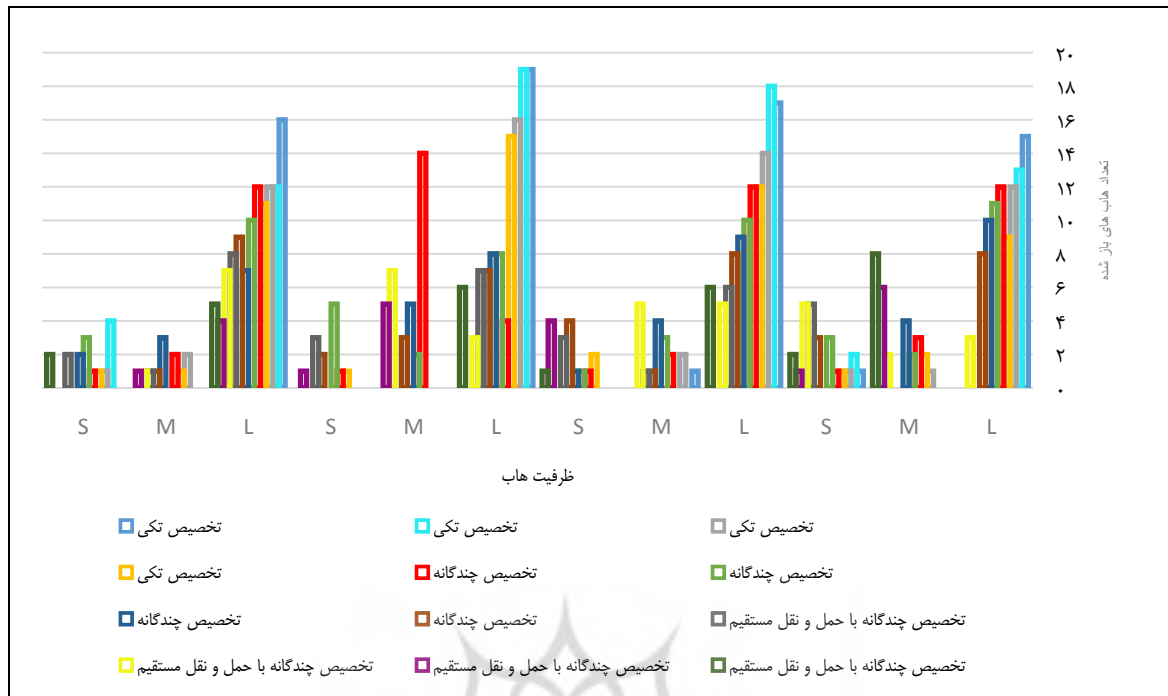
$\tau = 30\%$												زمان سرویس	N=50
LL			TL			LT			TT				
S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L		
۱	۰	۶	۰	۰	۸	۰	۱	۷	۰	۰	۷	۲۲	تخصیص تکی
۰	۰	۶	۰	۰	۸	۱	۰	۷	۰	۱	۶	۲۴	
۰	۰	۶	۰	۰	۸	۰	۰	۷	۱	۰	۵	۳۰	
۰	۱	۶	۰	۰	۸	۰	۰	۶	۱	۰	۴	۱۰۰	
۰	۰	۶	۰	۸	۰	۰	۰	۶	۰	۰	۶	۲۲	تخصیص چندگانه
۰	۱	۵	۱	۴	۳	۰	۰	۵	۰	۱	۵	۲۴	
۱	۱	۴	۰	۳	۴	۱	۰	۵	۰	۰	۵	۳۰	
۰	۱	۵	۰	۰	۶	۱	۱	۵	۰	۰	۴	۱۰۰	
۰	۱	۵	۰	۰	۶	۱	۱	۴	۰	۰	۰	۲۲*	تخصیص چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم
۰	۱	۵	۰	۵	۰	۰	۳	۱	۱	۲	۰	۲۴	
۰	۱	۴	۱	۵	۰	۴	۰	۰	۱	۳	۰	۳۰	
۰	۰	۳	۰	۰	۴	۰	۰	۳	۱	۴	۰	۱۰۰	

همان‌طور که جدول بالا مشاهده می‌شود اگر ظرفیت و هزینه هاب‌ها محدود باشد در زمان سرویس ۲۲ برای تخصیص چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم هیچ هابی باز نشده است. همچنین فاکتور تخفیف برای حمل‌ونقل بین هابی ( $\alpha$ ) در مجموعه داده‌های AP ۰/۷۵ در نظر گرفته شده است (بیسلی، ۱۹۹۰). برای ارزیابی تأثیر  $\alpha$  بر راه‌حل‌ها، آزمایش‌های محاسباتی با دو مقدار دیگر  $\alpha$  انجام داده شد: ۰/۲۵ و ۰/۵.

هزینه کل و مکان‌های هاب بهینه تحت سه مقدار  $\alpha$  متفاوت در جدول ۶ برای نمونه‌های ۱۰ گره مقایسه شد. همان‌طور که انتظار می‌رود، هزینه کل با افزایش مقدار  $\alpha$  افزایش می‌یابد. مهم‌تر از همه، جدول ۶ نشان می‌دهد که مکان بهینه هاب‌ها از پارامتر فاکتور تخفیف تأثیر می‌پذیرد. اگرچه در بیشتر موارد مکان‌های ترجیحی هاب وجود دارد، اما می‌توان به وضوح تفاوت‌ها را در مکان‌های هاب بهینه با تغییر مقدار  $\alpha$  مشاهده کرد. به‌طور خاص، مشاهده می‌شود که در برخی موارد، مدل‌ها تمایل دارند هاب‌های کمتری با مقدار  $\alpha$  بالاتر پیدا کنند. ما تجزیه و تحلیل بیشتری را با سه مقدار  $\alpha$  تحت محدودیت‌های زمانی مختلف زمان سرویس و عوامل تراکم نیز انجام دادیم (شکل‌های ۶، ۷ و ۸). تغییر در هر دوی این پارامترها منجر به نتایج مشابه ارائه شده برای جدول ۶ شد. علاوه بر این، برای ۱۰۰ گره مقایسه تعداد هاب‌های باز شده برای تخصیص‌های تکی، چندگانه و چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم در شکل ۹ انجام شده است.

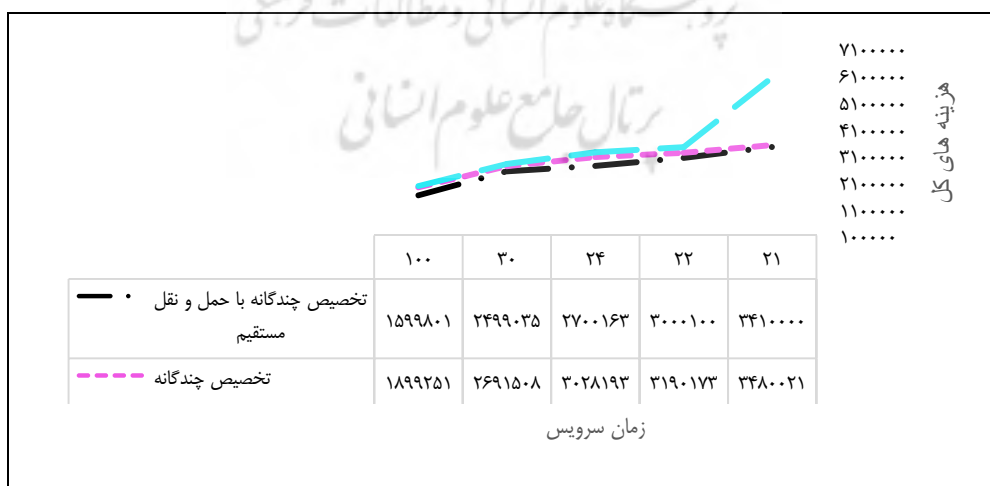
جدول ۶. نتایج مقادیر  $\alpha$  مختلف برای زمان سرویس ۲۲ ساعت و تراکم هاب ۱۰۰ درصد

مکان‌های هاب‌ها	هزینه کل	$\alpha$	هزینه و ظرفیت	نوع تخصیص
۹ و ۶ و ۵ و ۲	۲۹۰۴۳۱	۰/۷۵	LL	تکی
۹ و ۶ و ۵ و ۲	۲۴۰۷۱۰	۰/۵	LL	تکی
۹ و ۶ و ۲ و ۱	۲۴۰۰۰۶	۰/۲۵	LL	تکی
۹ و ۶ و ۵ و ۲	۳۸۰۱۲۴	۰/۷۵	LT	تکی
۹ و ۶ و ۵ و ۲ و ۱	۳۶۴۸۷۱	۰/۵	LT	تکی
۹ و ۶ و ۵ و ۲ و ۱	۳۵۲۹۸۱	۰/۲۵	LT	تکی
۹ و ۶ و ۵ و ۲	۳۷۹۶۳۱	۰/۷۵	TL	تکی
۹ و ۶ و ۵ و ۲	۳۶۵۱۰۹	۰/۵	TL	تکی
۹ و ۶ و ۵ و ۲	۳۶۰۰۰۲	۰/۲۵	TL	تکی
۹ و ۶ و ۲	۵۰۱۰۸۱	۰/۷۵	TT	تکی
۹ و ۶ و ۵ و ۲	۴۰۱۹۴۱	۰/۵	TT	تکی
۹ و ۶ و ۵ و ۲	۳۹۹۸۱۲	۰/۲۵	TT	تکی
۶ و ۵ و ۲	۲۵۰۱۲۳	۰/۷۵	LL	چندگانه
۶ و ۵ و ۲	۲۳۰۰۱۰	۰/۵	LL	چندگانه
۶ و ۵ و ۲ و ۱	۲۰۹۱۸۹	۰/۲۵	LL	چندگانه
۹ و ۶ و ۲	۲۶۰۷۸۳	۰/۷۵	LT	چندگانه
۹ و ۶ و ۵ و ۲	۲۵۴۷۹۰	۰/۵	LT	چندگانه
۹ و ۶ و ۵ و ۲	۲۳۰۸۵۳	۰/۲۵	LT	چندگانه
۹ و ۶ و ۲	۲۴۰۱۲۴	۰/۷۵	TL	چندگانه
۹ و ۵ و ۲	۲۲۰۹۸۱	۰/۵	TL	چندگانه
۹ و ۶ و ۲	۲۱۰۳۲۷	۰/۲۵	TL	چندگانه
۹ و ۲	۳۳۰۱۲۳	۰/۷۵	TT	چندگانه
۹ و ۵ و ۲	۳۰۱۹۱۰	۰/۵	TT	چندگانه
۹ و ۵	۳۰۰۰۲۳	۰/۲۵	TT	چندگانه
۹ و ۲	۱۶۰۱۲۳	۰/۷۵	LL	چندگانه با حمل مستقیم
۹ و ۵ و ۲	۱۵۰۱۲۴	۰/۵	LL	چندگانه با حمل مستقیم
۹ و ۶ و ۲	۱۴۰۱۴۹	۰/۲۵	LL	چندگانه با حمل مستقیم
۹ و ۶	۱۸۹۰۱۲	۰/۷۵	LT	چندگانه با حمل مستقیم
۹ و ۶ و ۵	۱۷۲۱۹۵	۰/۵	LT	چندگانه با حمل مستقیم
۶ و ۵ و ۲	۱۷۰۵۴۰	۰/۲۵	LT	چندگانه با حمل مستقیم
۵	۱۹۰۳۱۲	۰/۷۵	TL	چندگانه با حمل مستقیم
۵ و ۲	۱۸۱۲۴۰	۰/۵	TL	چندگانه با حمل مستقیم
۹ و ۵ و ۲	۱۷۷۷۰۲	۰/۲۵	TL	چندگانه با حمل مستقیم
-	۲۰۱۲۴۰	۰/۷۵	TT	چندگانه با حمل مستقیم
-	۱۹۷۷۶۳	۰/۵	TT	چندگانه با حمل مستقیم
۹ و ۶ و ۲	۱۹۳۴۴۲	۰/۲۵	TT	چندگانه با حمل مستقیم



شکل ۹. تعداد هاب‌های باز شده برای مسئله با ۱۰۰ گره در زمان‌های سرویس مختلف

همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است تعداد هاب‌ها زمانی که تخصیص تکی است نسبت به چندگانه و چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم بیشتر است و در کل برای ۱۰۰ گره زمان سرویس هر چقدر افزایش یابد تعداد هاب‌های باز شده به نسبت کاهش می‌یابد. همچنین شکل ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مقایسه هزینه‌ها و زمان آماده‌سازی و تراکم در هاب‌ها را برای سه حالت تخصیص زمانی که هزینه و ظرفیت محدود است (TT) نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. مقایسه هزینه‌های کل برای سه تخصیص تکی، چندگانه، چندگانه با حمل‌ونقل مستقیم



شکل ۱۱. مقایسه زمان‌های آماده‌سازی و تراکم با توجه به سطوح مختلف تراکم برای سه تخصیص تکی، چندگانه، چندگانه با حمل و نقل مستقیم

همان طور که گفته شد در این مطالعه زمان تراکم و دیرکرد هر دو مورد مطالعه قرار گرفته است و از طرفی تأثیری که تراکم روی دیر رسیدن کالاها به دست مشتریان می‌گذارد و از طرف دیگر تأثیری که دیرکرد روی هزینه‌ها می‌گذارد، باعث می‌شود که زمان برنامه‌ریزی شده متفاوت از زمان واقعی باشد و این تفاوت باعث ایجاد هزینه دیرکرد و افزایش زمان آماده‌سازی اگر تراکم در هاب‌ها زیاد باشد و نیز افزایش زمان سرویس می‌شود. با این حال همان طور که در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است اگر از تخصیص چندگانه با حمل و نقل مستقیم برای ایجاد ارتباط بین مبدا و مقصد استفاده شود، می‌تواند نه تنها در صرفه‌جویی هزینه‌ها کمک کننده باشد، بلکه باعث کاهش زمان‌های آماده‌سازی نیز می‌شود.

## نتیجه‌گیری

مسئله مکان‌یابی و تخصیص هاب از گذشته تاکنون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خصوصاً در مواردی که ترافیک کالاها و خدمات بالا باشد و تقاضا برای آن‌ها زیاد باشد. مانند شرایطی که در حال حاضر با شیوع ویروس کرونا به وجود آمده است. چراکه بیشتر تبادلات از راه دور در حال انجام است. در این مقاله برای کاهش هزینه‌های حمل و نقل و زمان‌های آماده‌سازی و تراکم در هر هاب با در نظر گرفتن زمان و هزینه دیرکرد، برای سه حالت تخصیص تکی، چندگانه و چندگانه با حمل و نقل مستقیم طی سه سناریو با در نظر گرفتن حداکثر صد گره مدل شد و با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شد.

نتایج حاکی از آن است که تخصیص چندگانه با حمل و نقل مستقیم در هر سه سناریو دارای حداقل هزینه‌ها می‌باشد چراکه در شرایطی که فاصله کوتاه باشد هزینه‌های تأسیس هاب و انتقال از طریق دو مسیر باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود و حمل و نقل مستقیم بهینه‌تر است و زمانی که مسیر حمل و نقل طولانی و یا دسترسی مستقیم به گره تقاضا دهنده مشکل باشد از هاب استفاده می‌شود. همچنین نتایج مقایسات بین سناریو دوم و سوم نشان داد در نظر گرفتن هاب‌ها

به صورت ثابت در محدودیت مدل، باعث افزایش هزینه‌ها می‌گردد. در مطالعات آتی می‌توان از عدم قطعیت در تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل برای بهبود شرایط مدل استفاده کرد. همچنین می‌توان مدل را طی چند افق زمانی تعریف و حل کرد. این پژوهش برای مدیران و صاحبان کسب‌وکار که قصد شناسایی نقاطی را برای ساخت انبار محصولات یا خدمات خود دارند یا می‌خواهند بهینه‌ترین نوع تخصیص را برای حمل‌ونقل از شهرهای مختلف داشته باشند، مفید است.

## منابع

- بهرامی، فرزاد؛ صفری، حسین؛ توکلی مقدم، رضا و مدرس یزدی، محمد (۱۳۹۶). مسئله مکان‌یابی - مسیریابی هاب زمینی در محدوده نامتراکم وسیع. مدیریت صنعتی، ۹(۱)، ۵۹ - ۷۸.
- کاظمی، محبوبه؛ محمدی زنجیرانی، داریوش و اسماعیلیان، مجید (۱۴۰۰). مدل چندهدفه مکان‌یابی مراکز بارانداز عبوری، زمان‌بندی و مسیریابی هم‌زمان وسایل نقلیه، تحت بخش‌بندی تقاضا برای اقلام فاسدشدنی. مدیریت صنعتی، ۱۳(۴)، ۶۰۶-۶۳۳.
- مهرگان، محمدرضا؛ جعفرنژاد، احمد؛ محمدی، میلاد (۱۳۹۷). ارائه مدل چندهدفه برای حمل‌ونقل زمینی مواد خطرناک در شبکه هاب (مطالعه موردی: شرکت ملی پخش فرآورده های نفتی). مدیریت صنعتی، ۱۰(۲)، ۲۲۱-۲۴۶.

## References

- Alumur, S. A., Nickel, S., Rohrbeck, B., & Saldanha-da-Gama, F. (2018). Modeling congestion and service time in hub location problems. *Applied Mathematical Modelling*, 55, 13-32.
- Alumur, S., & Kara, B. (2008). Network hub location problems: the state of the art. *European Journal of Operational Research*, 190, 1-21.
- Anderluh, A., Hemmelmayr, V. C. & Rüdiger, D. (2020). Analytichierarchy process for city hub location selection- The Viennese case. *Transportation Research Procedia*, 46, 77-84.
- Bafandegan Emroozzi, V., Roozkhosh, P., Modares, A., & Roozkhosh, F. (2023). Selecting Green Suppliers by Considering the Internet of Things and CMCDM Approach. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1-23.
- Bahrami, F., Safari, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Yazdi, M. M. (2017). Road Hub Location-Routing Issue in a Sparse and Distant Area. *Industrial Management Journal*, 9(1), 59-78. doi:20.1001.1.20085885.1396.9.1.4.5 (in Persian)
- Bayram, V., Yıldız, B., & Farham, M. S. (2023). *Hub Network Design Problem with Capacity, Congestion and Stochastic Demand Considerations*. Transportation Science.
- Bazari, S., Pooya, A., Soleimani Fard, O., & Roozkhosh, P. (2023). Modeling and solving the problem of scheduling university exams in terms of new constraints on the conflicts of professors' exams and the concurrence of exams with common questions. *OPSEARCH*, 60, 877-915.
- Beasley, J. (1990). OR Library: Hub location. <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/phubinfo.html>

- Campbell, J. F. (1992). Location and allocation for distribution systems with transshipments and transportation economies of scale. *Annals of operations research*, 40.
- Campbell, J. F. (1994). A survey of network hub location. *Studies in Locational Analysis Issue*, 6, 31-49.
- Campbell, J., Ernst, A., & Krishnamoorthy, M. (2002). *Hub location problems*.
- Contreras, I., Fernández, E., & Marín, A. (2010). The tree of hubs location problem. *European Journal of Operational Research*, 202(2), 390-400.
- Demir, İ., Kiraz, B., & Ergin, F. C. (2022). Experimental evaluation of meta-heuristics for multi-objective capacitated multiple allocation hub location problem. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. doi:10.1016/j.jestch.2021.06.012
- DMO, S. (2018). *Statista Digital Market Outlook Market Report*. Hamburg: Statista.
- Donaldson, H., Johnson, E. L., Ratliff, H. D., & Zhang, M. (1999). Schedule driven cross-docking networks. *Working paper*.
- Ebery, J. (2001). Solving large single allocation p-hub problems with two or three hubs. *European journal of operational research*, 128(2), 447-458.
- Ebrahimi, Z. A., Hossini-Nasab, H., mehrjerdi, Y. z., & Zahmatkesh, A. (2015). Multi-Period Hub Set Covering Problems with Flexible Radius: a Modified Genetic Solution. *Applied Mathematical Modelling*. doi:10.1016/j.apm.2015.09.064
- Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (1996). Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem. *Location science*, 4(3), 139-154.
- Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (1999). Solution algorithms for the capacitated single allocation hub location problem. *Annals of operations Research*, 86(0), 141-159.
- Esmaili, M., & Sedehzade, S. (2020). Designing a hub location and pricing network in a competitive environment. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 16(2).
- Fernández, E., & Sgalambro, A. (2020). On carriers collaboration in hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 283(2), 476-490.
- Garber, N., & Hoel, L. (2002). Traffic and Highway Engineering. *3rd Edition, Brooks/Cole Thompson, Learning, Pacific Grove*.
- Ghaffarinasab, N., & Motallebzadeh, A. (2021). Modeling and solving the uncapacitated r-allocation p-hub median problem under congestion. *Computational and Applied Mathematics*, 40, 1-28.
- glua, C.K., Serarslanb, M. N., & Topcu, Y. (2018). Particle Swarm Optimization for Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location Problem under Congestion. *Expert Systems With Applications*. doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.10.019
- Goldman, A. J. (1969). Optimal locations for centers in a network. *Transportation Science*, 3(4), 352-360.
- Hasanzadeh, H., Bashiri, M., & Amiri, A. (2018). A new approach to optimize a hub covering location problem with a queue estimation component using genetic programming. *Soft Computing*, 22, 949-961.

- Hejazi, T. H., & Roozkhosh, P. (2019). Partial inspection problem with double sampling designs in multi-stage systems considering cost uncertainty. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 6(1), 1-17.
- Hoff, A., Peiro, J., Corberan, A., & Marti, R. (2017). Heuristics for the capacitated modular hub location problem. *Computers & Operations Research*, 86, 94-109.
- Hu, Q. M., Hu, S., Wang, J., & Li, X. (2021). Stochastic single allocation hub location problems with balanced utilization of hub capacities. *Transportation Research Part B: Methodological*, 153, 204-227.
- Ilić, A., Urošević, D., Brimberg, J., & Mladenović, N. (2010). A general variable neighborhood search for solving the uncapacitated single allocation p-hub median problem. *Eur. J. Oper. Res.*, 206(2), 289-300.
- Kara, B. Y. (1999). *Modeling and analysis of issues in hub location problem*. Doctoral dissertation, Bilkent Universitesi (Turkey).
- Kazemi, M., Mohamadi Zanjirani, D., & Esmailian, M. (2022). The Multi-Objective Locating Model for Cross-Docking Centers and Vehicle Routing Scheduling With Split Demands for Perishable Products. *Industrial Management Journal*, 13(4), 606-633. doi:10.22059/imj.2022.333499.1007883 (in Persian)
- Lozkins, A., Krasilnikov, M., & Bure, V. (2019). Robust uncapacitated multiple allocation hub location problem under demand uncertainty: minimization of cost deviations. *Journal of Industrial Engineering International*, 15, 199-207.
- Mehregan, M., Jafarnezhad, A., & Mohammadi, M. (2018). Proposing a Multi-objective Model for Ground Transportation of Hazardous Materials in the Hub Network (Case Study: National Iranian Oil Products Distribution Company). *Industrial Management Journal*, 10(2), 201-220. doi:20.1001.1.20085885.1397.10.2.3.3 (in Persian)
- Meraklı, M., & Yaman, H. (2017). A capacitated hub location problem under hose demand uncertainty. *Computers & Operations Research*, 88, 58-70.
- Modares, A., Farimani, N. M., & Emroozi, V. B. (2023a). A new model to design the suppliers portfolio in newsvendor problem based on product reliability. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 19(6), 4112-4151. doi:10.3934/jimo.2022124
- Modares, A., Farimani, N. M., & Emroozi, V. B. (2023b). A vendor-managed inventory model based on optimal retailers selection and reliability of supply chain. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 19(5), 3075-3106.
- Modares, A., Kazemi, M., Emroozi, V. B., & Roozkhosh, P. (2023). A new supply chain design to solve supplier selection based on internet of things and delivery reliability. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 19(11), 7993-8028.
- Modares, A., Motahari, N., & Bafandegan Emroozi, V. (2022). Developing a Newsvendor Model based on the Relative Competence of Suppliers and Probable Group Decision-making. *Industrial Management Journal*, 14(1), 115-142. doi:10.22059/IMJ.2022.331988.1007872 (in Persian)
- Monemi, R. N., Gelareh, S., Nagih, A., & Jones, D. (2020). Bi-objective load balancing multiple allocation hub location: a compromise programming approach. *Annals of Operations Research*. doi:https://doi.org/10.1007/s10479-019-03421-w

- Motahari Farimani, N., Ghanbarzadeh, F., & Modares, A. (2022). A New Approach for Pricing Based on Passengers' Satisfaction. *Transportation Journal*, 61(2), 123-150.
- Nickel, S., Schöbel, A., & Sonneborn, T. (2001). Hub location problems in urban traffic networks. *Mathematical methods on optimization in transportation systems*, 95-107.
- O'Kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European journal of operational research*, 32(3), 393-404.
- O'Kelly, M. E. (1992). Hub facility location with fixed costs. *Papers in Regional Science*, 71(3), 293-306.
- O'Kelly, M. E., & Miller, H. J. (1994). The hub network design problem: a review and synthesis. *Journal of Transport Geography*, 2(1), 31-40.
- Peker, M., Kara, B. Y., Campbell, J. F., & Alumur, S. A. (2016). Spatial analysis of single allocation hub location problems. *Networks and Spatial Economics*, 16, 1075-1101.
- Rajabi, S., Roozkhosh, P., & Farimani, N. M. (2022). MLP-based Learnable Window Size for Bitcoin price prediction. *Applied Soft Computing*, 129, 109584.
- Roozkhosh, P., & Motahari Farimani, N. (2022). Designing a new model for the hub location-allocation problem with considering tardiness time and cost uncertainty. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 1-15. doi:10.1080/17509653.2022.2089261
- Roozkhosh, P., Pooya, A., & Agarwal, R. (2022). Blockchain acceptance rate prediction in the resilient supply chain with hybrid system dynamics and machine learning approach. *Operations Management Research*, 1-21.
- Rostami, B., Kämmerling, N., Buchheim, C., & Clausen, U. (2018). Reliable single allocation hub location problem under hub breakdowns. *Computers & Operations Research*, 96, 15-29.
- Shahin, M., Jabalameli PhD, M. S., & Jabbarzadeh PhD, A. (2017). Multi-modal and multi-product hierarchical hub location under uncertainty. *Industrial Management Journal*, 8(4), 625-658. doi:10.22059/imj.2017.59971 (in Persian)
- Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J., & O'Kelly, M. (1996). Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems. *European journal of operational research*, 94(3), 582-593.
- Sohn, J., & Park, S. (1998). Efficient solution procedure and reduced size formulations for p-hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 108(1), 118-126.
- Wandelt, S., Dai, W., Zhang, J., Zhao, Q., & Sun, X. (2021). An efficient and scalable approach to hub location problems based on contraction. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106955.
- Wu, Y., Qureshi, A. G., & Yamada, T. (2022). Adaptive large neighborhood decomposition search algorithm for multi-allocation hub location routing problem. *European Journal of Operational Research*, 302(3), 1113-1127.