

ارائه مدل یکپارچه مسأله مکان‌یابی هاب با رویکرد زمان‌بندی انعطاف‌پذیر در حمل‌ونقل هوایی

محمد قدیمی^۱، غلامرضا اسماعیلیان^{۲*}، مریم حامدی^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

خلاصه

در حال حاضر با توجه به شرایط تحریمی کشور، خطوط هوایی با محدودیت دسترسی به هواپیما مواجه هستند که این امر بر کارایی شبکه حمل‌ونقل هوایی کشور تأثیر گذاشته است. با این حال با برنامه‌ریزی و استفاده صحیح از هواپیماهای موجود و بهینه‌سازی مسیرها از طریق مسأله مکان‌یابی هاب می‌توان به بهره‌وری بهتری در این خصوص دست پیدا کرد و خسارات و هزینه‌های وارد شده ناشی از تحریم‌ها را کاهش داد. در این پژوهش، یک مدل یکپارچه برای مکان‌یابی هاب با رویکرد زمان‌بندی انعطاف‌پذیر در حمل‌ونقل هوایی ارائه شده است. این مدل علاوه بر تعیین مکان هاب‌ها، مسیر و زمان‌بندی حرکت هر هواپیما را نیز متناسب با مکان اولیه هریک از آن‌ها به صورت هم‌زمان و در شرایط محدودیت تعداد هواپیما، بهینه می‌کند. در این پژوهش برخلاف دیگر پژوهش‌های موجود در ادبیات موضوع، وجود وسیله نقلیه در گره‌ها و رسیدن مسافران هر وسیله نقلیه به عنوان پیش‌نیاز قطعی در زمان جابه‌جایی مسافران در نظر گرفته شده است که شرایط مسأله را به دنیای واقعی نزدیک‌تر کرده است. این مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شده و نتایج آن بر روی دو مجموعه داده‌ی CAB و مسافران هوایی ایران در سال ۱۴۰۱ اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهند که با توجه به فرضیات مدل، افزایش تعداد هاب‌ها، افزایش ظرفیت هواپیماها و توزیع هواپیماها در گره‌ها به جای متمرکز شدن آن‌ها در نقاط خاص می‌تواند به کاهش هزینه‌ها منجر شود، اما پیچیدگی مدل را نیز افزایش می‌دهد. در نهایت، پیشنهادهایی برای بهبود مدل در مطالعات آتی پیشنهاد شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

بازنگری ۱۴۰۳/۱۰/۲۱

پذیرش ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

مسأله مکان‌یابی هاب

مسیر یابی و سایل نقلیه

زمان‌بندی انعطاف‌پذیر

برنامه‌ریزی ناوگان

حمل‌ونقل هوایی

۱. مقدمه

هاب‌ها تسهیلاتی هستند که به عنوان نقطه تغییر مسیر^۲، مرتب‌سازی^۳، برقراری ارتباط^۴، تجمیع^۵ یا تقسیم بارهای حجیم برای جابجایی، خدمات‌رسانی می‌کنند. مزایای استفاده از هاب شامل (۱) هزینه حمل‌ونقل کمتر ناشی از تجمیع جریان‌ات و استفاده از صرفه‌جویی ناشی از مقیاس خصوصاً بین هاب‌ها (۲) کاهش هزینه‌ها از طریق ایجاد شبکه برای اتصال مبدأ/مقصد‌های پراکنده و (۳) خدمات‌رسانی بهتر [۱]. در یک سیستم شبکه‌هاب و اسپیک (گره‌های غیرهاب)، به جای

این که از خطوط اتصال مستقیم استفاده شود جریان‌های بین مبادی و مقاصد در هاب‌ها جمع‌آوری شده تا از صرفه‌جویی‌های ناشی از مقیاس بهره‌مند شوند. سپس این جریان‌ها از طریق هاب‌ها به سمت مقاصد خود ارسال می‌شوند. بنابراین با تعداد کمتری از خطوط اتصال، می‌توان به تعداد بیشتری از نقاط دسترسی پیدا کرد و این کار با هزینه‌های کمتری امکان‌پذیر است [2].

تفاوت اصلی بین مسائل مکان‌یابی تسهیلات (FLP^۶) و مسائل

* نویسنده مسئول: غلامرضا اسماعیلیان

تلفن: ۰۲۱-۲۳۳۲۰۰۰؛ پست الکترونیکی: gre@pnu.ac.ir

2. Switching

3. Sorting

4. Connecting

5. Consolidation

6. Facility Location Problems (FLPs)

همان‌گونه که بیان شد یکی از مزایای مسائل مکان‌یابی هاب کاهش تعداد مسیرها بوده که بالتبع موجب کاهش تعداد وسایل نقلیه موردنیاز می‌گردد و درنهایت منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود. درحال‌حاضر باتوجه به شرایط تحریمی کشور، خطوط هوایی با محدودیت در دسترسی به هواپیما و قطعات آن مواجه هستند که این امر بر کارایی شبکه حمل‌ونقل هوایی کشور و رضایت مسافریان چه از نظر هزینه‌های صورت گرفته و چه از نظر دسترسی به پروازهای مورد نظر تأثیر گذاشته است. با این حال با برنامه‌ریزی و استفاده صحیح از هواپیماهای موجود و بهینه‌سازی مسیرها از طریق مسئله مکان‌یابی هاب می‌توان به بهره‌وری بهتری در این خصوص دست پیدا کرد و خسارات و هزینه‌های وارد شده ناشی از تحریم‌ها را کاهش داد.

پژوهش‌های بسیاری در زمینه مکان‌یابی هاب انجام شده است اما باتوجه به ساده‌سازی‌های صورت گرفته در مدل‌های ارائه شده از مواردی چشم‌پوشی شده که می‌توانند تأثیر به‌سزایی در بهینگی و شدنی بودن مسائل در دنیای واقعی بگذارد. ازجمله این موارد می‌توان به مسیریابی وسایل نقلیه، زمان‌بندی ورود و خروج آن‌ها به گره‌ها و به‌طور کلی مدیریت ظرفیت و حرکت ناوگان اشاره نمود. موارد بیان شده از این حیث اهمیت بسیار زیادی دارند که تقدم و تأخر ورود و خروج وسایل نقلیه به گره‌ها را مشخص می‌کنند و موجب می‌شود بدانیم در هر لحظه چه تعداد و چه نوع وسیله نقلیه‌ای در هر گره وجود دارد که ندانستن آن ممکن است موجب خارج شدن مسئله از حالت شدنی بودن شود. به‌عنوان مثال ممکن است خروجی مسئله‌ای بدین صورت باشد که گره A و B به‌عنوان هاب انتخاب شده و مابقی گره‌ها نیز با آرایشی مشخص به این هاب‌ها متصل شوند. حال مشخص نیست این جریان قرار است طی چه بازه زمانی و با چه وسیله نقلیه‌ای از مبدأ به مقصد برود، تقدم و تأخر حرکت وسایل نقلیه چگونه است و وسایل نقلیه موجود قرار است چه مسیریایی را برای سرویس‌دهی بپیمایند. این چالش در صورت وجود محدودیت ناوگان نمود بیشتری خواهد داشت. در این مقاله قصد داریم مدلی ارائه نماییم که در آن با در نظر گرفتن محدودیت در تعداد وسایل نقلیه در دسترس و تعداد سفرهای مجاز هر وسیله نقلیه، مکان‌یابی هاب و مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه به‌صورت یکپارچه صورت گیرد. همچنین در مدل پیشنهادی، وسایل نقلیه الزامی به طی نمودن تور (که در آن نقطه شروع و پایان یکسان است) ندارند، آرایش اولیه آن‌ها مشخص است و بین حرکت آن‌ها و رسیدن مسافران همگام‌سازی صورت می‌گیرد. براین اساس سوالاتی که در این تحقیق به دنبال پاسخ به آن‌ها هستیم به‌شرح ذیل خواهد بود:

- آیا یکپارچه در نظر گرفتن مدل تأثیری در بهبود پاسخ دارد؟
- چگونه می‌توان مکان هاب‌ها را به‌گونه‌ای بهینه تعیین کرد تا هزینه‌های کلی شبکه حمل‌ونقل هوایی کاهش یابد؟
- توزیع هواپیماها در گره‌های مختلف به‌جای متمرکز شدن آن‌ها در نقاط خاص بر کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری چه تأثیری

مکان‌یابی هاب (HLP^1) در نوع تقاضای خدمات موردنیاز کاربران و عملکرد تسهیلات است. در مسائل FLP، خدمات در تسهیلات ارائه می‌شود و جریان‌ها از گره‌های تقاضا آغاز شده و مقصد آن‌ها تسهیلات است. تصمیمات مربوط به طراحی شبکه و مسیریابی معمولاً براساس الگوی تخصیص گره‌های تقاضا به تسهیلات اختصاص‌یافته تعیین می‌شود. در مقابل در مسائل HLP، تقاضای خدمات بین گره‌های مبدأ/مقصد (O/D) است و تسهیلات هاب به‌عنوان گره‌های میانی در مسیرهای O/D عمل می‌کنند که به‌عنوان نقاط انتقال و تجمیع استفاده می‌شوند. هنگامی که یک هاب به‌عنوان نقطه انتقال (تغییر مسیر یا مرتب‌سازی) عمل می‌کند، به جریان‌ها اجازه می‌دهد که پردازش شده و به هاب‌های دیگر یا گره‌های O/D با تعداد مسیرهای بسیار کمتر از آنچه در اتصالات مستقیم نیاز است، هدایت شوند. به‌عنوان نقطه تجمیع (تمرکز یا شکسته شدن)، یک هاب به جریان‌ها اجازه می‌دهد که جمع و یا تقسیم شوند و از این طریق صرفه‌جویی‌های ناشی از مقیاس را در هزینه‌های حمل‌ونقل یا ارتباطات بین هاب‌ها و بین گره‌های O/D و هاب‌ها ایجاد کند [۳].

تفاوت دیگر بین FLP و HLP این است که در مدل‌های مکان‌یابی هاب بدون ظرفیت، الگوی تخصیص تکی گره‌های غیرهاب به هاب‌ها لزوماً یک استراتژی تخصیص بهینه نیست. در بیشتر مسائل FLP بدون ظرفیت، زمانی که مکان تسهیلات مشخص باشد، هزینه جریان با تخصیص هر گره تقاضا به نزدیک‌ترین (یا کم هزینه‌ترین) تسهیلات باز به حداقل می‌رسد. اما در HLP، زمانی که مکان هاب‌ها مشخص باشد، هزینه جریان با پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر در شبکه‌ای که توسط هاب‌های انتخاب شده برای هر جفت O/D ایجاد شده، به حداقل می‌رسد که این منجر به یک الگوی تخصیص چندگانه گره‌های O/D به هاب‌ها می‌شود. به‌همین دلیل، هر دو نسخه تخصیص تکی و چندگانه در مسائل HLP وجود دارند. در مسائل مکان‌یابی هاب با تخصیص تکی، گره‌های O/D باید دقیقاً به یک هاب اختصاص داده شوند که این امر دشوارتر است. در این حالت، تمام جریان‌های تقاضا از یک مبدأ به یک مقصد از طریق هاب هدایت می‌شوند. در مسائل مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه، هر گره O/D می‌تواند به بیش از یک هاب اختصاص داده شود. الگوهای تخصیص چندگانه تصمیمات مسیریابی را ساده‌تر کرده و انعطاف‌پذیری بیشتری در شبکه‌های هاب فراهم می‌کند و منجر به راه‌حلی با هزینه‌های جریان کمتر می‌شود. با این حال، این موضوع می‌تواند هزینه طراحی شبکه را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد، چراکه تعداد بیشتری از لینک‌ها باید در شبکه‌هاب فعال شوند [۳].

مسائل مکان‌یابی هاب در خطوط هوایی مسافربری و باری، حمل‌ونقل سریع، تحویل پستی، بخش‌های حمل‌ونقل کامیونی و حمل‌ونقل عمومی کاربرد دارند. علاوه‌براین، مفهوم هاب‌ها به سایر حوزه‌ها نیز گسترش یافته است، ازجمله مخابرات، مدیریت انرژی، شبکه‌های اجتماعی [۴].

خواهد گذاشت؟

- چگونه می‌توان مسیر و زمان حرکت هواپیماها را به‌طور هم‌زمان و باتوجه به محدودیت‌های تعداد هواپیماها و ظرفیت آن‌ها بهینه‌سازی کرد؟
 - چگونه می‌توان فرآیند همگام‌سازی بین حرکت هواپیماها و زمان رسیدن مسافران را با استفاده از مدل زمان‌بندی انعطاف‌پذیر پیاده‌سازی کرد؟
 - مسافران هر گره با کدام هواپیماها و در چه زمانی و از چه مسیرهایی خود را مقصد نهایی می‌رسانند؟
- در ادامه ساختار مقاله به این صورت خواهد بود که ابتدا در بخش ۲ مروری بر ادبیات موضوع خواهیم داشت، سپس در بخش ۳ مدل پیشنهادی را ارائه و سپس مثال‌های عددی را حل و بررسی خواهیم کرد و نهایتاً در بخش آخر به بیان نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی خواهیم پرداخت.

۲. مرور ادبیات

مکان‌یابی هاب در پنج دهه گذشته از یک مسأله ساده مکان‌یابی تسهیلات شامل تحقیق در عملیات، مخابرات و مفاهیم پردازش سیگنال به یک حوزه مکان‌یابی پیشرفته‌تر تبدیل شده است که چندین جنبه از تحقیق در عملیات، اقتصاد، جغرافیا، علم حمل‌ونقل، طراحی شبکه و مخابرات را به یکدیگر متصل کرده است [۵,۶,۷]. شبکه مکان‌یابی هاب اولین بار توسط گلدمن [۸] معرفی شد، اما اولین فرمولاسیون ریاضی مسأله مکان‌یابی هاب توسط اوکلی [۹] به‌عنوان یک مورد خاص از مسأله مکان‌یابی تسهیلات ارائه شد. از آن زمان تاکنون مطالعات بسیار زیادی در حوزه مکان‌یابی هاب صورت گرفته است که در ادامه برای تمرکز بیشتر و شناسایی بهتر شکاف‌های مطالعاتی موجود، به بررسی مقالات این حوزه که در مطالعات خود مباحث مربوط به مسیر یابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه را مطرح کرده‌اند، خواهیم پرداخت.

۲-۱. مکان‌یابی هاب و مسیر یابی وسایل نقلیه

یکی از مهم‌ترین انواع مسائل مکان‌یابی هاب، مسأله مکان‌یابی-مسیریابی هاب^۱ است که هم‌زمان با تعیین مکان هاب‌ها، به بهینه‌سازی تصمیمات مسیر یابی نیز می‌پردازد. نیاز به در نظر گرفتن هم‌زمان تصمیمات مربوط به مکان‌یابی و مسیر یابی به‌طور طبیعی در مواردی که گره‌هایی با تقاضای ناکافی برای توجیه اتصال مستقیم به هاب‌ها دارند منجر به ایجاد مسأله مکان‌یابی-مسیریابی هاب چند به چند (MMHLRP^۲) شد که توسط نیگی و سلهی [۱۰] معرفی گردید. در این موارد، علاوه بر مکان‌یابی هاب‌ها و مسیر یابی جریان‌ها از طریق شبکه، باید تورهای محلی ایجاد شود که گره‌های غیرهاب را به هاب‌ها متصل کنند، تا جریان‌ها از مبادی مختلف به مقاصد مختلف با حداقل هزینه منتقل شوند. رئال و همکاران [۱۱] یک مدل مکان‌یابی-

مسیریابی هاب با حمل‌ونقل چندوجهی ارائه کرده‌اند که در آن الزامی برای وجود هاب در هر مسیر وجود نداشته و وسایل نقلیه می‌توانند مسیر خود را از هر گرهی آغاز نموده، به تعدادی از گره‌ها خدمات‌رسانی کنند و مجدداً به گره اولیه بازگردند که البته انتقال جریان بین وسایل نقلیه فقط در هاب‌ها مجاز است، از این‌رو جریان تقاضا می‌تواند از مبدأ تا مقصد از یک وسیله نقلیه یا مجموعه‌ای از وسایل نقلیه استفاده کند. یکی از مزیت‌های این مقاله این است که ساختار توپولوژیکال خاصی (اعم از ساختار کامل یا ستاره‌ای و غیره) از پیش فرض گرفته نشده و توسط مدل مشخص می‌گردد. ناوگان حمل‌ونقل ناهمگن بوده و صرفه‌جویی ناشی از مقیاس نه فقط براساس سایز که براساس نوع حمل‌ونقل استفاده شده (دریایی، ریلی، زمینی و هوایی) تعیین می‌گردد. باتوجه به در نظر گرفتن محدودیت برای وسایل نقلیه، امکان شکسته شدن جریان وجود دارد و نهایتاً هدف مسأله کمینه کردن هزینه طراحی شبکه و مسیر یابی وسایل نقلیه است. فریتاس و همکاران [۱۲] یک الگوریتم ژنتیک تصادفی برای حل مسأله مکان‌یابی و مسیر یابی مراکز انتقال دوسطحی با تورهای جهت‌دار ارائه دادند. آن‌ها هدف خود را حداقل کردن هزینه‌های انتقال جریان تقاضا از مبادی به مقاصد در نظر گرفتند. ابن العوفی و همکاران [۱۳] یک مسأله مسیر یابی p-هاب مرکز سبز دوهدفه را معرفی کردند که زمان سرویس‌دهی و انتشار CO₂ ناشی از حمل‌ونقل را کمینه می‌کند. آن‌ها برای حل مدل ارائه شده یک رویکرد فراابتکاری ارائه کردند. گو و همکاران [۱۴] یک روش برنامه‌ریزی پایدار جامع برای مسأله مکان‌یابی میکرو هاب و مسیر یابی وسایل نقلیه با چند انبار و گسترش آن برای در نظر گرفتن بسته‌های برگشتی مختلف را ارائه کردند. آن‌ها همچنین یک مدل بهینه‌سازی استوار برای مدیریت عدم قطعیت در نوسانات قیمت اجاره میکرو هاب‌ها را توسعه دادند. محمودی [۱۵] با تفکیک تصمیمات مربوط به زمان‌بندی و مسیر یابی وسایل نقلیه از تصمیم مربوط به مکان‌یابی تسهیلات هاب، از یک رویکرد ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های سناریو محور و تکنیک مدل‌سازی حداقل پشیمنی استفاده کرده و سپس به زمان‌بندی و مسیر یابی مسائلی با یک هاب مشخص با دوره‌های زمانی تحویل در همان روز و تحویل در فردا پرداخته است.

نقطه اشتراک تمام این پژوهش‌ها انجام مسیر یابی وسایل نقلیه در قالب یک تور است بدین صورت که وسیله نقلیه یا می‌بایست پس از انجام یک تور به نقطه شروع حرکت خود بازگردد. اگرچه این مسأله در مواردی که جابجایی بار و یا انجام امور مربوط به پست صورت می‌گیرد می‌تواند بسیار مفید واقع شود، اما در مواردی که موضوع جابجایی مسافر با هواپیما است بسیار دور از ذهن به نظر می‌رسد چراکه ممکن است تقاضایی برای رسیدن به مقصد خود نیاز باشد ابتدا در یک تور توسط یک وسیله نقلیه چندین گره را پیموده تا به هاب برسد سپس آنجا نیز با تغییر وسیله نقلیه خود مجدداً چندین گره دیگر را

بپیماید تا به مقصد برسد. به‌عنوان مثال فرض کنید در شکل (۱)-الف که هر وسیله نقلیه در قالب یک تور حرکت می‌کند مسافری قصد داشته‌باشد از مبدأ از گره ۵ به گره ۱۲ سفر کند، برای این کار باید مسیر ۵←۶←۷←۸ را با وسیله نقلیه V_1 طی کند، سپس باید مسیر گره ۸←۲ را با وسیله نقلیه V_4 طی کند و نهایتاً مسیر ۲←۱۰←۱۱←۱۲ را با وسیله نقلیه V_3 بپیماید تا به مقصد خود برسد. حال آن‌که در شکل (۱)-ب تنها با سه پرواز ۵←۱۴ وسیله نقلیه V_1 ، ۱←۲ با وسیله نقلیه V_2 و ۲←۱۲ با وسیله نقلیه V_3 به مقصد خود برسد. بنابراین برای رفع این شکاف در پژوهش حاضر، مسیریابی انعطاف‌پذیری را به‌ازای هر وسیله نقلیه ارائه خواهیم کرد که وسایل نقلیه الزامی به بازگشت به نقطه شروع حرکت خود نداشته باشند و مسافران نیز مجبور به طی کردن تورهای طولانی برای رسیدن به مقصد نهایی خود نباشند.

۲-۲. مکان‌یابی هاب و زمان بندی وسایل نقلیه

بعد زمان در تحقیقات مربوط به مکان‌یابی هاب، علی‌رغم اهمیت بالای آن در طراحی و عملکرد سیستم‌های هاب، به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته‌است. بعد زمان و همگام‌سازی^۱ نقش کلیدی در صرفه‌جویی ناشی از مقیاس در شبکه‌های حمل‌ونقل ایفا می‌کنند و زمان اغلب مرتبط‌ترین معیار برای کیفیت خدمات در مسائل مکان‌یابی هاب است [۱]. در اکثر پژوهش‌هایی که بعد زمان مورد توجه قرار گرفته، از زمان صرفاً به‌عنوان معیاری در راستای ایجاد پنجره زمانی و اعمال محدودیت حداکثر زمان در مدل استفاده شده که ازجمله این موارد می‌توان به [۲۹، ۳۸-۱۶، ۱۴، ۱۱] اشاره نمود.

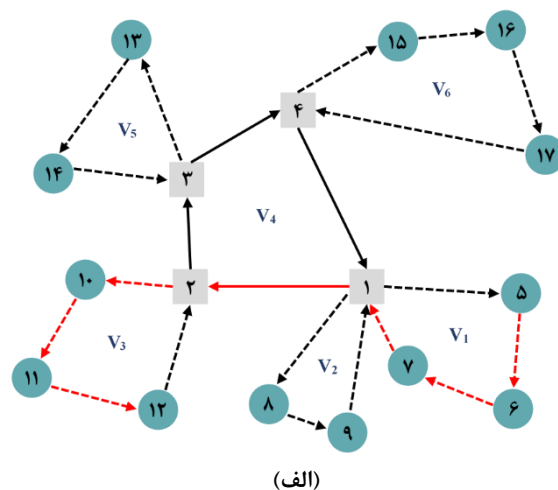
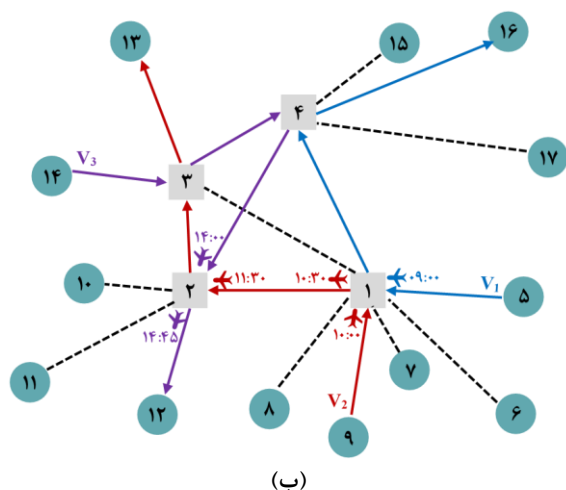
یکی از کاربردهای مهمی که می‌توان برای بعد زمان متصور بود این است که اگر وسیله نقلیه‌ای از یک گره اسپیک به گره هاب برود آیا وسیله نقلیه‌ای در آنجا وجود دارد که جریان بار (مسافر) را به گره تقاضا یا به هاب بعدی برساند یا خیر. در پژوهش‌هایی همچون [۳۱، ۳۰، ۱۵] سعی شده است وجود وسیله نقلیه در هاب مورد توجه قرار گیرد، اما همچنان نکته مغفول مانده این است باید دقیقاً مشخص شود مسافر چه زمانی به هاب می‌رسد و با کدام وسیله نقلیه و در چه زمانی به سمت مقصد بعدی حرکت می‌کند. نکته حائز اهمیت در اینجا این است که ممکن است حالتی به‌وجود بیاید که مسافرانی که از گره‌های مختلف به یک هاب خاص می‌رسند در زمان کمتری یک وسیله نقلیه را تکمیل نموده و نیازی به صرف زمان بیشتر برای رسیدن مابقی جریان از گره‌های دیگر نباشد. این موضوع نیز در پژوهش‌های [۳۲-۳۰] علی‌رغم وارد کردن بعد زمان، در مسأله مورد توجه قرار نگرفته‌است چراکه آن‌ها فرض کرده‌اند که ابتدا بایستی کل جریانات از اسپیک‌ها به هاب‌ها انتقال یافته و سپس حرکت به سمت گره بعدی صورت پذیرد.

ما در این پژوهش قصد داریم ضمن رفع شکاف‌های اشاره شده، مدلی ارائه نماییم که اولاً مشخص نماید در هر لحظه آیا وسایل نقلیه‌ای در هاب وجود دارد تا مسافران را به گره بعدی منتقل نماید یا خیر.

ثانیاً در صورت وجود وسیله نقلیه، چه زمانی و پس از رسیدن کدام مسافران از کدام گره‌ها وسیله نقلیه به سمت گره بعد خود حرکت می‌کند و به نوعی بین حرکت هواپیما و رسیدن مسافران همگام‌سازی انجام دهیم. به‌منظور توضیح بیشتر، فرض کنید در شکل (۱)-ب مسافرانی از گره‌های ۵ و ۹ و ۱۴ قصد دارند به گره ۱۲ بروند. حال باتوجه به مسیرهای مشخص شده برای هواپیماهای V_1 ، V_2 و V_3 و زمان‌های رسیدن آن‌ها به هاب‌های ۱ و ۲ فرآیند جابجایی مسافران مذکور به این‌صورت خواهد بود: مسافرانی که مبدأ آن‌ها گره ۵ است با هواپیمای V_1 در ساعت ۹ به هاب ۱ می‌رسند اما در آن ساعت هواپیمایی در هاب ۱ وجود ندارد که آن‌ها را به هاب ۲ ببرد. در ساعت ۱۰ مسافرانی که مبدأ آن‌ها گره ۹ است با هواپیمای V_2 به هاب ۱ می‌رسند و چون هواپیمای V_2 در مسیر بعدی خود قرار است به سمت هاب ۲ حرکت کند می‌تواند پس از گذراندن حداقل زمان سرویس در گره ۱، مسافرانی که مبدأ آن‌ها گره ۵ بوده را (به‌همراه دیگر مسافرانی که در هاب ۱ هستند و مقصد بعدی آن‌ها هاب ۲ است) نیز سوار کرده و به سمت هاب ۲ جابجا نماید. این هواپیما در ساعت ۱۱:۳۰ به هاب ۲ می‌رسد اما مجدداً هواپیمایی در این هاب وجود ندارد تا مسافرانی که قصد دارند به گره ۱۲ بروند را با خود ببرد. ساعت ۱۴ هواپیمای V_3 مسافرانی که مقصد آن‌ها هاب ۲ بوده را به این گره منتقل می‌کند. در این هواپیما احتمالاً مسافرانی که مبدأ آن‌ها گره ۱۴ بوده و قصد دارند به گره ۱۲ بروند نیز حضور دارند. این هواپیما نیز پس از گذراندن حداقل زمان لازم جهت سرویس‌دهی در ساعت ۱۴:۴۵ به سمت گره ۱۲ حرکت کرده و مسافرانی که قصد سفر به گره ۱۲ داشته‌اند را با خود حمل می‌کند. در تمامی مراحل بیان شده یکی از پیش‌نیازهای مهم جهت حرکت هواپیما، رسیدن تعداد مسافران هر هواپیما به مقدار بهینه خود و عدم تجاوز از ظرفیت هواپیماست.

۲-۳. مکان‌یابی هاب و محدودیت در وسایل نقلیه

یکی از محدودیت‌های مهمی که در دنیای واقعی وجود دارد، محدودیت در تعداد وسایل نقلیه است. همان‌طور که در بخش مقدمه نیز اشاره شد باتوجه به تحریم‌های ظالمانه، در کشور با کمبود ناوگان هوایی روبه‌رو هستیم که این موضوع طلب می‌کند برنامه‌ریزی خود را با این پیش‌فرض مهم انجام دهیم. در ادبیات موضوع پژوهش‌های بسیار محدودی وجود دارند که به‌نوعی محدودیت وسیله نقلیه دارند اما یا این محدودیت را با خرید وسیله نقلیه جدید در مدل جبران می‌کنند مانند [۲۸]، یا صرفاً ظرفیت کلی هواپیماها برای حرکت بین هاب‌ها را بررسی می‌کنند نه ظرفیت هواپیماها برای جابجایی مسافران بین تمامی گره‌ها مانند [۳۰] و یا مانند [۳۹] از قبل تعداد وسیله نقلیه مورد نیاز برای جابجایی جریان موجود را مشخص می‌کنند. در این مقاله تعداد هواپیماها و حداکثر پرواز روزانه آن‌ها محدود فرض شده و آرایش اولیه هواپیماها نیز ازپیش مشخص است و براساس این موارد مسیریابی و زمان‌بندی هر هواپیما صورت خواهد گرفت.



شکل (۱). (الف) مسیر وسایل نقلیه در قالب تور. (ب) مسیر وسایل نقلیه بدون محدودیت تور

- تعداد هاب‌ها از قبل معلوم است.
- محدودیتی در ظرفیت هاب‌ها وجود ندارد.
- گره‌های غیرهاب نمی‌توانند به یکدیگر مستقیماً متصل شوند.
- تقاضا و هزینه‌ها قطعی بوده و از قبل معلوم است.
- ناوگان حمل‌ونقل همگن است.
- تعداد هواپیماهای موجود و آرایش اولیه آن‌ها از قبل معلوم است.
- هر هواپیما تعداد پرواز محدودی در روز می‌تواند انجام دهد که مقدار آن از قبل معلوم است. ظرفیت و سرعت هواپیماها از قبل معلوم است.
- برای هر هواپیما پرواز در مسیر تکراری مجاز نبوده اما رد شدن از گره تکراری بلامانع است.
- مسافران تنها در صورتی می‌توانند از یک گره به گره دیگر بروند که اولاً برای این کار هواپیمایی وجود داشته باشد و ثانیاً هواپیمای موجود ظرفیت داشته باشد.
- امکان خرد شدن (تقسیم) تقاضا وجود دارد.

۲-۳. فرمول‌بندی

به‌منظور مدل‌سازی مسأله پیشنهادی، علائم مربوط به فرمول‌بندی مسأله مطابق جداول (۱) تا (۳) تعریف شده است.

جدول (۱). تعریف مجموعه‌ها و اندیس‌ها

نماد	تعریف
N	مجموعه تمام گره‌ها (فرودگاه‌ها)
V	مجموعه تمام هواپیماها
V'	مجموعه تمام هواپیماها به‌همراه هواپیمای مجازی *
L	مجموعه پروازهای مجاز هواپیماها
L'	مجموعه پروازهای مجاز هواپیماها به‌همراه پرواز مجازی *
$i, j, k, l, m, n \in N$	اندیس نمایش گره‌ها (فرودگاه‌ها)
$v \in V$	اندیس نمایش یک هواپیمای خاص که به نوع a تعلق دارد
$s \in L$	اندیس نمایش پرواز kam هواپیمای v که مقادیر مجاز آن عبارتند از $\{1, 2, \dots, L_{max}\}$

در جدول (۱۰) خلاصه‌ای از مقالات بیان شده در این بخش آورده شده است.

باتوجه به موارد بیان شده نوآوری‌های این پژوهش به‌شرح ذیل خواهد بود:

(۱) انجام مسیریابی به‌ازای هر هواپیما بدون وجود محدودیت تور و الزام وسایل نقلیه به بازگشت به نقطه شروع و امکان گذشتن وسایل نقلیه از گره‌های تکراری

(۲) بررسی وجود وسیله نقلیه در گره به‌عنوان پیش‌نیاز قطعی در جابجایی مسافران

(۳) همگام‌سازی بین حرکت هواپیماها و زمان رسیدن مسافران

(۴) زمان‌بندی انعطاف‌پذیر وسایل نقلیه. این انعطاف‌پذیری ناشی از موارد زیر است:

- تغییر تقاضا می‌تواند باعث تغییر زمان‌بندی وسایل نقلیه شود.
- تغییر تعداد وسایل نقلیه و آرایش اولیه آن‌ها می‌تواند باعث تغییر زمان‌بندی شود.
- عدم وجود بازه‌های زمان‌بندی ازپیش مشخص شده.

(۵) وجود محدودیت وسایل نقلیه و الزام جابجایی تمامی مسافران با منابع موجود

(۶) یکپارچگی تصمیم‌گیری درخصوص مکان‌یابی هاب و موارد بیان شده در بندهای قبل.

۳. بیان مسأله و فرمول‌بندی

۳-۱. بیان مسأله

مسأله‌ای که قصد داریم آن را مدل‌سازی کنیم، به‌طور کلی یک مسأله مکان‌یابی هاب با تخصیص تکی است که می‌بایست از بین N گره که فرودگاه‌های ما هستند، p گره را به‌عنوان هاب انتخاب کنیم و هر گره غیرهاب را به یکی از این هاب‌ها تخصیص دهیم. تقاضای دوبهدوی گره‌ها می‌بایست با استفاده از ناوگان همگن موجود که قرار است برای هر کدام مسیریابی و زمان‌بندی حرکت صورت گیرد به‌سمت مقصد خود به‌گونه‌ای جابجا شوند که حداقل هزینه را ایجاد کنند. مفروضات مسأله نیز به‌شرح زیر می‌باشد:

$$\sum_{k \in N} x_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$x_{ik} \leq x_{kk} \quad \forall i, k \in N \quad (4)$$

$$z_{ij}^{vs} \leq x_{ij} + x_{ii} \quad \forall i \in N, j \in H, i \neq j, v \in V, s \in L \quad (5)$$

$$z_{ji}^{vs} \leq x_{ij} + x_{ii} \quad \forall i \in N, j \in H, i \neq j, v \in V, s \in L \quad (6)$$

$$\sum_{v \in V'} \sum_{s \in L'} z_{ii}^{vs} = 0 \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} z_{ij}^{vs} \leq 1 \quad \forall v \in V, s \in L \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} z_{ji}^{v(s+1)} \leq \sum_{i \in N} z_{ij}^{vs} \quad \forall j \in N, v \in V, s \in L \quad (9)$$

$$\sum_{s \in L} z_{ij}^{vs} \leq 1 \quad \forall i, j \in N, v \in V \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N} z_{ij}^{v1} \leq a_{iv} \quad \forall i \in N, v \in V \quad (11)$$

محدودیت‌های مربوط به تخصیص مسافر به هواپیما و مسیریابی

مسافران:

$$\sum_{k \in N} \sum_{v_1 \in V} \sum_{v_2 \in V'} f_{ijk}^{v_1 v_2} = 1 \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (12)$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{v_1 \in V} \sum_{v_2 \in V'} f_{ijk}^{v_1 0} = 1 \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (13)$$

$$\sum_{v \in V} f_{ijk}^{v v_1} \cdot w_{ij} = \sum_{m \in N} \sum_{v \in V'} f_{ijkm}^{v_1 v} \cdot w_{ij} \quad \forall i, j, k \in N, k \neq i, k \neq j, v_1 \in V \quad (14)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v_2 \in V'} f_{ijmn}^{v_1 v_2} \cdot w_{ij} \leq Q \quad \forall m, n \in N, v_1 \in V \quad (15)$$

$$\hat{f}_{ijmn}^{v_1 v_2} \leq \sum_{s \in L} z_{mn}^{v_1 s} \quad \forall i, j, m, n \in N, v_1 \in V, v_2 \in V' \quad (16)$$

$$f_{ijmn}^{v_1 v_2} \leq \hat{f}_{ijmn}^{v_1 v_2} \quad \forall i, j, m, n \in N, v_1 \in V, v_2 \in V' \quad (17)$$

محدودیت‌های مربوط به زمان‌بندی هواپیماها:

$$ts_{jk}^v \geq te_{ij}^v + ST + M \cdot (z_{jk}^{vs} + z_{ij}^{v(s-1)} - 2) \quad \forall i, j, k \in N, v \in V, s \in L \quad (18)$$

$$te_{ij}^v \geq ts_{ij}^v + t_{ij} + M \cdot \left(\sum_{s \in L} z_{ij}^{vs} - 1 \right) \quad \forall i, j \in N, v \in V \quad (19)$$

$$ts_{kn}^{v_2} \geq te_{mk}^{v_1} + M \cdot (\hat{f}_{ijmk}^{v_1 v_2} \cdot \hat{f}_{ijkn}^{v_2 v_3} - 1) \quad \forall m, k, n \in N, v_1, v_2 \in V \quad (20)$$

$$TO \geq te_{ij}^v \quad \forall i, j \in N, v \in V \quad (21)$$

محدودیت‌های مربوط به تعریف دامنه متغیرها

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in N \quad (22)$$

$$z_{ij}^{vs} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N, v \in V, s \in L \quad (23)$$

$$\hat{f}_{ijmn}^{v_1 v_2} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, m, n \in N, v_1 \in V, v_2 \in V' \quad (24)$$

$$0 \leq f_{ijmn}^{v_1 v_2} \leq 1 \quad (25)$$

جدول (۲). تعریف پارامترها

نماد	تعریف
w_{ij}	مقدار تقاضای مسافرت از گره i به گره j
C_{ij}	هزینه عملیاتی سفر از گره i به گره j به‌ازای هر صندلی
CA	هزینه ثابت هواپیما به‌ازای هر پرواز
CT	هزینه ثابت هر ساعت عملیات پرواز در کل شبکه
α	نرخ تخفیف هزینه وسیله نقلیه در مسیر بین گره‌های کاندید
Q	ظرفیت هواپیما
t_{ij}	زمان سفر از گره i به گره j
ST	حداقل زمان موردنیاز هر هواپیما در هر فرودگاه برای ارائه خدمت
p	تعداد کل هاب‌هایی که باید مکان‌یابی شوند
a_{iv}	در صورتی که گره اولیه ای که هواپیما v در آن مستقر است گره i باشد مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد
M	عدد مثبت بسیار بزرگ

جدول (۳). جدول تعریف متغیرها

نماد	تعریف
x_{ik}	در صورتی که گره i به گره k متصل شود مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد
x_{kk}	در صورتی که گره k به‌عنوان هاب انتخاب شود مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد
z_{ij}^{vs}	در صورتی که هواپیما v در s امین پرواز خود از گره i به گره j برود مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد
$\hat{f}_{ijmn}^{v_1 v_2}$	در صورتی که درصدی از تقاضای w_{ij} ابتدا با هواپیما v_1 مسیر m به n را پیموده و سپس مسیر بعدی خود را با هواپیما v_2 بپیماید مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد
$f_{ijmn}^{v_1 v_2}$	درصدی از تقاضای w_{ij} که با هواپیما v_1 مسیر m به n را پیموده و سپس مسیر بعدی را با هواپیما v_2 می‌پیماید
ts_{ij}^v	زمان شروع پرواز هواپیما v از گره i به گره j
te_{ij}^v	زمان پایان پرواز هواپیما v از گره i به گره j
TO	مدت زمان عملیات جابجایی مسافران

باتوجه به تعاریف صورت گرفته مدل مسئله پیشنهادی به‌صورت

ذیل فرمول‌بندی می‌گردد:

تابع هدف:

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{j \in N} \sum_{l \in N} w_{ij} (C_{ik} x_{ik} + \alpha C_{kl} x_{ik} x_{jl} + C_{jl} x_{jl}) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v \in V} \sum_{s \in L} CA \cdot z_{ij}^{vs} + CT \cdot TO \quad (1)$$

محدودیت‌های مربوط به مکان‌یابی هاب و تخصیص گره‌ها:

$$\sum_{k \in N} x_{kk} = p \quad (2)$$

پرواز هواپیما بعد از رسیدن مسافران است نیز محدودیتی غیرخطی است که یافتن جواب بهینه مسئله را به لحاظ محاسباتی با پیچیدگی بسیار زیادی روبه‌رو می‌کند. به همین دلیل ابتدا برای رفع مشکل غیرخطی بودن تابع هدف، متغیر y_{ijkl} را که یک متغیر باینری است، تعریف می‌کنیم. این متغیر زمانی که گره i به هاب k و گره j به هاب l وصل باشد مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. به این ترتیب تابع هدف به صورت ذیل تغییر پیدا کرده و محدودیت‌های (۲۹) تا (۳۲) هم به مدل اضافه می‌شوند:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{j \in N} \sum_{l \in N} w_{ij} (C_{ik}x_{ik} + \alpha C_{kl}y_{ijkl} \\ & + C_{jl}x_{jl}) \\ & + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v \in V} \sum_{s \in L} CA \cdot z_{ij}^{vs} \\ & + CT \cdot TO \end{aligned} \quad (28)$$

$$y_{ijkl} \leq x_{ik} \quad \forall i, j, k, l \in N \quad (29)$$

$$y_{ijkl} \leq x_{jl} \quad \forall i, j, k, l \in N \quad (30)$$

$$x_{ik} + x_{jl} - 1 \leq y_{ijkl} \quad \forall i, j, k, l \in N \quad (31)$$

$$y_{ijkl} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, l \in N \quad (32)$$

همچنین برای خطی‌سازی محدودیت (۲۰) می‌توان این محدودیت را با محدودیت (۳۳) جایگزین نمود:

$$\begin{aligned} ts_{kn}^{v_2} & \geq te_{mk}^{v_1} + M \cdot (\hat{f}_{ijmk}^{v_1v_2} + \hat{f}_{ijkn}^{v_2v_3} - 2) \\ & \forall i, j, m, n, k \in N, \quad v_1, v_2 \in V, \\ & \quad v_3 \in V', \quad s_1, s_2 \in L \end{aligned} \quad (33)$$

اما این محدودیت نیز باتوجه به تعداد زیاد اندیس‌ها در قسمت سور عمومی، از کارایی لازم برای کاهش پیچیدگی مسئله برخوردار نبود و موجب قابل حل شدن مدل نگردید به همین دلیل برای رفع مشکل این محدودیت، متغیر باینری $Pr_{mkn}^{v_1v_2}$ را تعریف می‌کنیم. این متغیر در صورتی که مسافری وجود داشته باشد که ابتدا مسیر m به k را با هواپیمای v_1 و سپس مسیر k به n را با هواپیمای v_2 بپیماید مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. بنابراین محدودیت (۲۰) به صورت زیر بازنویسی و محدودیت‌های (۳۵) تا (۳۸) نیز به مدل اضافه می‌شوند:

$$ts_{kn}^{v_2} \geq te_{mk}^{v_1} + M \cdot (Pr_{mkn}^{v_1v_2} - 1) \quad \forall m, k, n \in N, \quad v_1, v_2 \in V \quad (34)$$

$$Pr_{mkn}^{v_1v_2} \leq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \hat{f}_{ijmk}^{v_1v_2} \quad \forall m, k, n \in N, \quad v_1, v_2 \in V \quad (35)$$

$$Pr_{mkn}^{v_1v_2} \leq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v_2 \in V'} \hat{f}_{ijkn}^{v_1v_2} \quad \forall m, k, n \in N, \quad v_1, v_2 \in V \quad (36)$$

$$Pr_{mkn}^{v_1v_2} \geq \hat{f}_{ijmk}^{v_1v_2} + \hat{f}_{ijkn}^{v_2v_3} - 1 \quad \forall i, j, k, m, n \in N, \quad v_1, v_2 \in V, \quad v_3 \in V' \quad (37)$$

$$Pr_{mkn}^{v_1v_2} \in \{0,1\} \quad \forall m, k, n \in N, \quad v_1, v_2 \in V \quad (38)$$

به این ترتیب مدل خطی شده شامل تابع هدف (۲۸) به همراه محدودیت‌های (۲) تا (۱۹)، (۲۱) تا (۲۷)، (۲۹) تا (۳۲) و (۳۴) تا (۳۸) می‌باشد.

$$\forall i, j, m, n \in N, \quad v_1 \in V, \quad v_2 \in V' \quad (26)$$

$$ts_{ij}^v \geq 0 \quad \forall i, j \in N, \quad v \in V$$

$$te_{ij}^v \geq 0 \quad \forall i, j \in N, \quad v \in V \quad (27)$$

تابع هدف شامل مینیمم کردن هزینه متغیر انتقال مسافران بین گره‌ها، هزینه ثابت هر پرواز و هزینه هر ساعت عملیات پروازی است. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که دقیقاً تعداد p گره به عنوان هاب انتخاب می‌شوند. محدودیت (۳) تضمین می‌کند که هر گره دقیقاً به یک هاب متصل شود. محدودیت (۴) تضمین می‌کند که گره‌های غیرهاب فقط به گره‌های هاب می‌توانند متصل شوند. محدودیت‌های (۵) و (۶) تضمین می‌کنند که پرواز فقط بین گره‌هایی که به یکدیگر متصل هستند می‌تواند انجام شود. محدودیت (۷) تضمین می‌کند پروازی که مبدأ و مقصدش یکسان است انجام نشود. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که هر هواپیما در هر پرواز حداکثر در یک مسیر بتواند حرکت کند. محدودیت (۹) توالی پروازهای یک هواپیما را مشخص می‌کند؛ به عبارت دیگر تضمین می‌کند که هر هواپیما از همان گرهی که در سفر قبل به آنجا آمده می‌تواند پرواز بعدی خود را انجام دهد. محدودیت (۱۰) از ایجاد مسیر (یال) تکراری برای هر هواپیما جلوگیری می‌کند. منظور از مسیر تکراری، مسیری است که گره ابتدایی و انتهایی مسیر یکسان باشند بنابراین در صورتی که هواپیما مسیر i به j را پرواز کند، ممنوعیتی برای پرواز از j به i نخواهد داشت. همچنین ممنوعیتی برای ویزیت گره تکراری وجود ندارد. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند شروع حرکت هر هواپیما از گره اولیه‌ای که هواپیما در آن حضور دارد آغاز شود. محدودیت‌های (۱۲) تا (۱۴) معادلات مربوط به بالانس جریان و نحوه جابجایی مسافران بین هواپیماها در لگ‌های متوالی پروازی هستند. محدودیت (۱۵) تضمین می‌کند که هر هواپیما در هر پرواز حداکثر به میزان ظرفیت خود مسافر جابجا کند. محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) تضمین می‌کنند که در صورتی مسافر بتواند از گرهی به گره دیگر برود که با هواپیمایی که این مسیر را می‌پیماید سفر کند. محدودیت (۱۸) تضمین می‌کند زمان خروج هواپیما از یک گره بعد از رسیدن به آن گره و سپری کردن حداقل زمان موردنیاز برای ارائه خدمت (زمان آماده‌سازی هواپیما جهت انجام پرواز بعدی) باشد. محدودیت (۱۹) زمان رسیدن هواپیما به گره مقصد را مشخص می‌کند. محدودیت (۲۰) تضمین می‌کند که هواپیما زمانی بتواند هاب k را ترک کند که تمام مسافرانی که باید با آن هواپیما جابجا شوند به هاب k رسیده باشند. محدودیت (۲۱) زمان پایان عملیات جابجایی مسافران را مشخص می‌کند. محدودیت‌های (۲۲) تا (۲۷) نیز دامنه متغیرها را تعیین می‌کند.

۴. خطی‌سازی مدل پیشنهادی

در مدل فوق باتوجه به شرایط مسئله که امکان استفاده از فرمول‌بندی پیشنهادی کمپبل (۱۹۹۴) و ارنست و کریشنامورتی (۱۹۹۷) که مدل‌هایی خطی برای مسئله مکان‌یابی هاب هستند میسر نبود، از مدل پیشنهادی اوکلی (۱۹۸۷) استفاده گردید که موجب غیرخطی شدن تابع هدف مسئله شده است. محدودیت (۲۰) هم که مربوط به شرایط

۵. مثال عددی و نتایج محاسباتی

به‌منظور اجرای مدل ارائه شده، بررسی عملکرد آن و حل مسائل نمونه، از دو مجموعه داده استفاده شده است: (۱) مجموعه داده CAB که اولین بار توسط اوکلی [۹] مورد استفاده قرار گرفت و پس از آن بسیاری از مقالات مربوط به مکان‌یابی هاب نیز از آن استفاده کرده‌اند (۲) مجموعه داده مربوط به مسافران هوایی سال ۱۴۰۱ ایران [۳۳]. شایان ذکر است که باتوجه به شرایط مسأله که نیاز به تغییر برخی پارامترهای موجود و یا تعیین پارامترهای بیشتر بود، این موارد به‌گونه‌ای که در ادامه شرح داده خواهد شد تکمیل یا تصحیح شده است.

باتوجه به این‌که مسأله مکان‌یابی هاب مسأله‌ای NP-hard بوده [۳، ۹، ۱۳، ۳۱، ۳۴] و ترکیب آن با مسائل مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه باعث پیچیدگی بسیار زیاد مدل پیشنهادی شده، امکان حل مسأله با مقادیر بیش از ۵ گره وجود نداشت، از این‌رو از مجموعه داده CAB ۱۰ گرهی تنها ۵ گره اول آن و از مجموعه داده مسافران هوایی سال ۱۴۰۱ کشور، صرفاً ۵ فرودگاهی که بیشترین مجموع مسافر ورودی و خروجی را داشته‌اند (که عبارتند از فرودگاه‌های مهرآباد، مشهد، کیش، شیراز و اهواز) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از آنجایی‌که طبق آمار سازمان هواپیمایی کشوری از ۱۷،۶۱۲،۷۷۸ مسافر جابجا شده در سال ۱۴۰۱، تعداد ۷،۳۷۶،۹۳۳ مسافر بین ۵ فرودگاه نام برده شده در سطور فوق جابجا شده‌اند که حدود ۴۲٪ از کل مسافران را شامل می‌شود. همچنین طبق آمار در حال حاضر حدود ۱۶۰ هواپیمای فعال در کشور وجود دارد؛ بنابراین برای تطبیق آن با شرایط مسأله و جابجایی مسافران از ۵ فرودگاه نام برده شده بایستی حدود ۶۷ هواپیما داشته باشیم اما همان‌گونه که بیان شد، به‌دلیل پیچیدگی زیاد مسأله تنها امکان استفاده از ۵ هواپیما یعنی حدود ۷٪ هواپیماها موردنیاز وجود دارد، لذا نیاز است تا تعداد تقاضای دو به دوی هریک از مسیرها نیز ۷٪ مقدار واقعی محاسبه گردد. البته باتوجه به این‌که هنگام حل امکان درنظر گرفتن حداکثر ۸ پرواز به‌ازای هواپیما وجود داشت با درنظر گرفتن شرایط شدنی بودن مسأله، به‌جای ۷٪، ۱۰٪ مقدار واقعی مسافران را درنظر گرفتیم که مقادیر آن در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴). تقاضای ۵ فرودگاه با مقیاس ۱۰ به ۱

گره	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۰	۱۴۰	۸	۷	۵۱
۲	۱۳۴	۰	۱۴۱	۱۹۵	۳۴۰
۳	۸	۱۴۱	۰	۲۳	۳۹
۴	۷	۲۰۰	۲۳	۰	۶۲
۵	۵۰	۳۵۱	۴۰	۶۲	۰

مقادیر پارامترهای مربوط به هریک از هواپیماها از جمله ظرفیت، هزینه عملیاتی به‌ازای هر صندلی (مانند هزینه‌های سوخت، نگهداری و غیره)، هزینه ثابت هر پرواز (مانند هزینه‌های فرودگاهی (نشست و

برخاست، سرویس‌های زمینی، استهلاک، بیمه و غیره) و سرعت (به‌منظور محاسبه زمان طی کردن مسافت بین دو گره) براساس مقاله‌های [۲۸] و [۳۵] درنظر گرفته شده که مقادیر آن در جدول (۵) آورده شده است. در این جدول مقدار مربوط به پارامتر حداقل زمان موردنیاز برای ارائه خدمت توسط هواپیما به‌صورت فرضی و متناسب با ظرفیت هواپیما درنظر گرفته شده است.

جدول (۵). مقادیر اولیه پارامترهای مربوط به هواپیما

ST	Speed	CA	Cij	Q
۰.۵	۶۰۰	۱۵۰۰	۱۰	۸۰
۰.۷۵	۸۰۰	۲۵۰۰	۸	۱۵۰
۱	۸۵۰	۴۰۰۰	۴	۳۰۰

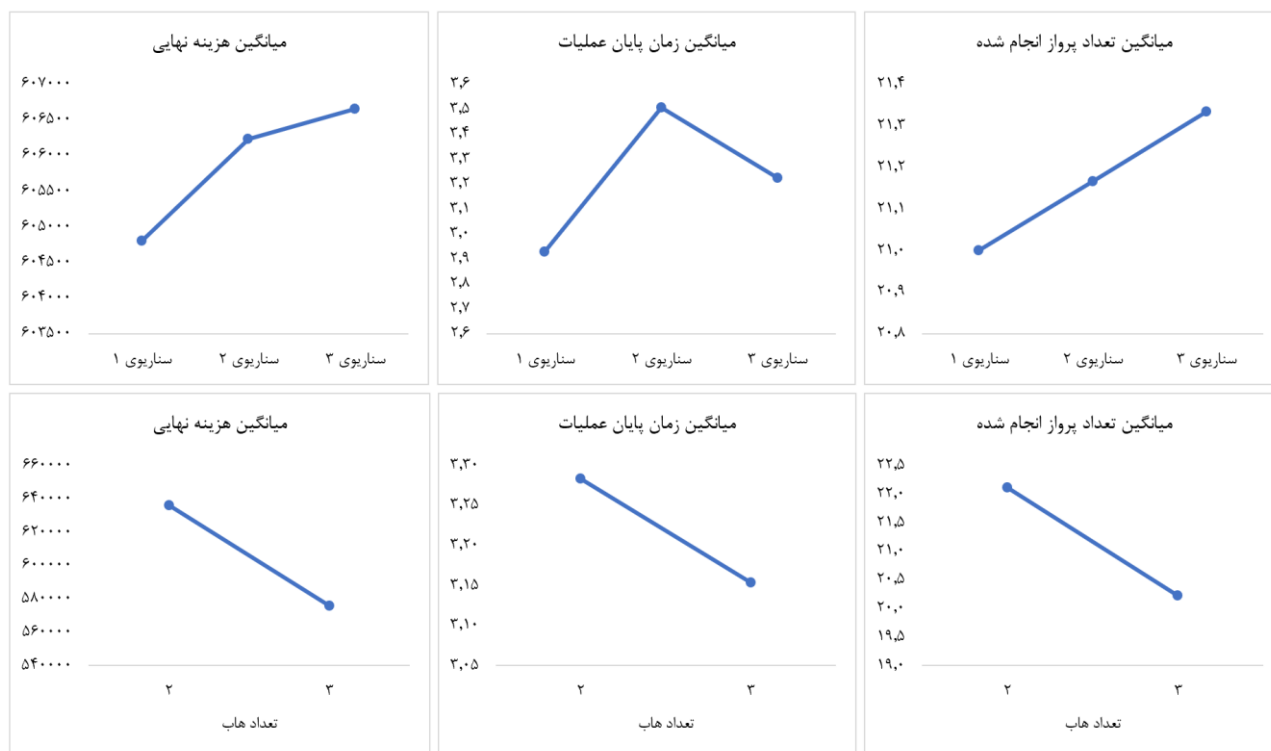
هزینه ثابت هر ساعت عملیات پرواز (مانند هزینه‌های ناوبری و کنترل ترافیک هوایی، هزینه‌های امنیتی، پشتیبانی، اداری و غیره) در کل شبکه (CT) و α نیز به‌ترتیب ۱۷۵۰ و ۰/۸ فرض شده است. برای مکان اولیه هواپیماها نیز سه سناریو درنظر گرفته شد:

سناریوی ۱- تخصیص یک هواپیما به هر گره
 سناریوی ۲- تخصیص هواپیماها به گره‌های غیرهاب تعیین شده در سناریوی ۱ به این‌صورت که ابتدا به هر گره هاب یک هواپیما تخصیص داده شد و سپس هواپیماهای بعدی به‌ترتیب به گره‌های غیرهاب با بیشترین مجموع ورودی و خروجی مسافر اختصاص یافت.
 سناریوی ۳- تخصیص هواپیماها به گره‌های هاب تعیین شده در سناریوی ۱ به این‌صورت که ابتدا به هر گره هاب یک هواپیما تخصیص داده شد و سپس هواپیماهای بعدی به‌ترتیب به گره‌های هاب با بیشترین مجموع ورودی و خروجی مسافر اختصاص یافت.
 برای حل مسائل نمونه، مدل در برنامه GAMS کدنویسی شده و بر روی سرور نتوس [۳۶] اجرا گردید که نتایج آن در جدول (۱۱) قابل مشاهده است. در این جدول مثال‌هایی که در آن از مجموعه داده CAB استفاده شده پسوند CAB و مثال‌هایی که در آن از مجموعه داده مربوط به مسافران هوایی سال ۱۴۰۱ ایران استفاده شده پسوند IRN دارند. حداکثر زمان حل هر مثال ۵۰۰۰ ثانیه و حداکثر gap جواب ۶٪ درنظر گرفته شده است. در مواردی که در مدت زمان مذکور پاسخی با gap کمتر ۶٪ حاصل نمی‌شد این زمان به ۱۰۰۰۰ ثانیه افزایش پیدا کرده است.

همان‌طور که در شکل‌های (۲) و (۳) مشخص است در هر دو مجموعه داده آرایش اولیه هواپیماها طبق سناریوی ۱ کمترین میانگین هزینه و آرایش اولیه هواپیماها طبق سناریوی ۳ بیشترین میانگین هزینه را برای مدل در پی داشته است. درخصوص زمان عملیات سناریوی ۱ کمترین میانگین زمان عملیات پروازی را به‌خود اختصاص داده است. از لحاظ تعداد پرواز نیز سناریوی ۳ بیشترین تعداد پرواز را داشته است که این موضوع در صورتی‌که هزینه فرصت صندلی‌های خالی هر هواپیما نیز به مدل اضافه می‌شد، هزینه‌های سناریوی ۳ بیش‌ازپیش افزایش می‌داد چراکه با بیشترین تعداد پرواز تعداد مسافر

ثابتی را جابجا کرده است. البته باتوجه به تابع هدف تعریف شده، هدف اصلی مدل حداقل کردن هزینه‌ها بوده و زمان عملیات پروازی و تعداد پروازها باتوجه به هزینه‌ای که برای آن‌ها در نظر گرفته شده

در این خصوص مشارکت داشته و حداقل شدن آن‌ها جزو اهداف اصلی مدل نبوده است.



شکل (۲). مقایسه نتایج مثال‌های مبتنی بر داده‌های CAB



شکل (۳). مقایسه نتایج مثال‌های مبتنی بر داده‌های مسافران هوایی ایران در سال ۱۴۰۱

در ارتباط با تعداد هاب نیز در هر دو مجموعه داده، تعداد هاب بیشتر موجب کاهش هزینه‌ها شده اما درخصوص زمان عملیات و تعداد پرواز نتایج متفاوت بوده و نتیجه‌گیری خاصی را نمی‌توان از نتایج به‌عمل آورد.

به لحاظ پیچیدگی حل مسأله، باتوجه به بالا بودن زمان حل و درنظر گرفتن حداکثر بازه زمانی ۵۰۰۰ ثانیه برای حل، از مقایسه میانگین gap جواب‌های مثال‌ها با یکدیگر مطابق با نتایج نمایش داده شده در جدول (۶) تا جدول (۸) می‌توان نتیجه گرفت حل مدل با افزایش ظرفیت هواپیماها و افزایش تعداد هاب دشوارتر می‌شود. همچنین حل مدل با آرایش هواپیماها طبق سناریوی ۳ از حل مدل با آرایش هواپیماها طبق سناریوی ۱ و ۲ سخت‌تر بوده است.

جدول (۶). میانگین gap جواب براساس ظرفیت هواپیما

ظرفیت هواپیما	Relative gap
۸۰	٪۰/۸۵
۱۵۰	٪۰/۹۳
۳۰۰	٪۲/۲۷

جدول (۷). میانگین gap جواب براساس آرایش اولیه هواپیما

آرایش اولیه هواپیما	Relative gap
سناریوی ۱	٪۱/۳۶
سناریوی ۲	٪۱/۰۲
سناریوی ۳	٪۱/۶۵

جدول (۸). میانگین gap جواب براساس تعداد هاب

تعداد هاب	Relative gap
۲	٪۱/۰۳
۳	٪۱/۶۶

۵-۱. بحث در مورد یکپارچگی

تصمیم مکان‌یابی هاب به‌عنوان یک تصمیم استراتژیک درنظر گرفته می‌شود زیرا تأثیرات بلندمدتی بر ساختار و عملکرد شبکه حمل‌ونقل دارد. اگر این تصمیم با تصمیمات تاکتیکی و عملیاتی که کوتاه‌مدت هستند ترکیب شوند، کارایی شبکه‌های توزیع افزایش خواهد یافت [۳۱]. یکی از مهم‌ترین تصمیمات تاکتیکی، برنامه‌ریزی ناوگان حمل‌ونقل (اعم از مسیریابی و زمان‌بندی) است. اگرچه تصمیم‌گیری درخصوص مکان‌یابی هاب و برنامه‌ریزی ناوگان حمل‌ونقل می‌توانند به‌طور جداگانه اتخاذ شوند، اما هنگامی که تصمیمات استراتژیک گرفته شوند، ممکن است تأثیر منفی بر تصمیمات سطح تاکتیکی داشته باشند و منجر به راه‌حل‌های بهینه نشوند [۱۱]. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که ادغام این دو موضوع می‌تواند هزینه‌های بلندمدت را نسبت به بررسی هرکدام به‌طور جداگانه کاهش دهد [۳۷]. ضمن این‌که محدودیت تعداد وسایل نقلیه که در مدل ارائه شده در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است می‌تواند باعث افزایش وابستگی بین

تصمیمات استراتژیک و تاکتیکی شود چراکه ممکن است نحوه تخصیص و برنامه‌ریزی ناوگان بر مکان بهینه هاب‌ها تأثیر بگذارد. برای نشان دادن این موضوع از مثال CAB_1 که در بخش قبل نیز آورده شده بود استفاده کرده و آرایش ابتدایی هواپیماها و تأثیری که می‌توانند بر مکان بهینه هاب بگذارند را در دو سناریو بررسی کردیم. در سناریوی ۱ گره ابتدایی تمام هواپیماها گره ۲ و در سناریوی ۲ گره ۳ درنظر گرفته شده‌است. همان‌طور که در جدول (۹) ملاحظه می‌شود، در سناریوی ۲ باتوجه به آرایش اولیه هواپیماها، گره ۳ به‌جای گره ۲ به‌عنوان هاب انتخاب شده و هزینه کمتری نسبت به سناریوی ۱ خواهد داشت. ممکن است سناریوی مطرح شده اغراق‌آمیز به‌نظر برسد اما نشان می‌دهد در شرایطی که محدودیت هواپیما وجود دارد براساس این‌که چه اولویتی برای تصمیم‌گیران و مدیران وجود دارد، تصمیمات استراتژیک قابلیت اثرگذاری بر تصمیمات استراتژیک را دارند. البته این موضوع از قبل هم قابل پیش‌بینی بود چراکه در تابع هدف تعریف شده در مدل، تعداد پرواز و زمان عملیات نیز اثرگذار هستند که هر دوی آن‌ها تابعی از آرایش اولیه، مسیریابی و زمان‌بندی هواپیماها هستند.

جدول (۹). پاسخ مثال بررسی اثر یکپارچگی

هزینه نهایی	هاب‌های انتخابی	آرایش اولیه هواپیماها
۸۵۱,۹۴۲	۲,۵	سناریوی ۱
۸۵۰,۴۴۳	۳,۵	سناریوی ۲

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این تحقیق یک مدل مکان‌یابی هاب ارائه شد که در آن تصمیمات مربوط به انتخاب هاب‌ها، تخصیص گره‌های غیرهاب به گره‌های هاب، مسیریابی وسایل نقلیه و زمان‌بندی حرکت آن‌ها به‌صورت یکپارچه گرفته می‌شود. در این پژوهش برخلاف دیگر پژوهش‌های موجود در ادبیات موضوع، وجود وسیله نقلیه در گره‌ها و رسیدن مسافران هر وسیله نقلیه به‌عنوان الزامات قطعی در زمان جابجایی مسافران درنظر گرفته شده است.

برای حل مدل از نرم‌افزار گمز استفاده و چند مثال در ابعاد کوچک (باتوجه به پیچیدگی بسیار زیاد مدل) حل و تأثیر تغییرات در چینش اولیه هواپیماها، تغییر نوع هواپیما و تغییر تعداد هاب‌ها بر تابع هدف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که باتوجه به فرضیات مدل، افزایش تعداد هاب‌ها، افزایش ظرفیت هواپیماها و توزیع هواپیماها در گره‌ها به‌جای متمرکز شدن آن‌ها در نقاط خاص می‌تواند به کاهش هزینه‌ها منجر شود، اما پیچیدگی مدل را نیز افزایش می‌دهد. در نهایت با ارائه یک مثال نشان داده شد که یکپارچگی مسأله مکان‌یابی هاب به‌عنوان یک تصمیم‌گیری استراتژیک می‌تواند از تصمیمات تاکتیکی مربوط به برنامه‌ریزی ناوگان تأثیر بپذیرد.

همچنین برای بهبود و تکمیل این پژوهش در مطالعات آتی موارد ذیل پیشنهاد می‌گردد:

(۱) حل مدل در ابعاد بزرگ‌تر با استفاده از روش‌های فراابتکاری برای

- بررسی بهتر و دقیق‌تر مدل
 (۲) در نظر گرفتن وجود محدودیت در گره‌ها اعم از محدودیت در تعداد پذیرش هواپیما براساس تعداد پارکینگ‌های هر فرودگاه، محدودیت فاصله بین هر دو پرواز متوالی، محدودیت در پذیرش مسافر براساس امکانات ترمینالی و محدودیت زمان عملیاتی
- براساس امکانات ناوبری هر فرودگاه
 (۳) در نظر گرفتن ناوگان غیرهمگن
 (۴) در نظر گرفتن شرایط احتمالی برای مواردی همچون تقاضا، مدت زمان پرواز، تأخیر هواپیماها و وقوع خرابی در فرودگاه‌ها

جدول (۱۰). خلاصه‌ای از مقالات بررسی شده در ادبیات موضوع

مقاله	سال	مسیریابی وسایل نقلیه	زمان‌بندی				محدودیت تعداد وسایل نقلیه
			استفاده از فاکتور برنامه‌ریزی تقدم و تأخر	در نظر گرفتن وجود	زمان‌بندی به‌ازای هر وسیله نقلیه	سفرها در هاب	
نیگی و سلهی	۱۹۹۸	تور	*				
چهارسوقی و همکاران	۲۰۱۵	ندارد		*			*
دوکانچی و کارا	۲۰۱۷	ندارد	*			*	
کریمی و ستاک	۲۰۱۸	ندارد	*				
مسائلی و همکاران	۲۰۱۸	ندارد	*		*		*
یزدی و همکاران	۲۰۱۹	ندارد	*				
دوکانچی و همکاران	۲۰۱۹	ندارد	*				
محمودجانلو و همکاران	۲۰۲۰	ندارد	*				
یان و همکاران	۲۰۲۰	ندارد	*				
شانگ و همکاران	۲۰۲۱	ندارد	*				
اسمی زاده و همکاران	۲۰۲۱	ندارد	*				
گلستانی و همکاران	۲۰۲۱	ندارد	*				
رنال و همکاران	۲۰۲۱	تور	*				
شانگ و همکاران	۲۰۲۱	ندارد	*				
رستمی و جبارزاده	۲۰۲۱	ندارد	*				
روزخوش و مطهری	۲۰۲۲	ندارد	*	*			
مهری و همکاران	۲۰۲۲	ندارد	*				*
وو و همکاران	۲۰۲۲	ندارد	*				
فلاح تفتی و همکاران	۲۰۲۳	تور	*				
فریتاس و همکاران	۲۰۲۳	تور					
جیستی و همکاران	۲۰۲۳	ندارد	*				
معتمدی و همکاران	۲۰۲۳	ندارد	*	*			
ابن العوفی و همکاران	۲۰۲۴	تور					
گو و همکاران	۲۰۲۴	تور	*				
محمودی	۲۰۲۴	تور	*	*	*		
پژوهش حاضر	۲۰۲۵	بدون محدودیت تور	*	*	*	*	*

جدول (۱۱). مثال‌های انجام شده و نتایج آن‌ها

مثال	ظرفیت هواییما	آرایش اولیه هوایپماها	تعداد هاب	هاب‌های انتخابی	زمان پایان عملیات	هزینه نهایی	تعداد پرواز انجام شده	زمان حل	Relative gap
CAB_1	۸۰	سناریوی ۱	۲	۲,۵	۳/۹۵۴	۸۴۸,۹۴۲	۳۴	۱۷۴۷	٪۰/۰۰
CAB_2	۸۰	سناریوی ۲	۲	۲,۵	۳/۹۵۴	۸۴۸,۹۴۲	۳۴	۵۰۰۰	٪۰/۴۲
CAB_3	۸۰	سناریوی ۳	۲	۲,۵	۳/۹۵۴	۸۴۸,۹۴۲	۳۴	۵۰۰۰	٪۰/۶۹
CAB_4	۸۰	سناریوی ۱	۳	۲,۳,۵	۳/۴۱۸	۷۷۰,۲۷۷	۳۲	۵۰۰۰	٪۲/۷۰
CAB_5	۸۰	سناریوی ۲	۳	۲,۳,۵	۳/۹۵۴	۷۷۱,۲۱۴	۳۲	۵۰۰۰	٪۲/۴۲
CAB_6	۸۰	سناریوی ۳	۳	۲,۳,۵	۳/۴۰۶	۷۷۰,۲۵۶	۳۲	۵۰۰۰	٪۲,۵۱
CAB_7	۱۵۰	سناریوی ۱	۲	۲,۵	۲/۴۵۰	۶۸۷,۱۰۴	۲۰	۵۰۰۰	٪۰/۸۴
CAB_8	۱۵۰	سناریوی ۲	۲	۲,۵	۲/۴۳۷	۶۸۷,۰۸۲	۲۰	۴۵۹۳	٪۰/۰۰
CAB_9	۱۵۰	سناریوی ۳	۲	۲,۵	۳/۲۲۷	۶۸۸,۴۶۴	۲۰	۵۰۰۰	٪۱/۲۴
CAB_10	۱۵۰	سناریوی ۱	۳	۲,۳,۵	۲/۴۳۷	۶۲۲,۳۰۰	۱۸	۵۰۰۰	٪۲/۲۵
CAB_11	۱۵۰	سناریوی ۲	۳	۲,۳,۵	۳/۳۰۱	۶۲۶,۳۱۲	۱۹	۵۰۰۰	٪۳/۱۴
CAB_12	۱۵۰	سناریوی ۳	۳	۲,۳,۵	۳/۲۷۷	۶۲۳,۷۷۰	۱۸	۵۰۰۰	٪۲/۶۶
CAB_13	۳۰۰	سناریوی ۱	۲	۲,۵	۳/۱۴	۳۶۹,۹۰۴	۱۲	۵۰۰۰	٪۵/۷۰
CAB_14	۳۰۰	سناریوی ۲	۲	۲,۵	۳/۱۴	۳۶۹,۹۰۴	۱۲	۵۰۰۰	٪۱/۹۴
CAB_15	۳۰۰	سناریوی ۳	۲	۲,۵	۳/۲۹۴	۳۷۴,۱۷۴	۱۳	۵۰۰۰	٪۶/۳۹
CAB_16	۳۰۰	سناریوی ۱	۳	۲,۳,۵	۲/۱۶۲	۳۳۰,۳۰۱	۱۰	۵۰۰۰	٪۳/۷۹
CAB_17	۳۰۰	سناریوی ۲	۳	۲,۳,۵	۴/۲۴۸	۳۳۳,۹۵۲	۱۰	۸۸۰۰	٪۳/۱۸
CAB_18	۳۰۰	سناریوی ۳	۳	۲,۳,۵	۲/۱۷۸	۳۳۴,۳۲۹	۱۱	۱۰۰۰۰	٪۴/۰۱
IRN_1	۸۰	سناریوی ۱	۲	۲,۵	۱۳/۰۰۵۵	۱۶,۲۵۹,۸۶۳	۳۴	۱۰۰۰۰	٪۰/۰۴
IRN_2	۸۰	سناریوی ۲	۲	۲,۵	۱۲/۹۲	۱۶,۲۵۹,۷۱۴	۳۴	۱۰۰۰۰	٪۰/۱۰
IRN_3	۸۰	سناریوی ۳	۲	۲,۵	۱۶/۱۲۱۵	۱۶,۲۶۵,۳۱۶	۳۴	۱۰۰۰۰	٪۰/۱۳
IRN_4	۸۰	سناریوی ۱	۳	۲,۳,۵	۲۱/۲۳۶۳	۱۳,۹۸۸,۷۲۹	۳۹	۱۰۰۰۰	٪۰/۴۴
IRN_5	۸۰	سناریوی ۲	۳	۲,۳,۵	۱۶/۱۱۵۸	۱۳,۹۸۲,۶۱۹	۳۴	۱۰۰۰۰	٪۰/۳۴
IRN_6	۸۰	سناریوی ۳	۳	۲,۳,۵	۱۶/۶۶۳	۱۳,۹۸۶,۴۲۷	۴۳	۱۰۰۰۰	٪۰/۳۵
IRN_7	۱۵۰	سناریوی ۱	۲	۲,۵	۶/۲۲۵	۱۳,۶۸۵,۴۷۰	۲۰	۴۸۳۴	٪۰/۰۰
IRN_8	۱۵۰	سناریوی ۲	۲	۲,۵	۶/۲۲۵	۱۳,۶۸۵,۴۷۰	۲۰	۴۸۹۴	٪۰/۰۰
IRN_9	۱۵۰	سناریوی ۳	۲	۲,۵	۸/۲۳۹	۱۳,۶۸۸,۹۹۰	۲۰	۵۰۰۰	٪۰/۱۵
IRN_10	۱۵۰	سناریوی ۱	۳	۲,۳,۵	۸/۷۳۳	۱۱,۷۶۷,۶۵۰	۲۴	۵۰۰۰	٪۰/۳۲
IRN_11	۱۵۰	سناریوی ۲	۳	۲,۳,۵	۸/۲۳۶	۱۱,۷۶۹,۲۸۰	۲۵	۵۰۰۰	٪۰/۲۷
IRN_12	۱۵۰	سناریوی ۳	۳	۲,۳,۵	۸/۹۶۵	۱۱,۷۶۸,۰۶۰	۲۴	۵۰۰۰	٪۰۷/۲۷
IRN_13	۳۰۰	سناریوی ۱	۲	۲,۵	۲/۸۷۱	۶,۸۵۷,۳۱۲	۱۰	۱۳۷۱	٪۰/۰۰
IRN_14	۳۰۰	سناریوی ۲	۲	۲,۵	۶/۱۸۹	۶,۸۶۳,۱۱۹	۱۰	۸۰۰	٪۰/۰۰
IRN_15	۳۰۰	سناریوی ۳	۲	۲,۵	۱۳/۰۲	۶,۹۰۷,۰۷۳	۱۸	۵۰۰۰	٪۰/۹۴
IRN_16	۳۰۰	سناریوی ۱	۳	۲,۳,۵	۵/۴۷۹	۵,۹۰۳,۷۷۱	۱۲	۵۰۰۰	٪۰/۲۸
IRN_17	۳۰۰	سناریوی ۲	۳	۲,۳,۵	۹/۲۸۷	۵,۹۱۸,۴۳۶	۱۴	۵۰۰۰	٪۰/۴۹
IRN_18	۳۰۰	سناریوی ۳	۳	۲,۳,۵	۹/۰۶۸	۵,۹۱۸,۰۵۳	۱۴	۵۰۰۰	٪۰/۴۹

مراجع

- [3] Contreras, I., & O'Kelly, M. (2019). Location science, Second edition, 327-363.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-32177-2_12
- [4] Azzoug, A., Brahami, M. A., Ghomri, L., Bettayeb, B., & Sahnoun, M. H. (2023). Hub Location Problems: Classification and Bibliometric Analysis of Relevant Works, 2023 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA) (pp. 474-479).
<https://doi.org/10.1109/DASA59624.2023.10286670>
- [5] Gelareh, S., & Nickel, S. (2011). Hub location problems
- [1] Alumur, S. A., Campbell, J. F., Contreras, I., Kara, B. Y., Marianov, V., & O'Kelly, M. E. (2021). Perspectives on modeling hub location problems, European Journal of Operational Research, 291(1), 1-17.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.09.039>
- [2] Atay, M., Eroglu, Y., & Seckiner, S. U. (2023). Domestic flight network hub location problem under traffic disruption with sustainability provision, Case Studies on Transport Policy, 12, 101011.

- model with elastic demands and backup hubs under risk, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 86, 68-82.
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.08.019>
- [20] Esmizadeh, Y., Bashiri, M., Jahani, H., & Almada-Lobo, B. (2021). Cold chain management in hierarchical operational hub networks, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 147, 102202.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102202>
- [21] Dukkanci, O., Peker, M., & Kara, B. Y. (2019). Green hub location problem, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 125, 116-139.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.005>
- [22] Golestani, M., Moosavirad, S. H., Asadi, Y., & Biglari, S. (2021). A multi-objective green hub location problem with multi-item-multi temperature joint distribution for perishable products in cold supply chain. *Sustainable production and consumption*, 27, 1183-1194.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.026>
- [23] Yan, H., Zhang, X., & Wang, X. (2021). Hierarchical passenger hub location problem in a megaregion area considering service availability, *Promet-Traffic&Transportation*, 33(2), 247-258.
<https://doi.org/10.7307/ptt.v33i2.3563>
- [24] Shang, X., Jia, B., Yang, K., Yuan, Y., & Ji, H. (2021). A credibility-based fuzzy programming model for the hierarchical multimodal hub location problem with time uncertainty in cargo delivery systems, *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 12, 1413-1426.
<https://doi.org/10.1007/s13042-020-01239-8>
- [25] Korani, E., Eydi, A., & Nakhai Kamalabadi, I. (2020). Reliable hierarchical multimodal hub location problem: Models and Lagrangian relaxation algorithm, *Scientia Iranica*, 27(3), 1525-1543.
<https://doi.org/10.24200/sci.2018.50797.1870>
- [26] Giusti, R., Manerba, D., Crainic, T. G., & Tadei, R. (2023). The synchronized multi-commodity multi-service Transshipment-Hub Location Problem with cyclic schedules, *Computers & Operations Research*, 158, 106282.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106282>
- [27] Rostami, M., & Jabbarzadeh, A. (2021). Integrated hub location and flow processing schedule problem under renewable capacity constraint, *Computational and Applied Mathematics*, 40(5), 165.
<https://doi.org/10.1007/s40314-021-01548-w>
- [28] Mohri, S. S., Nasrollahi, M., Pirayesh, A., & Mohammadi, M. (2022). An integrated global airline hub network design with fleet planning, *Computers & Industrial Engineering*, 164, 107883.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107883>
- [29] Wu, J., Zhang, P. W., Wang, Y., & Shi, J. J. (2022). Integrated aviation model and metaheuristic algorithm for hub-and-spoke network design and airline fleet planning, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 164, 102755.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102755>
- [30] Masaeli, M., Alumur, S. A., & Bookbinder, J. H. (2018). Shipment scheduling in hub location problems, *Transportation Research Part B: Methodological*, 115, 126-142.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.07.003>
- [31] Motamedi, Z., Ghodrathnama, A., Pasandideh, S. H. R., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2023). Scheduling of transportation fleet based on the customer's priority in a hub location problem, *Scientia Iranica*.
<https://doi.org/10.24200/sci.2023.61107.7143>
- [32] Karimi, H., & Setak, M. (2018). A bi-objective incomplete in transportation networks, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 1092-1111.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.04.009>
- [6] Karimi, H., & Bashiri, M. (2011). Hub covering location problems with different coverage types, *Scientia Iranica*, 18(6), 1571-1578.
<https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.09.018>
- [7] Farahani, R. Z., Hekmatfar, M., Arabani, A. B., & Nikbaksh, E. (2013). Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications, *Computers & industrial engineering*, 64(4), 1096-1109.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.01.012>
- [8] Goldman, A. J. (1969). Optimal locations for centers in a network, *Transportation Science*, 3(4), 352-360.
<https://doi.org/10.1287/trsc.3.4.352>
- [9] O'Kelly, M. E. (1986). The location of interacting hub facilities, *Transportation science*, 20(2), 92-106.
<https://doi.org/10.1287/trsc.20.2.92>
- [10] Nagy, G., & Salhi, S. (1998). The many-to-many location-routing problem, *Top*, 6, 261-275.
<https://doi.org/10.1007/BF02564791>
- [11] Real, L. B., Contreras, I., Cordeau, J. F., de Camargo, R. S., & de Miranda, G. (2021). Multimodal hub network design with flexible routes. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 146, 102188.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102188>
- [12] De Freitas, C. C., Aloise, D. J., Da Costa Fontes, F. F., Santos, A. C., & Da Silva Menezes, M. (2023). A biased random-key genetic algorithm for the two-level hub location routing problem with directed tours, *OR Spectrum*, 45(3), 903-924.
<https://doi.org/10.1007/s00291-023-00718-y>
- [13] Ibnoulouafi E. M., Aouam, T., Oudani, M., & Ghogho, M. (2024). Efficient Meta-Heuristic Approach for the Multi-Objective Green p-Hub Centre Routing Problem, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*.
<https://doi.org/10.1109/TEVC.2024.3410517>
- [14] Guo, F., Wang, Z., Huang, Z., & Ma, X. (2024). Robust optimization of microhub network and mixed service strategy for a multidepot location-routing problem, *Computers & Industrial Engineering*, 190, 110070.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110070>
- [۱۵] محمودی، نعمان (۱۴۰۲). مدل چندمرحله‌ای مکانیابی، مسیریابی و زمان‌بندی به‌منظور طراحی شبکه‌ی هاب با افق زمانی محدود تحت شرایط عدم قطعیت، پایان‌نامه دکتر. به راهنمایی احمد صادقیه. دانشگاه یزد، دانشکده فنی و مهندسی.
- [16] Shang, X., Yang, K., Jia, B., & Gao, Z. (2021). Distributionally robust cluster-based hierarchical hub location problem for the integration of urban and rural public transport system, *Computers & Industrial Engineering*, 155, 107181.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107181>
- [17] Khodemani-Yazdi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bashiri, M., & Rahimi, Y. (2019). Solving a new bi objective hierarchical hub location problem with an M/M/c queuing framework, *Engineering applications of artificial intelligence*, 78, 53-70.
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.10.004>
- [18] Mahmoodjanloo, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Baboli, A., & Jamiri, A. (2020). A multi-modal competitive hub location pricing problem with customer loyalty and elastic demand, *Computers & operations research*, 123, 105048.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105048>
- [19] Rahimi, Y., Torabi, S. A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). A new robust-possibilistic reliable hub protection

- <https://neos-server.org/neos/solvers/lp:CPLEX/GAMS.html>
- [37] Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European journal of operational research*, 238(1), 1-17.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.005>
- [38] Fallah-Tafti, M., Honarvar, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Sadegheih, A. (2023). A Bi-objective Stochastic Hub Location-Routing Model for the Railway Rapid Transit Network Design. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 11(22), 111-123.
<https://doi.org/10.22084/ier.2023.27883.2131>
- [39] Charsooghi, S. K., Momayyezi, F. & Yazekhasti, A. (2015). Developing Hub Location Problem Based on Economy Flows by Using Capacity of Vehicle and Limitation of Entrance Flow to Hub. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 2(4), 1-19.
https://ier.basu.ac.ir/article_942_en.html
- hub location-routing problem with flow shipment scheduling, *Applied Mathematical Modelling*, 57, 406-431.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.01.012>
- [33] <https://caa.gov.ir/air-transport-annual-report/show/WVAyVj>
- [34] Roozkhosh, P., & Motahari Farimani, N. (2023). 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*, 18(1), 36-50.
<https://doi.org/10.1080/17509653.2022.2089261>
- [35] Yu, W., Hong, S., & Peiwen, Z. (2012). Aircraft trip DOC parameters: A function of stage length, seat capacity and design range, 2012 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (pp. 2322-2325). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IEEM.2012.6838162>
- [36] Czyzyk, J., Mesnier, M. P., and Moré, J. J. 1998. The NEOS Server, *IEEE Journal on Computational Science and Engineering* 5(3), 68-75. This paper discusses the design and implementation of the NEOS Server.



Presenting an Integrated Hub Location Model with a Flexible Scheduling Approach in Air Transportation

Mohammad Ghadimi¹, Gholam Reza Esmailian^{2*}, Maryam Hamed²

¹ PhD student, Department of Industrial Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 - 10 - 2024

Revised: 10 - 1 - 2025

Accepted: 2 - 2 - 2025

Keywords:

Hub Location Problem

Vehicle Routing

Flexible Scheduling

Fleet Planning

Air Transportation

ABSTRACT

Currently, due to the country's sanctions, airlines face restrictions on access to aircraft, which has affected the efficiency of the national air transportation network. However, with proper planning, optimal utilization of available aircraft, and route optimization through the hub location problem, it is possible to achieve better efficiency and mitigate the losses and costs caused by sanctions. In this paper, an integrated model for hub location with a flexible scheduling approach in air transportation is presented. This model not only determines the locations of hubs but also optimizes the routing and scheduling of each aircraft simultaneously, considering their initial locations and the constraint of a limited number of available aircraft. Unlike other studies in the literature, this research considers the presence of vehicles at nodes and the necessity of passenger arrival at each vehicle as a prerequisite for passenger transfers, making the problem more aligned with real-world conditions. The proposed model is solved using GAMS software, and its results are validated using two datasets: CAB and Iranian air passenger data for the year 2022. The findings indicate that, given the model's assumptions, increasing the number of hubs, expanding aircraft capacity, and distributing aircraft across nodes instead of concentrating them in specific locations can lead to cost reductions, although it also increases the model's complexity. Finally, recommendations for future research to improve the model are provided.

* Corresponding author. GR. Esmailian

Tel.: 021-23320000; E-mail address: gre@pnu.ac.ir