

مدل‌سازی و حل مسئله مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی چندوسیله‌ای

با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت هاب‌ها

مهران اسدیان^۱، سید محمدحسن حسینی^{۲*}، علی‌اکبر حسینی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران.

۲. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران.

۳. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران.

خلاصه

مسئله مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی چندوسیله‌ای عبارت است از یافتن تعداد و محل استقرار چند نوع هاب در سطوح مختلف همراه با مسیرهای ارتباطی و وسایل حمل به‌گونه‌ای که هزینه تأسیس و حمل حداقل شود. در این مسئله معمولاً گره‌های تقاضا به انواع هاب‌های مورد نظر با استفاده از وسایل نقلیه متفاوت تخصیص داده می‌شوند. بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که مطالعات محدودی بر روی مسئله مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی چندوسیله‌ای علی‌رغم اهمیت و کاربرد فراوان آن انجام شده است. ضمن آنکه در این تحقیقات محدود نیز محدودیت ظرفیت هاب به‌عنوان یکی از واقعیت‌های کاربردی این مسئله در نظر گرفته نشده است. این محدودیت، تأثیر مهمی بر پیکربندی شبکه و برنامه‌ریزی جریان کالا در سطح شبکه خواهد داشت. در تحقیق حاضر، یک مسئله مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی با در نظر گرفتن تنوع وسایل حمل و محدودیت ظرفیت هاب مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لحاظ نمودن این شرایط در راستای نزدیک‌تر کردن این مسئله با شرایط دنیای واقعی است و نتایج حل آن می‌تواند برای محققان این حوزه مفید باشد. لذا پس از تشریح مسئله، متغیرهای تصمیم و پارامترهای این مسئله تعریف و سپس مدل ریاضی آن مطابق با شرایط فوق توسعه داده شده می‌شود. به‌منظور حل مسئله با توجه به ماهیت مدل که از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است، از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS استفاده شده است. همچنین جهت ارزیابی و تجزیه و تحلیل نتایج از داده‌های استاندارد وب سایت تحقیق در عملیات و مسائل واقعی تشریح شده در یکی از منابع استفاده شده است. براساس نتایج این تحقیق، دو پارامتر تعداد و ظرفیت هاب تأثیر زیادی بر مقدار تابع هدف (مجموع عوامل هزینه‌ای) و همچنین زمان حل مسئله دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۵/۰۹/۰۱

پذیرش ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

کلمات کلیدی:

مکان‌یابی

هاب سلسله مراتبی

چندوسیله‌ای

ظرفیت محدود هاب‌ها

زمان تحویل قطعی

۱- مقدمه

هاب‌ها تسهیلات ویژه‌ای هستند که به عنوان نقاط تعویض، انتقال و طبقه‌بندی در بسیاری از سیستم‌های توزیع بکار گرفته می‌شوند. مسائل مکان‌یابی هاب نقشی مؤثری در بهبود کارایی سیستم‌های حمل و نقل دارند. نقاط میانی که هاب نامیده می‌شوند، وظیفه جمع‌آوری، مرتب‌سازی و توزیع به محل‌های تقاضا را دارند. به‌گونه‌ای که حمل و نقل بین هاب‌ها هزینه بسیار کمتری دارد و عملاً سیستم

حمل و نقل را به استفاده از هاب به جای انتقال مستقیم تشویق می‌کند. کاربردهای مدل‌های مکان‌یابی هاب در حمل و نقل شامل حمل هوایی مسافران، حمل هوایی مواد یا بار، ارسال سریع (مانند سیستم‌های تحویل یک شبه)، عملیات پستی، سیستم ترانزیت سریع و ... می‌باشد. از این‌رو تحقیقات راجع به مکان‌یابی در طول دو دهه اخیر جایگاه مهمی در زمینه مکان‌یابی به خود اختصاص داده است، این امر در نتیجه استفاده فراوان از شبکه‌های هاب در حمل و نقل و

* نویسنده مسئول: سید محمدحسن حسینی

تلفن: ۰۲۱-۷۷۲۵۳۹۹۹؛ پست الکترونیکی: sh.hosseini@shahroodut.ac.ir

و [۳]. اکلی و اولین افرادی بودند که طرح جدیدی برای انواع حمل و نقل درون یک شبکه هاب ارائه دادند [۴]. سپس کمپبل در سال ۱۹۹۴ مسئله مکان‌یابی هاب را بر طبق معیارهای بهینه‌سازی به صورت زیر دسته‌بندی نمود [۵]:

- حداقل کردن هزینه‌های کل حمل و نقل، مسئله p هاب میانه (همان مدل اصلی ارائه شده اکلی)
- حداقل کردن هزینه کل حمل و نقل و هزینه تأسیس هاب، مسئله هاب بدون ظرفیت و با ظرفیت محدود
- حداقل کردن ماکسیمم هزینه حمل و نقل، مسئله p هاب مرکز
- حداقل کردن تعداد هاب‌های از پیش تعیین شده (مسئله هاب پوششی)

لیبرک و جوکیون مکان‌های مناسب ریل راه‌آهن را تعیین کردند که به طور مشترک در هر دو مسئله p هاب مدین و مسئله چندوسیله‌ای مورد استفاده قرار گرفت [۶].

ایش فاک و ساکس نیز از مدل مکان‌یابی مدل هاب نامحدود با در بر گرفتن سرویس زمان‌بندی محدود برای تعیین مکان هاب‌ها در داخل شبکه داخلی راه‌آهن استفاده کردند [۷]. منگ و وانگ یک مدل ریاضی را برای طراحی در شبکه هاب داخلی برای چند نوع کانتینر حمل‌ونقل با شروط متعدد طراحی کردند. اگر چه این تحقیقات موارد استفاده راه‌های مختلف حمل‌ونقل را در مکان‌یابی هاب نشان می‌دهد اما هیچ کدام از آنها انواع مختلف تسهیلات هاب را در بر نمی‌گیرد یا ساختار شبکه سلسله مراتبی که در این تحقیق توضیح داده می‌شود را شامل نمی‌شود [۸].

کارا و تانسل بر روی کاربرد بخش تحویل بار با توجه به مسئله مکان‌یابی هاب مطالعاتی انجام دادند. آنها مشاهده کردند که همزمانی در تعیین زمان‌های حرکت بسیار حیاتی و مهم است. شرکت‌های حمل‌ونقل باری در هاب‌ها، باید برای آمدن وسایل نقلیه صبر می‌کنند [۹]. محققان، مسئله مکان‌یابی هاب را با تأخیر ورود را به عنوان مسئله مکان‌یابی هاب که هماهنگ‌سازی (همزمانی) زمان حرکت نیز در آن گنجانده شده است ارائه نموده است و مسئله هاب پوششی در تأخیر ورود را مورد مطالعه قرار دادند. یامان توقف را در مسئله مکان‌یابی هاب با تأخیر ورود گنجانده است. در تمامی تحقیقات انجام شده بر روی انواع مسئله مکان‌یابی هاب با تأخیر ورود، شبکه هاب به صورت کامل فرض می‌شود و فقط یک حالت حمل‌ونقل در نظر گرفته می‌شود. در مطالعات با زمان تحویل معین، زمان سرویس بین هر جفت گره مبدأ و مقصد باید در یک سطح تضمین خدمات باشد [۱۰]. لین و همکاران جدول‌ها و اندازه‌هایی را که این سطح خدمت را تضمین می‌کرد تعیین کردند [۱۱ و ۱۲].

اسمیلوویتز و داگانزو طراحی شبکه‌های مقصد مجتمع سلسله مراتبی با سطوح خدمات چندگانه که در حمل و نقل زمینی و هوایی مورد استفاده هستند را مورد مطالعه قرار دادند. آنها هزینه‌های حمل و نقل، متشکل از هزینه‌های ثابت و وسایل نقلیه و هزینه‌های متغیر عملیاتی و هزینه‌های تسهیلات متشکل از شارژهای ثابت ترمینال و

ارتباطات مدرن بوده است. در همه این شبکه‌ها، ترافیک بین گره‌های تقاضا از طریق تسهیلات هاب مسیریابی می‌شوند.

مسائل مکان‌یابی هاب زیرمجموعه مسائل شبکه‌ای محسوب می‌شود. این مسائل با هدف طراحی بهینه انواع شبکه‌های حمل و نقل مطرح می‌شود. لذا هدف از حل این مسئله، یافتن مکان مناسب برای هاب‌ها و مسیرها جهت ارسال کالا از یک سری مبدأ به یک سری مقصد می‌باشند به گونه‌ای که منجر به کاهش هزینه‌ها و کسب منافع اقتصادی مورد نظر توسط انتقال‌های متعدد بین هاب‌ها بشود. با توجه به مطالب فوق مشخص است که مسئله مکان‌یابی هاب، جایگاه و اهمیت مهمی در دنیای واقعی از جمله مسائل حمل و نقل و توزیع دارد. از این رو در این تحقیق با افزودن شرایط جدیدی مانند تنوع وسایل حمل و در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت هاب‌ها، سعی شده است این مسئله در حالتی نزدیکتر به دنیای واقعی بررسی و حل شود.

مسائل مکان‌یابی هاب به طور کلی، جزء مسائل کلاسیک در مکان‌یابی محسوب نمی‌شود. در حقیقت، این مسائل زیرمجموعه‌ای از مسائل بهینه‌سازی شبکه‌ای هستند و به همین دلیل و با توجه به کاربرد فراوان آن در عمل، برای هر یک از مدل‌هایی که در حالت کلاسیک گسسته مکان‌یابی وجود دارد، مدل‌های مکان‌یابی هاب هم ارائه شده است [۱]. در چنین مواردی، هدف از تشکیل شبکه، دادن اجازه حرکت به جریان کالاها از میان گره‌های غیر هاب توسط گره‌های هاب است. در عمل، صرفه‌جویی به مقیاس به این معنا است که در شبکه هوایی می‌توان از هواپیماهای بزرگتر و کارتر در خطوط وصل‌کننده هاب‌ها استفاده کرد و در مورد شبکه‌های ارتباطی نیز، استفاده از فیبرهای نوری با ظرفیت بالاتر برای ارتباط برقرار کردن میان جفت هاب‌ها مدنظر قرار می‌گیرد.

حالت‌های پایه مسائل مکان‌یابی هاب توسط نیکل و هماچر در سال ۱۹۹۸ طبقه‌بندی شده‌اند. در این طبقه‌بندی، مسائل مکان‌یابی از ۵ منظر زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

- منظر اول مربوط به نوع مسئله است که معمولاً کلمه "hub" نوشته می‌شود و اگر تعداد هاب (p) نیز مشخص باشد این عدد نیز تعیین می‌شود.
 - منظر دوم بیانگر نوع مسئله از نظر گسسته یا پیوسته بودن است. در این بخش حرف D بیانگر گسسته بودن مسئله می‌باشد.
 - منظر سوم نشان‌دهنده محدودیت‌های مسئله می‌باشد که با علائم MA (چند هاب)، SA (تک هاب) و Cap (ظرفیت) مشخص می‌گردد.
 - منظر چهارم نشان‌دهنده نحوه ارتباط و تعیین مسافت بین گره‌ها می‌باشد.
 - منظر پنجم نیز نوع تابع هدف را مشخص می‌نماید.
- مسئله مکان‌یابی هاب اولین بار توسط اکلی در سال ۱۹۸۶ مطرح شد. اکلی در سال ۱۹۸۷ مدل‌سازی مسئله حداقل هزینه را ارائه داد که به عنوان اولین مدل یا نمونه در مکان‌یابی هاب انتخاب گردید [۲]

به‌عنوان یکی از واقعیت‌های کاربردی این مسئله در نظر گرفته نشده است. این محدودیت، تأثیر مهمی بر پیکربندی شبکه (شامل مکان‌یابی هاب‌ها) و برنامه‌ریزی جریان کالا در سطح شبکه خواهد داشت. لذا لحاظ نمودن همزمان محدودیت ظرفیت هاب‌ها و همچنین تنوع وسایل حمل در یک مسئله مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی در راستای نزدیکتر کردن این مسئله با شرایط دنیای واقعی از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر محسوب می‌شود. در ادامه پس از تشریح مسئله، متغیرهای تصمیم و پارامترهای آن تعریف و سپس به توسعه مدل ریاضی پرداخته می‌شود. در نهایت با استفاده از داده‌های واقعی مسائل تشریح شده در منبع [۲۰] و افزودن شرایط در نظر گرفته شده در این تحقیق، این مسائل حل و نتایج آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

به‌منظور بررسی و مقایسه بهتر تحقیقات پیشین و نوآوری تحقیق حاضر، خلاصه‌ای از این منابع در جدول (۱) آمده است

۲- بیان مسئله

شکل (۱) نشان‌دهنده نمای مسئله مورد بررسی در این تحقیق می‌باشد. در این شکل یک شبکه سرویس‌دهی با ۱۱ گره هاب (گره ۰ تا ۱۰) را نشان می‌دهد. در این تصویر هاب‌های هوایی به شکل مثلث (نود ۱-۲-۳)، هاب‌های زمینی به شکل مربع (نود ۴ تا ۱۰) و هاب هوایی مرکزی به شکل دایره (نود ۰) نشان داده شده است.

نودهای بدون شماره، نودهای تقاضا می‌باشند که به گره‌های هاب تخصیص داده می‌شوند. خطوط دوگانه اتصالات هوایی را نشان می‌دهند درحالی‌که خطوط منفرد یونی و زمینی را نشان می‌دهند.

نودهای بدون شماره، نودهای تقاضا می‌باشند که به گره‌های هاب تخصیص داده می‌شوند. خطوط دوگانه اتصالات هوایی را نشان می‌دهند درحالی‌که خطوط منفرد یونی و زمینی را نشان می‌دهند.

به‌منظور تشریح بیشتر جهت درک کامل‌تر مسئله ابتدا پارامترها و متغیرهای مسئله تعریف و سپس مدل ریاضی آن توسعه داده می‌شود. جداول (۲) تا (۳) به ترتیب شرح اندیس‌ها و علائم و مجموعه‌ها، پارامترهای مسئله و متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله نیز مبتنی بر شش بخش می‌باشد. بخش اول مدل‌های مکان‌یابی هاب و نحوه تخصیص را بیان می‌کند. چهار بخش بعدی آن شامل محدودیت‌های مربوط به طراحی شبکه هاب، محدودیت‌های مسیریابی جریان، محدودیت‌های زمانی و محدودیت‌های ظرفیت هاب بوده و بخش ششم به مدل‌سازی تابع هدف که حداقل کردن هزینه‌های کل حمل و نقل است می‌پردازد.

هزینه‌های توزیع و پرداخت مخارج اقدامات ذخیره‌سازی را با استفاده از تکنیک‌های تخمین زنجیره حداقل کردند [۱۳].

چون یک ساختار شبکه درخت را مورد بررسی قرار داد که در آن به دنبال به حداقل رساندن مجموع موارد خطا در ضمانت تحویل بود [۱۴]. کمپیل مجموع هزینه‌های حمل و نقل را در حالی که زمان قطعی حمل و نقل را تضمین می‌داد کاهش داد [۱۵]. سیم و همکاران [۱۶] زمان‌های سفرهای تصادفی را نیز مد نظر قرار دادند.

از جمله تحقیقات داخلی در این حوزه نیز می‌توان به پژوهش غفاری نسب و همکاران اشاره کرد [۱۷]. ایشان در مقاله خود به طراحی شبکه لجستیک هاب با در نظر گرفتن تقاضاهای تصادفی پرداخته و با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار، یک مدل ریاضی حل دقیق برای این مسئله در ابعاد کوچک ارائه کرده‌اند. هدف تحقیق ایشان نیز کمینه کردن جمع هزینه‌های کل سیستم با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت‌های مراکز عرضه بوده است. همچنین عیدی و همکاران نیز یک روش حل دقیق بر مبنای رویکرد تجزیه بندرز برای مسئله مکان‌یابی چند هاب میانه با تخصیص I تایی توسعه دادند [۱۸]. مسائل نمونه حل شده در این تحقیق نیز مجموعه داده‌های شبکه ترکیه و USA423 بوده و نتایج حل و تحلیل آن بیانگر کارایی مناسب الگوریتم پیشنهادی ایشان می‌باشد.

یامان بر روی تأثیر استراتژی‌های تخصیص مختلف مطالعه کرد [۱۹]. آلومار، یامان و کارا مسئله مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی را با در نظر گرفتن زمان تحویل قطعی در نظر گرفته‌اند که به بررسی شبکه حمل و نقل کشور ترکیه پرداختند [۲۰]. گلاره و همکاران به مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی هاب چند دوره‌ای پرداخته‌اند که محدودیت بودجه در آن لحاظ شده است [۲۱].

پوئرتو و همکاران تحقیق صورت گرفته توسط خود ایشان در سال ۲۰۱۱ را با لحاظ کردن ظرفیت محدود توسعه دادند. در این تحقیق صرفاً از یک نوع وسیله حمل استفاده شده است [۲۲].

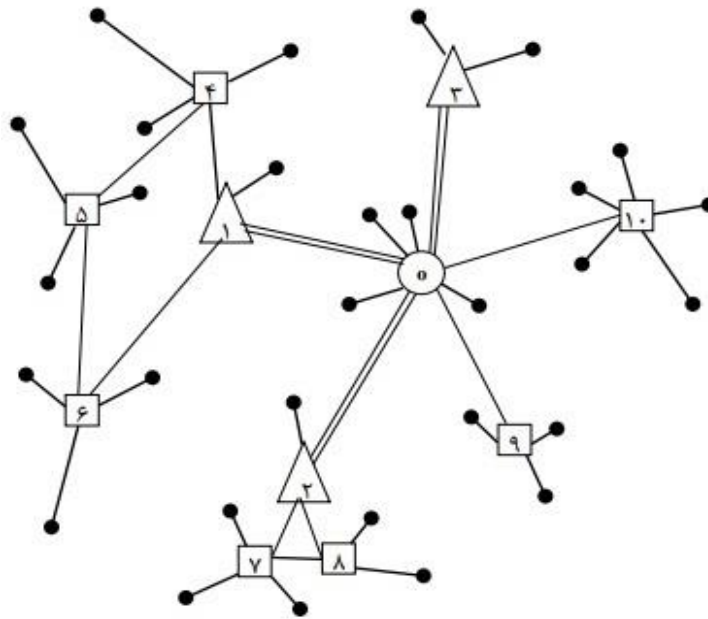
علی عرفان و همکاران مسئله مکان‌یابی هاب تحت شرایط رقابت شدید را مورد مطالعه قرار دادند و به منظور حداقل کردن دو تابع هدف مجموع هزینه‌ها و زمان تحویل به مشتری، چند الگوریتم ابتکاری جهت تعیین نقاط هاب پوششی ارائه کردند [۲۳].

جان اکونل و همکاران به بررسی و مقایسه عملکرد هاب‌های هوایی امارات و قطر با هاب‌های هوایی بزرگ اروپا پرداخته و مزایا و معایب هر کدام را معرفی کردند [۲۴].

همان‌طور که خلاصه تحقیقات پیشین نشان می‌دهد، مسئله مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی چندوسیله‌ای علی‌رغم اهمیت و کاربرد فراوان آن در دنیای واقعی به ندرت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. ضمن آنکه در این تحقیقات محدود نیز محدودیت ظرفیت هاب

جدول (۱): خلاصه تحقیقات پیشین

منبع	موضوع تحقیق	هدف	نوع هاب	محدودیت ظرفیت	تنوع وسایل حمل	تکنیک حل
اکلی (۱۹۸۷)	مدل‌سازی برنامه عدد صحیح درجه دوم برای مکان‌یابی تسهیلات هاب پیشنهادی	کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها	یک سطحی	-	-	مدل ریاضی
کلی و لئو (۱۹۹۱)	انتخاب مسیر در یک شبکه هاب: مدل برنامه‌ریزی صفر و یک‌خطی، تحلیل جغرافیایی	کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها	یک سطحی	-	-	مدل ریاضی
نیکل و هم‌اچر (۱۹۹۸)	بررسی حالت‌های پایه مسئله مکان‌یابی هاب	مرور و دسته‌بندی حالت‌های پایه مسئله مکان‌یابی هاب	همه موارد	-	-	-
کمپل (۱۹۹۴)	مدل‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مسئله مکان‌یابی هاب گسسته	دسته‌بندی و فرموله کردن مسئله مکان‌یابی هاب با معیارهای p هاب میانه، p هاب مرکز، هاب پوششی	یک سطحی	-	-	مدل ریاضی
کارا و تانسل (۲۰۰۱)	حل مسئله مکان‌یابی هاب با در نظر گرفتن تأخیر ورود وسیله نقلیه	کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها	-	-	-	ابتکاری
اسمیلو و کورداگانزو (۲۰۰۷)	طراحی شبکه‌های توزیع یکپارچه و سطوح خدمات چندگانه با استفاده از تکنیک‌های تخمین زنجیره	حداقل کردن هزینه‌های حمل و نقل، متشکل از هزینه‌های ثابت وسایل نقلیه و هزینه‌های متغیر عملیات، هزینه‌های تسهیلات و هزینه‌های توزیع	سلسله مراتبی ۳ سطحی	-	✓	ابتکاری
چن (۲۰۰۸)	طراحی شبکه حمل و نقل با در نظر گرفتن محدودیت زمانی	به حداقل رساندن مجموع موارد خطا در ضمانت تحویل	شبکه درخت	-	-	ابتکاری
کمپل (۲۰۰۹)	حل مسئله مکان‌یابی هاب با در نظر گرفتن زمان قطعی حمل و نقل	کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های حمل و نقل	سلسله مراتبی ۲ سطحی	-	✓	ابتکاری
لیبرک و جوکیون (۲۰۰۹)	بهینه‌سازی مسئله مکان‌یابی ترمینال راه‌آهن در شبکه‌های اروپایی	تعیین مکان‌های مناسب ریل راه‌آهن در دو مسئله P هاب مدلین و مولتی مودال	یک سطحی	-	-	ابتکاری
ایش فاک و ساکس (۲۰۱۱)	مسئله مکان‌یابی هاب - تخصیص در شبکه‌های لجستیک	کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های حمل و نقل	یک سطحی	-	-	ابتکاری
منگ و وانگ (۲۰۱۱)	طراحی مسئله شبکه هاب چندوسیله‌ای و زنجیره‌ای	طراحی شبکه‌ی هاب داخلی برای چند نوع کانتینر سلسله مراتبی حمل و نقل و با شروط متعدد	سلسله مراتبی ۲ سطحی	-	✓	ابتکاری
یامان (۲۰۱۱)	ارزیابی تأثیر استراتژی‌های تخصیص در شبکه هاب	مقایسه تأثیر استراتژی‌های تخصیص مختلف در ساختار شبکه هاب سلسله مراتبی	سلسله مراتبی ۲ سطحی	-	✓	مدل ریاضی
آلومار، یامان و کارا (۲۰۱۲)	مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی با در نظر گرفتن زمان تحویل قطعی در خطوط هوایی کشور ترکیه	کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها	سلسله مراتبی ۳ سطحی	-	✓	مدل ریاضی
پوئرتو و همکاران (۲۰۱۶)	مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی هاب میانه با در نظر گرفتن ظرفیت محدود هاب‌ها	کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها	-	✓	-	ابتکاری
علی عرفان و همکاران (۲۰۱۶)	بررسی مسئله مکان‌یابی هاب تحت شرایط رقابتی	کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها و زمان تحویل	-	-	-	ابتکاری
جان اکونل و اوربول اسکافت (۲۰۱۶)	بررسی بین عملکرد هاب‌های هوایی امارات و قطر با هاب‌های هوایی بزرگ اروپا	بررسی و مقایسه مزایا و معایب نقاط هاب ایرلاین‌های امارات و قطر با هاب‌های هوایی بزرگ اروپا	سلسله مراتبی ۲ سطحی	✓	-	مدل ریاضی
تحقیق حاضر	مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی چندوسیله‌ای با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت هاب‌ها	حداقل کردن مجموع هزینه‌های تأسیس و حمل	سلسله مراتبی ۳ سطحی	✓	✓	مدل ریاضی



شکل (۱): نمای کلی مسئله مورد بررسی در این تحقیق

باشد. محدودیت (۳) نشان می‌دهد که یک هاب زمینی دقیقاً به یک هاب فرودگاهی تخصیص داده می‌شود. اگر هاب زمینی به یک هاب فرودگاهی تخصیص داده شود، آنگاه هاب فرودگاه توسط محدودیت (۴) ایجاد می‌شود. محدودیت (۵) نشان می‌دهد که حاصل جمع هاب‌ها برابر با P است. محدودیت (۶) حاکی از این است که هاب فرودگاه مرکزی الزاماً دایر می‌باشد. روابط (۷) و (۸) باینری بودن متغیرهای x_{ij} و y_{jl} را نشان می‌دهد.

بخش دوم - طراحی شبکه هاب

در طراحی شبکه‌ها، ارتباطات خطوط هوایی همواره از یک شبکه ستاره‌ای شکل تشکیل می‌شود. در طراحی شبکه هاب سلسله مراتبی، همه ارتباطات در شبکه خطوط هوایی از طریق هواپیما و سایر ارتباطات که زمینی هستند با استفاده از کامیون انجام می‌شود. لذا محدودیت‌های زیر جهت تضمین این موارد در مدل ریاضی مسئله مورد نیاز می‌باشد.

$$z_{jl}^l = y_{jl} \quad \forall j \in H, l \in A \setminus \{j\} \tag{9}$$

$$z_{ij}^l = y_{jl} \quad \forall j \in H, l \in A \setminus \{j\} \tag{10}$$

$$z_{jk}^l \leq y_{jl} \quad \forall j \in H, k \in H \setminus \{j\}, l \in A \tag{11}$$

$$z_{jk}^l \leq y_{kl} \quad \forall j \in H, k \in H \setminus \{j\}, l \in A \tag{12}$$

$$z_{jk}^l \in \{0,1\} \quad \forall j \in H, k \in H \setminus \{j\}, l \in A \tag{13}$$

محدودیت‌های (۹) و (۱۰) مشخص می‌کنند که حمل و نقل بین هاب‌ها و هاب‌های فرودگاهی به کامیون نیاز دارد. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) بیانگر این مطلب هستند که اگر دو هاب z و k به یک هاب فرودگاهی یکسان تخصیص داده شوند، یک ارتباط زمینی (کامیونی) بین دو هاب می‌تواند وجود داشته باشد. (به عنوان مثال اگر هم y_{jl} و هم y_{kl} برابر با یک باشند). رابطه (۱۳) باینری بودن z_{jk}^l را نشان می‌دهد.

جدول (۲): تعریف اندیس‌ها و مجموعه‌های مسئله

شرح	اندیس / علائم / مجموعه
اندیس گره تقاضا	I
اندیس هاب زمینی	j, k
اندیس هاب هوایی	L
اندیس هاب مرکزی	0
مجموعه گره‌های تقاضا	D
مجموعه مکان‌های مناسب برای هاب‌ها	H
مجموعه مکان‌های ممکن برای هاب فرودگاهی و مرکزی	$A \subseteq H$
تعداد هاب‌های آماده برای تأسیس	P

با توجه به پارامترها و متغیرهای تعریف شده فوق، مدل ریاضی مسئله در شش بخش ارائه می‌گردد.

بخش اول - مکان‌یابی هاب و تخصیص

$$\sum_{j \in H} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in D \tag{1}$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad \forall i \in D, j \in H \tag{2}$$

$$\sum_{l \in A} y_{jl} = x_{jj} \quad \forall j \in H \tag{3}$$

$$y_{jl} \leq y_{ll} \quad \forall j \in H, l \in A \tag{4}$$

$$\sum_{j \in H} x_{jj} = P \tag{5}$$

$$y_{00} = 1 \tag{6}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in D, j \in H \tag{7}$$

$$y_{jl} \in \{0,1\} \quad \forall j \in H, \forall l \in A \tag{8}$$

محدودیت (۱) نشان می‌دهد که هر گره تقاضا تنها به یک هاب تخصیص داده می‌شود. محدودیت (۲) بیان می‌کند که اگر یک گره تقاضا به یک گره معین تخصیص داده شود، آن گره باید یک گره هاب

$$\sum_{k \in H \setminus \{j\}} f_{jk}^i + g_{j0}^i - g_{0j}^i - \sum_{k \in H \setminus \{j\}} f_{kj}^i = \sum_{s \in D} w_{is} (x_{ij} - x_{sj}) \quad (15)$$

$$\forall i \in D . j \in A \setminus \{0\}$$

$$\sum_{k \in H \setminus \{0\}} f_{0k}^i + \sum_{j \in A \setminus \{0\}} g_{0j}^i - \sum_{j \in A \setminus \{0\}} g_{j0}^i - \sum_{k \in H \setminus \{0\}} f_{k0}^i = \sum_{s \in D} w_{is} (x_{i0} - x_{s0}) \quad (16)$$

$$\forall i \in D$$

$$f_{jk}^i \leq \sum_{s \in D} \sum_{l \in A} w_{is} z_{jl}^s \quad (17)$$

$$\forall i \in D . j \in H . k \in H \setminus \{j\}$$

$$g_{j0}^i + g_{0j}^i \leq \sum_{l \in A} w_{is} y_{jl} \quad (18)$$

$$\forall i \in D . j \in A \setminus \{0\}$$

$$f_{jk}^i \geq 0 \quad \forall i \in D . j \in H . k \in H \setminus \{j\} \quad (19)$$

$$g_{j0}^i . g_{0j}^i \geq 0 \quad \forall i \in D . j \in A \setminus \{0\} \quad (20)$$

محدودیت (۱۴) توازن جریان در هاب‌های زمینی را برقرار می‌کند. محدودیت (۱۵) توازن جریان بین هاب‌های فرودگاهی را با استفاده از هر دو وسیله کامیون و هواپیما برقرار می‌کند. محدودیت (۱۶) توازن جریان هاب فرودگاه مرکزی را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۷) مشخص می‌کند که جریان با استفاده از کامیون‌ها با استقرار ارتباطات کامیونی مسیریابی می‌شوند. محدودیت (۱۸) تعیین می‌کند که جریان با استفاده از هواپیماها، می‌تواند فقط با استقرار ارتباطات هوایی مسیریابی شوند. محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) غیر منفی بودن متغیرهای جریان را نشان می‌دهند.

جدول (۴): تعریف متغیرهای تصمیم

متغیر تصمیم	شرح
x_{ij}	برابر با یک اگر تقاضای گره i از هاب j تامین شود و صفر در غیر این صورت
y_{jl}	برابر با یک اگر هاب j به هاب فرودگاهی $l \in A$ تخصیص داده شود و صفر در غیر این صورت
x_{jj}	برابر با یک اگر در گره j یک هاب مستقر شود و صفر در غیر این صورت
y_{ll}	برابر با یک اگر در گره j یک هاب فرودگاهی مستقر شود و صفر در غیر این صورت
z_{jk}^l	برابر با یک اگر یک ارتباط زمینی بین دو هابی که به یک هاب فرودگاهی یکسان تخصیص داده شده‌اند وجود داشته باشد و صفر در غیر این صورت.

بخش چهارم - محدودیت زمانی

در این بخش محدودیت‌هایی به مدل ریاضی اضافه می‌شود تا تضمین کنند که همه محموله‌ها مطابق با زمان‌های مشخص شده و محدودیت

جدول (۳): تعریف پارامترهای مسئله

پارامتر	شرح
w_{ij}	میزان تقاضا از گره $i \in D$ به $j \in H$
t_{ij}	زمان سفر از گره i به گره j با کامیون
t_{ij}^p	زمان سفر از گره i به گره j با هواپیما
α	ضریب کاهش زمان سفر بین دو هاب، $0 \leq \alpha \leq 1$
m_j	زمان بارگذاری / تخلیه در هاب فرودگاه
\hat{m}_0	زمان بارگذاری / تخلیه در هاب فرودگاه مرکزی
T	زمان رسیدن تمام محموله‌ها به مقصد
f_{jk}^i	جریانی که از گره $i \in D$ آغاز و به هاب $j \in H$ ز رفته و به هاب $k \in H \setminus \{j\}$ با کامیون ختم می‌شود.
g_{j0}^i	جریانی که از گره $i \in D$ آغاز و به هاب فرودگاهی $j \in A \setminus \{0\}$ رفته و به هاب مرکزی ختم می‌شود.
g_{0j}^i	جریانی که از گره $i \in D$ آغاز و به هاب فرودگاه مرکزی رفته و به هاب $j \in A \setminus \{0\}$ ختم می‌شود.
r_j	زودترین زمانی که یک کامیون یا هواپیما از هاب j به سمت هاب دیگر می‌رود.
r_0	زودترین زمانی که همه کامیون‌ها از گره‌های تقاضا و هاب‌های زمینی، و هواپیماها از هاب‌های فرودگاهی به هاب فرودگاه مرکزی می‌رسند.
\bar{r}_j	طولانی‌ترین زمانی که مورد نیاز است تا محموله به گره‌های تقاضای تخصیص داده شده به هاب j تحویل داده شود.
\bar{r}_0	طولانی‌ترین زمانی که مورد نیاز است تا محموله از هاب فرودگاه مرکزی به سایر هاب‌ها و نقاط تقاضا تحویل داده شود.
c_{ij}	هزینه یک واحد مسیر از $i \in D$ به $j \in D$ که یکی از گره‌ها غیر هاب و دیگری هاب نظیر آن باشد.
c_{jk}^T	هزینه یک واحد مسیر از $j \in H$ به $k \in H$ با کامیون، اگر هر دو گره هاب باشند.
c_{j0}^p	هزینه یک واحد مسیر از گره $j \in A \setminus \{0\}$ به گره 0 با هواپیما
c_{ij}	هزینه ثابت عملیاتی ارتباط بین گره $i \in D$ به هاب $j \in H$.
c_{jk}^T	هزینه ثابت عملیاتی ارتباط زمینی از هاب $j \in H$ به هاب $k \in H \setminus \{j\}$
c_j^p	هزینه ثابت عملیاتی ارتباط هوایی بین هاب فرودگاهی $j \in A \setminus \{0\}$ و هاب فرودگاه مرکزی
cap_j	ظرفیت گره‌های هاب زمینی
cap_l	ظرفیت گره‌های هاب هوایی
cap_0	ظرفیت گره هاب مرکزی

بخش سوم - مسیریابی جریان

$$\sum_{k \in H \setminus \{j\}} f_{jk}^i - \sum_{k \in H \setminus \{j\}} f_{kj}^i = \sum_{s \in D} w_{is} (x_{ij} - x_{sj}) \quad (14)$$

$$\forall i \in D . j \in H \setminus A$$

بین هر جفت مبدأ مقصد در زمان محدود T صورت می‌گیرد.

بخش پنجم - محدودیت ظرفیت هاب‌ها

یکی از شرایطی که مسئله را به حالت واقعی و کاربردی نزدیک می‌کند، در نظر گرفتن محدودیت برای ظرفیت هاب‌ها می‌باشد. لذا محدودیت‌های زیر اعمال می‌شود تا مدل ریاضی این شرایط را برآورده کند.

$$\sum_{i \in D} w_{is} x_{ij} \leq \text{cap}_j x_{jj} \quad \forall j \in H \quad (27)$$

$$\sum_{i \in D} w_{is} x_{il} + \sum_{j \in H \setminus \{A\}} w_{is} y_{jl} \leq \text{cap}_l y_{ll} \quad (28)$$

$\forall l \in A$

$$\sum_{i \in D} w_{is} x_{i0} + \sum_{j \in H \setminus \{A\}} w_{is} y_{j0} + \sum_{l \in A} w_{is} x_{l0} \leq \text{cap}_0 y_{00} \quad (29)$$

محدودیت (۲۷) محدودیت ظرفیت مربوط به هاب‌های زمینی را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۸)، محدودیت ظرفیت مربوط به هاب‌های هوایی را در بر می‌گیرد و محدودیت (۲۹) بیانگر محدودیت ظرفیت هاب مرکزی است.

بخش ششم - تابع هدف

تابع هدف حداقل کردن هزینه‌های کل حمل و نقل و هزینه‌های عملیاتی است. این تابع به صورت رابطه (۳۰) می‌باشد. دو جمله اول در تابع هدف، جمع هزینه‌های حمل و نقل را در بخش تخصیص نشان می‌دهد. سومین جمله، هزینه‌های حمل و نقل بین گره‌های هاب با استفاده از ارتباطات کامیونی (زمینی) را محاسبه می‌کند. چهارمین و پنجمین جمله، هزینه‌های حمل و نقل با استفاده از هواپیماها را محاسبه می‌کند. سه جمله آخر نیز، هزینه‌های ثابت عملیاتی ارتباطات زمینی و هوایی را محاسبه می‌کند.

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{i \in D} \left(\sum_{j \in H} \left(C_{ij} \sum_{s \in D} w_{is} + C_{ij} \sum_{s \in D} w_{is} \right) x_{ij} \right. \\ \left. + \sum_{j \in H} \sum_{k \in H \setminus \{j\}} C_{jk}^T f_{jk}^i \right. \\ \left. + \sum_{j \in A \setminus \{0\}} (c_{j0}^p g_{j0}^i + c_{0j}^p g_{0j}^i) \right) \\ + \sum_{i \in D} \sum_{j \in H} C_{ij} x_{ij} \\ + \sum_{l \in A} \sum_{j \in H} \sum_{k \in H \setminus \{j\}} C_{jk}^T z_{jk}^l \\ + \sum_{j \in A \setminus \{0\}} C_j^p y_{jj}. \end{aligned} \quad (30)$$

۳- حل مسئله

به منظور اجرای مدل ریاضی و حل مسائل نمونه؛ از نمونه مسائل طراحی شده در مقاله آومار و همکاران [۲۰] استفاده شده و با توجه به شرایط اضافه شده در تحقیق حاضر، داده‌های این مسائل تکمیل

واحد زمان T به مقصد مورد نظر برسند. لذا محدودیت‌های زیر را داریم.

$$r_j \geq t_{ij} x_{ij} \quad \forall i \in D . j \in H \quad (31)$$

$$r_0 \geq r_j + \sum_{l \in A} (at_{jl} + m_l + t_{l0}^p) y_{jl} \quad (32)$$

$$\bar{r}_j \geq t_{ji} x_{ij} \quad \forall i \in D . j \in H \quad (33)$$

$$\bar{r}_0 \geq \sum_{l \in A} (t_{0l}^p + m_l + at_{lj}) y_{jl} + \bar{r}_j \quad (34)$$

$$r_j + \sum_{l \in A} at_{jk} z_{jk}^l + \bar{r}_k \leq T \quad (35)$$

$\forall j \in H . k \in H \setminus \{j\}$

$$r_0 + \hat{m}_0 + \bar{r}_0 \leq T \quad (36)$$

ایده اصلی محدودیت‌های (۲۱) تا (۲۶) این است که یک کامیون یا هواپیمای آماده برای حرکت در یک هاب، نیاز دارد که برای همه جریان‌های وارد شونده صبر کند. این محدودیت‌های زمانی با توجه به انتظارها قابل توجیه است. کامیون یا هواپیمایی که هر یک از هاب‌ها خارج می‌شود، باید برای جریان وارد شونده از گره‌های تخصیص داده شده به آنها صبر کنند. برای مثال کامیونی که می‌خواهد گره هاب ۴ را به سمت هاب ۵ یا هاب ۱ ترک کند، باید منتظر جریان وارد شونده از سه گره تخصیص داده شده به آن باشد. زودترین زمانی که یک کامیون می‌تواند گره هاب ۴ را ترک کند به وسیله محدودیت (۲۱) تعیین می‌شود. همچنین زمان آماده کردن همه محموله‌ها در هاب فرودگاه مرکزی توسط محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) تعیین می‌شوند. لذا محدودیت (۲۱) تضمین می‌کند که هاب فرودگاه مرکزی برای جریان وارد شونده از گره‌های تخصیص داده شده به آن منتظر می‌ماند. محدودیت (۲۲) تعیین می‌کند که هاب فرودگاه مرکزی برای کامیون‌ها و هواپیماهای وارد شونده از همه گره‌های هاب منتظر می‌ماند. (در شکل، هاب فرودگاه مرکزی برای چهار گره تخصیص داده شده به آن به وسیله محدودیت (۲۱) و از طریق محدودیت (۲۲) برای رسیدن کامیون‌ها از گره‌های هاب ۹ و ۱۰ و همچنین رسیدن هواپیماها از هاب‌های هوایی ۱ و ۲ و ۳ منتظر می‌ماند.)

محدودیت (۲۳)، طولانی‌ترین زمانی که مورد نیاز است تا محموله از هر هاب به گره‌های تخصیص داده شده به آن تحویل داده شود را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۴)، بیان‌کننده طولانی‌ترین زمانی است که برای تحویل محموله از هاب فرودگاه مرکزی به هاب‌ها و گره‌های تقاضا مورد نیاز است. محدودیت (۲۵)، تضمین می‌کند که محموله با استفاده از ارتباطات زمینی بین گره‌های هاب که باید در یک زمان محدود تحویل داده شوند، انتقال پیدا می‌کند. و در نهایت محدودیت (۲۶)، مشخص می‌کند که طولانی‌ترین زمان برای تحویل محموله

شده است. در این مسائل نمونه فرض می‌شود که ۲۰ گره هاب وجود دارد و حمل و نقل آن از دو طرق هوایی و زمینی انجام می‌گیرد. هزینه‌های حمل و نقل زمینی مقداری ثابت در نظر گرفته شده است و هزینه‌های حمل و نقل هوایی بر اساس شرایط متفاوت، متغیر هستند. همچنین برای حمل و نقل هوایی ظرفیتی در نظر گرفته شده است و سعی بر این است که تا حد امکان ظرفیت‌های آن‌ها کامل گردد.

هنگامی که جریان‌های اتصالات زمینی و هوایی در شبکه هاب را مشاهده می‌کنیم، متوجه می‌شویم تقاضا برای استفاده از حمل و نقل زمینی بیشتر از تقاضا با حمل و نقل هوایی است و دلیل این امر آن است که هزینه‌های خطوط هوایی هواپیمایی در مقایسه با هزینه‌های زمینی به مراتب بیشتر است و سفر با خطوط هوایی پرهزینه و گران است.

همان‌طور که ذکر شد مدل پیشنهاد شده بر دو اساس تأکید دارد:

- با توجه به هزینه بالای سفرهای هوایی، تا حد امکان اتصالات هوایی را کاهش دهد.
- با توجه به محدودیت ظرفیت هاب‌ها، استفاده از هر هاب بیش از ظرفیت آن نباشد.

جهت حل مسائل نمونه، مدل ریاضی توسعه داده شده در قسمت قبل در برنامه GAMS کدنویسی شده و در یک کامپیوتر PC اجرا گردید. در جدول (۵)، نتایج حل مدل با در نظر گرفتن سطوح مختلف خدمات و تعداد کل مراکز هاب آورده شده است. در این جدول محدودیت‌های زمانی T بین بازه ۱۸ تا ۲۴، و نیز تعداد هاب‌های در دسترس P حداقل ۲ و حداکثر ۸ در نظر گرفته شده است. نتایج بدین شرح آورده شده است که در ستون اول محدودیت زمانی، در ستون دوم تعداد هاب‌های موجود، در ستون سوم مقدار بهینه تابع هدف، در ستون چهارم شماره مکان هاب‌های زمینی، در ستون پنجم شماره مکان هاب‌های هوایی، و در ستون آخر زمان اجرا و حل مدل آمده است.

در این جدول مشاهده می‌شود زمانی که محدودیت زمانی ۲۴ ساعته وجود دارد تنها از دو هاب (گره) فرودگاهی ۶ و ۱۲ استفاده می‌شود و با کاهش محدودیت زمانی نیاز به هاب بیشتر برای ارائه بهتر خدمات داریم. برای مثال برای محدودیت زمانی ۱۸ ساعته، از ۵ هاب استفاده شده است که هاب‌های ۶، ۱۲، ۱۴، ۱۵ مربوط به هاب‌های هوایی و هاب ۱۷ ام مربوط به هاب زمینی است. همچنین مشاهده می‌شود که کاهش یافتن محدودیت زمانی از ۲۴ به ۲۱ در حالی است که نتایج بهینه‌ای را برای حمل و نقل بین دو هاب در فواصل کوتاه تر را داراست و همچنین افزایش هزینه حمل و نقل برای

نقل هوایی برای دو گره امکان‌پذیر نیست.

در جدول (۶)، تغییرات مقدار تابع هدف نسبت به سه عامل ظرفیت، تعداد هاب و محدودیت زمانی را شاهد هستیم. مهمترین عامل تأثیرگذار تعداد کل هاب‌ها در دسترس می‌باشد. از آنجایی که معمولاً تعداد استفاده از هاب‌های هوایی ثابت است، برای کاهش هزینه‌های حمل و نقل می‌توان بر تعداد هاب‌های زمینی افزود. تابع هدف مدل پیشنهادی نشان‌دهنده هزینه سرمایه‌گذاری برای ساخت هاب و هزینه‌های عملیاتی آنها نیز می‌باشد و این جدول گویای آن است که اگر تعداد هاب‌های در دسترس افزوده شود و با سرمایه‌گذاری هاب‌های مورد نیاز ساخته شود، هزینه‌های خدمات‌رسانی به متقاضیان نیز کاهش می‌یابد. در این جدول، نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن هزینه‌های خدمات هوایی و ظرفیت هاب‌های هوایی توسط نرم‌افزار گمز و حل‌کننده سیمپلکس آورده شده است. که در ستون اول محدودیت زمانی تنها برای زمان‌های ۲۴ و ۲۰ در نظر گرفته شده است. در ستون دوم تعداد هاب‌های در دسترس آورده شده است که برای این مثال ۶ یا ۸ هستند. در ستون سوم ظرفیت هاب‌های سرویس‌دهنده که توزیع یکنواختی بین اعداد ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ می‌باشد آورده شده است و در ستون چهارم مقدار بهینه تابع هدف در ستون پنجم هاب‌های زمینی موجود و در ستون ششم هاب‌های هوایی مورد استفاده و در ستون آخر زمان حل مدل با توجه به پارامترهای ورودی آمده است.

مدل پیشنهادی در دو آزمایش متفاوت زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

- در آزمایش اول فرض بر آن است که محدودیت زمانی سرویس‌دهی ۲۴ ساعت می‌باشد و تعداد هاب‌های سرویس‌دهنده ۶ است.
- در آزمایش دوم فرض بر آن است که محدودیت زمانی سرویس‌دهی ۲۰ ساعت می‌باشد و تعداد هاب‌های سرویس‌دهنده ۸ است.

در جدول (۶) نتایج حاصل شده از حل مدل برای دو مثال آورده شده است.

جدول (۵): نتایج حل مسائل نمونه

T(h)	p	Optimal objective function	Locations of ground hubs	Locations of airport hubs	CPU time(s)
۲۴	۲	۸۱۴۸۹/۹۲	-	۱۲.۶	۷/۳۷
۲۴	۳	۷۳۵۸۵/۶۶	-	۱۲.۱۰.۶	۱۰/۱۳۳
۲۴	۴	۷۰۲۸۴/۶۷	۳	۱۴.۱۲.۶	۵۸۲/۲۷
۲۴	۵	۶۷۲۶۸/۱۶	۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۱۱۶۷/۴۲
۲۴	۶	۶۵۰۹۸/۸۳	۱۷.۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۲۶۲۷/۸۱
۲۴	۷	۶۴۱۱۵/۴۸	۱۷.۱۵.۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۴۴۰۴/۰.۵
۲۴	۸	۶۳۴۴۷/۸۴	۱۸.۱۷.۱۵.۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۵۹۹۶/۱۵
۲۳	۲	۸۱۶۷۵/۴	-	۱۲.۶	۷/۹۸
۲۳	۳	۷۳۷۷۱/۱۴	-	۱۲.۱۰.۶	۹۵/۵
۲۳	۴	۷۰۴۷۰/۱۵	۳	۱۴.۱۲.۶	۷۲۷/۰.۹
۲۳	۵	۶۷۳۱۴/۹۹	۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۱۳۴۳/۱۹
۲۳	۶	۶۵۱۴۵/۶۷	۱۷.۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۱۶۷۴/۱۹
۲۳	۷	۶۴۱۱۵/۴۸	۱۷.۱۵.۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۵۱۹۴/۴۷
۲۳	۸	۶۳۴۴۷/۸۴	۱۸.۱۷.۱۵.۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۵۸۲۰/۵۵
۲۲	۲	۸۲۲۴/۱۵	-	۱۳.۶	۳/۴۲
۲۲	۳	۷۴۳۳۷/۲۴	-	۱۳.۱۰.۶	۱۳/۱
۲۲	۴	۷۱۰۳۶/۲۴	۳	۱۴.۱۳.۶	۳۹۶/۶۳
۲۲	۵	۹۸۵۰۳/۳۵	۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۱۵۴۶/۴۱
۲۲	۶	۶۶۳۳۴/۰.۳	۱۷.۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۲۵۳۹/۸۴
۲۲	۷	۶۴۳۴۰/۳۵	۱۷.۱۵.۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۱۹۶۹/۳۴
۲۲	۸	۶۳۶۷۲/۷۱	۱۸.۱۷.۱۵.۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۴۶۸۱/۵۹
۲۱	۲	۸۲۲۴/۱۵	-	۱۳.۶	۳/۲۲
۲۱	۳	۷۴۳۳۷/۲۴	-	۱۳.۱۰.۶	۱۰/۱۳
۲۱	۴	۷۱۰۳۶/۲۴	۳	۱۴.۱۳.۶	۲۸۱/۹۳
۲۱	۵	۶۸۵۴۹/۱۶	۳	۱۴.۱۷.۹.۶	۹۹۰/۳
۲۱	۶	۶۷۳۸۹/۱	۱۱.۳.۱	۱۴.۱۵.۶	۶۰۲۳/۴۸
۲۱	۷	۶۶۳۲۵/۳۲	۱۷.۱۵.۱۱.۳	۱۴.۱۳.۶	۶۲۶۴/۶۴
۲۱	۸	۶۵۱۷۶/۶۶	۱۸.۱۷.۱۵.۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۵۳۶۴/۳۳
۲۰	۳	۸۱۷۶۴/۸۸	-	۱۲.۱۰.۶	۷/۰.۴
۲۰	۴	۷۳۸۶۰/۶۲	-	۱۹.۱۶.۱۲.۶	۵۶/۷۴
۲۰	۵	۷۰۵۵۹/۶۳	۳	۱۹.۱۶.۱۲.۶	۵۰۲/۳۵
۲۰	۶	۶۸۳۸۹/۵	۱۵.۳	۱۷.۱۵.۱۴.۶	۹۸۳/۶۸
۲۰	۷	۹۷۲۸۸/۱	۱۵.۱۱.۳.۱	۱۵.۱۴.۶	۱۴۹۳/۴۳
۲۰	۸	۶۶۷۰۴/۷۲	۱۶.۱۵.۱۱.۳.۱	۱۵.۱۴.۶	۳۷۱۴/۲۲
۱۹	۴	۷۴۳۹۷/۲۹	-	۱۶.۱۵.۱۲.۶	۶/۴۶
۱۹	۵	۷۱۰۹۶/۳	۳	۱۵.۱۴.۱۲.۶	۱۴۳/۰.۲
۱۹	۶	۶۹۱۷۳/۵۳	۱۷.۳	۱۵.۱۴.۱۲.۶	۳۱۶/۰.۶
۱۹	۷	۶۸۲۵۹/۳۳	۱۸.۱۷.۳	۱۵.۱۴.۱۲.۶	۷۹۱/۷۱
۱۹	۸	۶۷۶۷۵/۹۵	۱۹.۱۸.۱۷.۳	۱۵.۱۴.۱۲.۶	۱۷۶۳/۲۶
۱۸	۵	۷۲۴۷۴/۵۳	۱۷	۱۵.۱۴.۱۲.۶	۹/۲۹
۱۸	۶	۶۸۱۷۳/۵۳	۱۷.۳	۱۵.۱۴.۱۲.۶	۱۲۰/۲۸
۱۸	۷	۶۸۲۵۹/۳۳	۱۸.۱۷.۳	۱۵.۱۴.۱۲.۶	۳۹۸/۲۶
۱۸	۸	۶۷۶۷۵/۹۵	۱۹.۱۸.۱۷.۳	۱۵.۱۴.۱۲.۶	۱۴۸۵/۳۳

جدول (۶): تغییرات تابع هدف نسبت به عوامل مؤثر

T(h)	p	CAP	Optimal objective function	Locations of ground hubs	Locations of airport hub	cpu time (s)
۲۴	۶	۱۰۰۰	۸۲۲۴۱/۵	-	۹.۵.۴.۱۰.۱۷.۱۲	۶۲/۲۸
۲۴	۶	۹۰۰	۸۳۴۵۲/۹	-	۹.۵.۴.۱۰.۱۷.۱۲	۶۶/۸۲
۲۴	۶	۸۰۰	۸۷۸۳۱/۴	۱۶.۱۵	۴.۳.۱۲.۱۰	۱۳۰۰/۳۲
۲۴	۶	۷۰۰	۸۹۸۴۸/۱	۱۸.۱۵.۳	۱۴.۱۲.۶	۲۸۰۳/۷۴
۲۴	۶	۶۰۰	۹۲۴۵۶/۷	۱۸.۱۶.۸.۳	۹.۶	۶۷۴۲/۳۱
۲۴	۶	۵۰۰	۹۲۸۶۹/۸	۱۸.۱۶.۸.۳	۹.۶	۵۶۷۸/۱۹
۲۴	۶	۴۰۰	۹۳۱۷۲/۷	۱۸.۱۶.۸.۳	۹.۶	۱۵۲۴/۴۴
۲۴	۶	۳۰۰	۹۹۸۹۱/۱	۱۸.۱۶.۸.۳	۹.۶	۹۰۲/۱۸
۲۴	۶	۲۰۰	۱۰۰۱۱/۳	۱۸.۱۶.۸.۳	۹.۶	۴۰۰/۶۷
۲۰	۸	۱۰۰۰	۷۹۸۳۲/۴	-	۱۷.۱۵.۱۴.۱۲.۱۰.۶.۴.۱	۵/۷۴
۲۰	۸	۹۰۰	۸۱۱۱۱/۹	۷.۲	۱۷.۱۵.۱۴.۶.۱	۴۶۶/۵۴
۲۰	۸	۸۰۰	۸۳۱۲۳/۲	۱۹.۲.۱	۱۷.۱۵.۱۰.۶.۴	۳۶۸۴/۷۴
۲۰	۸	۷۰۰	۸۳۹۲۵/۷	۱۹.۱۶.۱۱.۳.۱	۱۰.۱۵.۶	۴۰۱۵/۸۲
۲۰	۸	۶۰۰	۸۴۸۲۲/۱	۱۹.۱۶.۱۱.۷.۳.۱	۱۵.۶	۵۶۳۲/۲۱
۲۰	۸	۵۰۰	۸۵۵۲۲/۲	۱۹.۱۶.۱۱.۷.۳.۱	۱۵.۶	۳۸۵۶/۹۵
۲۰	۸	۴۰۰	۸۷۷۲۱/۴	۱۹.۱۶.۱۱.۷.۳.۱	۱۵.۶	۲۹۹۵/۱۱
۲۰	۸	۳۰۰	۸۹۹۷۳/۴	۱۹.۱۶.۱۱.۷.۳.۱	۱۵.۶	۱۱۴۵/۲۳
۲۰	۸	۲۰۰	۹۰۱۲۲/۵	۱۹.۱۶.۱۱.۷.۳.۱	۱۵.۶	۸۵۶/۶۵

برای متقاضیان آن کاسته شده و در نتیجه تقاضا برای استفاده از خطوط زمینی افزوده می شود. همچنین ظرفیت موجود برای خطوط هوایی کامل نمی گردند. می توان گفت در این حالت، بخش اعظمی از خطوط حمل و نقل را خطوط زمینی تشکیل می دهند و تقاضا برای استفاده از هاب های هوایی به سمت صفر میل می کند. در این حالت چون حداکثر استفاده از راه های زمینی است زمان حل کاهش می یابد. به منظور بررسی دقیق تر تأثیر فاکتورهای مسئله بر مقدار تابع هدف، حساسیت تابع هدف نسبت به تغییرات دو پارامتر تعداد هاب و ظرفیت هاب نیز ارزیابی می شود. بدین منظور ابتدا همه پارامترها ثابت در نظر گرفته شده و تأثیر تغییرات متغیر تعداد هاب (P) بر جواب بهینه مسئله و نیز زمان حل آن مورد بررسی قرار می گیرند. سپس همه پارامترها ثابت و ظرفیت هاب ها را تغییر می دهیم تا تأثیر آن بر روی مقدار تابع هدف و زمان حل مسائل را شاهد باشیم. جدول (۷) تأثیر تغییرات P بر روی مقدار تابع هدف و همچنین زمان اجرا را نشان می دهد.

جدول (۷): تأثیر تعداد هاب بر روی تابع هدف و زمان حل مسائل

P	Cost (\$)	Cpu time (s)
۲	۸۱۴۸۹/۹۲	۷/۳۷
۳	۷۳۵۸۵/۶۶	۱۰۱/۳۳
۴	۷۰۲۸۴/۶۷	۵۸۲/۲۷
۵	۶۷۲۶۸/۱۶	۱۱۶۷/۴۲
۶	۶۵۰۹۸/۸۳	۲۶۲۷/۸۱
۷	۶۴۱۱۵/۴۸	۴۴۰۴/۰۵

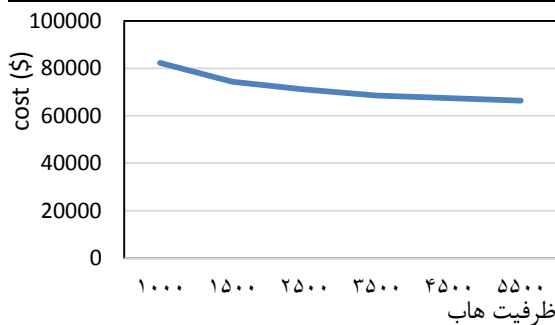
جدول (۶) گویای آن است هنگامی که هزینه های عملیاتی خطوط هواپیما در پایین ترین مقادیر خود قرار دارند، هاب هوایی نسب به هاب زمینی تقاضای بیشتری دارند و حمل و نقل بیشتر از خطوط هوایی است و در نتیجه، اتصالات هواپیمایی بیشتری در شبکه ی حمل و نقل مورد استفاده می گیرد. و همان طور که در جدول دیده می شود زمانی که تقاضای خطوط هوایی بیشتر باشد زمان cpu time بسیار اندک است و این به دلیل سرعت انتقال و خدمات در خطوط هواپیمایی می باشد. همچنین زمانی که هزینه ی خدمات هوایی پایین باشد ظرفیت هواپیماها تقریباً کامل می گردد زیرا که بایستی تقاضاها ارضا گردند. این در حالی است که با افزایش هزینه های خطوط هوایی علاوه بر اینکه استفاده از تعداد هاب های فرودگاه کاهش و بر تعداد هاب های زمینی افزوده می گردد، ظرفیت استفاده از خطوط هوایی هم کاهش چشم گیری خواهد داشت. در این جدول مشاهده می شود در شرایطی که تقاضای استفاده از خدمات هوایی بیشتر از تقاضای خطوط زمینی است، که زمان حل کوتاه است و دلیل آن این است که سرعت ارائه خدمات و طی مسیر مبدأ و مقصد در خطوط هوایی به مراتب بیشتر از خطوط زمینی می باشد.

زمانی که هزینه های سفر هوایی متعادل باشد، تقاضا برای بهره گیری از خطوط هوایی و زمینی به یک نسبت افزایش پیدا می کند و اما ظرفیت هواپیماها کامل نمی شوند و به دلیل استفاده همزمان از خطوط هوایی و زمینی زمان انتقال مسافر و بیشتر می شود. حال وقتی هزینه های سفر هوایی افزایش می یابد، این افزایش به دلیل آن است که هواپیما مسافت بیشتری را طی می کند، لذا قدرت توان پرداخت

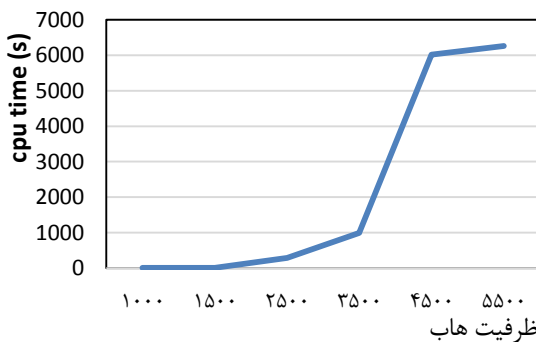
از هاب‌های نزدیکتر فراهم شده و لذا هزینه‌های حمل کاهش می‌یابد. البته همان‌طور که نمودار شکل (۴) نشان می‌دهد این کاهش با افزایش بیشتر ظرفیت هاب‌ها نرخ کمتری داشته و لذا در یک مقدار مشخصی از ظرفیت، مقدار تابع هدف ثابت خواهد ماند و این به معنای ظرفیت بدون استفاده هاب‌ها خواهد بود. یکی از دلایل آن این است که اگرچه با افزایش تعداد هاب، امکان احداث هاب بیشتر فراهم شده و لذا هزینه‌های حمل کاهش می‌یابد اما از سوی دیگر هزینه احداث هاب بیشتر، خود موجب افزایش نسبی در هزینه‌های کل و تابع هدف می‌شود و تأثیر کاهش هزینه‌های حمل را از بین می‌برد. ضمن آنکه افزایش تعداد هاب به شدت موجب افزایش زمان حل می‌شود چراکه فضای جواب گسترده‌تر شده است.

جدول (۸): تأثیر ظرفیت بر روی تابع هدف و زمان حل مسائل

CAP	Cost (\$)	Cpu time (s)
۱۰۰۰	۸۲۲۴۱/۵	۳/۲۲
۱۵۰۰	۷۴۳۳۷/۲۴	۱۰/۱۳
۲۵۰۰	۷۱۰۳۶/۲۴	۲۸۱/۹۳
۳۵۰۰	۶۸۵۴۹/۱۶	۹۹۰/۳
۴۵۰۰	۶۷۳۸۹/۱	۶۰۲۳/۴۸
۵۵۰۰	۶۶۳۲۵/۳۲	۶۲۶۴/۶۴



شکل (۴): روند تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات ظرفیت

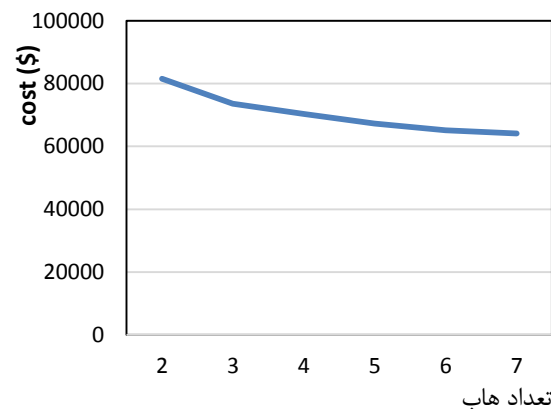


شکل (۵): روند تغییرات زمان حل نسبت به تغییرات ظرفیت

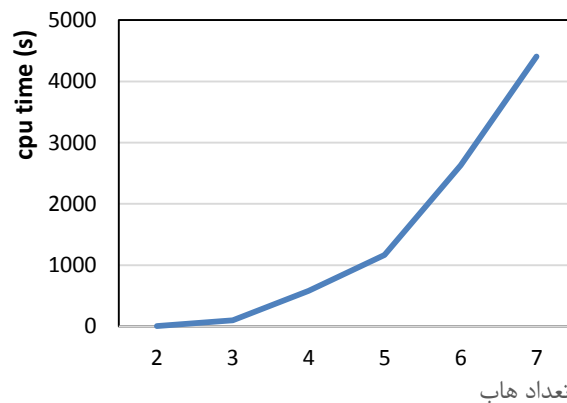
۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق یک مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی با در نظر گرفتن تنوع وسایل حمل و محدودیت ظرفیت هاب مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. اضافه نمودن شرایطی مانند محدودیت ظرفیت هاب‌ها و همچنین تنوع وسایل حمل به مسئله کلاسیک مکان‌یابی

در این بررسی، مقدار پارامتر تعداد هاب از ۲ تا ۷ افزایش یافته و سایر پارامترها دارای مقدار ثابت بوده‌اند. از جمله زمان دریافت محموله مقدار ثابت ۲۴ و ظرفیت هاب‌ها و تعداد گره‌ها نامحدود فرض شده تا اثر تعداد هاب بر مقدار تابع هدف بهتر مشخص گردد. همچنین نمودارهای شکل (۲) و شکل (۳) وضعیت روند این تأثیر را مشخص می‌کند. این نتایج بیانگر آن است که تابع هدف با افزایش تعداد هاب، روند کاهشی دارد. این امر به دلیل آن است که با افزایش تعداد هاب، امکان احداث هاب‌های بیشتر فراهم شده و لذا هزینه‌های حمل کاهش می‌یابد. اگرچه از سوی دیگر هزینه احداث هاب بیشتر خواهد شد اما تأثیر کاهش هزینه‌های حمل بیش از افزایش هزینه‌های احداث هاب اضافی بوده و لذا در مجموع هزینه‌های کل و تابع هدف کاهش یافته است. ضمن آنکه افزایش تعداد هاب سبب گسترده‌تر شدن فضای جواب و افزایش زمان حل می‌شود.



شکل (۲): روند تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات تعداد هاب



شکل (۳): روند تغییرات زمان حل نسبت به تغییرات تعداد هاب

همچنین جدول (۸) تأثیر تغییرات پارامتر ظرفیت را بر روی مقدار تابع هدف و زمان اجرا نشان می‌دهد. در این بررسی، مقدار پارامتر ظرفیت هاب از ۱۰۰۰ تا ۵۵۰۰ افزایش یافته و سایر پارامترها دارای مقدار ثابت بوده‌اند. از جمله زمان دریافت محموله و تعداد هاب‌ها به ترتیب دارای مقادیر ثابت ۲۴ و ۶ بوده و تعداد گره‌ها نامحدود فرض شده است. نمودارهای شکل (۴) و شکل (۵) نیز وضعیت روند این تأثیر را مشخص می‌کند. این نتایج بیانگر آن است که تابع هدف با افزایش ظرفیت هاب‌ها روند کاهشی داشته و دلیل آن می‌تواند این موضوع باشد که امکان تأمین تقاضای گره‌های تقاضا

- [8] Meng, Q., Wang, X., (2011). "Intermodal hub-and-spoke network design: incorporating multiple stakeholders and multi-type containers", *Transportation Research, Part (45)*: 724-74.
- [9] Kara, B.Y., Tansel, B.C., (2001). "The latest arrival hub location problem", *Management Science*, (47): 1408-1420.
- [10] Yaman, H., Kara, B.Y., Tansel, B.C., (2007). "The latest arrival hub location problem for cargo delivery systems with stopovers", *Transportation Research Part B*, (41): 906-919.
- [11] Lin, C.C., Chen, S.H., (2004). "The hierarchical network design problem for time-definite express common carrier", *Transportation Research B*, (38): 271-283.
- [12] Lin, C.C. (2010). "The integrated secondary route network design model in the hierarchical hub-and-spoke network for dual express services", *International Journal of Production Economics* (123): 20-30.
- [13] Smilowitz, K.R., Daganzo, C.F. (2007). "Continuum approximation techniques for the design of integrated package distribution systems", *Networks*, (50): 183-196.
- [14] Chen, H., Campbell, A.M., Thomas, B.W. (2008). "Network design for time-constrained delivery", *Naval Research Logistics*, (55): 493-515.
- [15] Campbell, J.F. (2009). "Hub location for time definite transportation", *Computers and Operations Research*, (36): 3107-3116.
- [16] Sim, T., Lowe, T.J., Thomas, B.W., (2009). "The stochastic p-hub center problem with service-level constraints", *Computers & Operations Research*, (36): 3166-3177.
- [۱۷] غفاری نسب، نادر، غضنفری، مهدی، تیموری، ابراهیم، (۱۳۹۲). طراحی شبکه لجستیک هاب استوار با در نظر گرفتن تقاضاهای تصادفی برای شرکت‌های ارائه دهنده خدمات لجستیکی. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۱(۲): ۹۷-۱۰۷.
- [۱۸] عیدی، علیرضا، برزگر، خالد، (۱۳۹۴). ارائه یک الگوریتم حل دقیق برای مسئله جایابی P هاب میانه با تخصیص r تایی. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۳(۵): ۷۱-۶۱.
- [19] Yaman, H., (2011). "Allocation strategies in hub networks", *European Journal of Operational Research*, (211): 442-451.
- [20] Alumur, S., Yaman, H., Kara, B.Y., (2012). "Hierarchical multimodal hub location problem with time-definite deliveries. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(6): 1107-1120.
- [21] Glareh, Sh., Neamatian monemi, N. Nickel, S., (2015). "Multi-period hub location problems in transportation. *Transportation deliveries*", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, (75): 67-94.

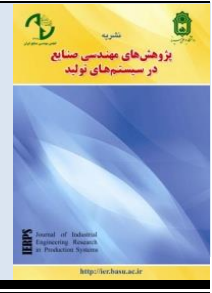
هاب موجب می‌گردد تا این مسئله به شرایط دنیای واقعی و فضای کاربردی نزدیکتر شود. ابتدا این مسئله تشریح و پارامترهای مؤثر و همچنین متغیرهای تصمیم آن تعریف شد. سپس مدل ریاضی مسئله مورد بررسی مطابق با شرایط جدید در نظر گرفته شده توسعه داده شده شد. به منظور اجرای مدل ریاضی و حل مسائل نمونه از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS استفاده گردید و به همین منظور از داده‌های مسائل استاندارد ذکر شده در یکی از منابع نزدیک استفاده شد. در پایان نیز تأثیر تغییرات پارامترهای مهم مسئله بر روی تابع هدف و زمان حل مورد بررسی قرار گرفت.

بر اساس نتایج این تحقیق، دو پارامتر تعداد و ظرفیت هاب تأثیر زیادی بر مقدار تابع هدف (مجموع عوامل هزینه‌ای) دارد. تغییرات ابتدایی این دو پارامتر در ابتدا تابع هدف را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد اما با افزایش دامنه تغییرات، از شدت تأثیر کاسته می‌شود. این دو پارامتر همچنین بر روی زمان حل مسئله مورد بررسی تأثیر زیادی دارند. با توجه به اینکه مسئله مورد مطالعه در رده مسائل سخت قرار دارد، افزایش ابعاد مسئله از جمله تعداد هاب موجب می‌شود تا زمان حل به‌صورت نمایی افزایش یابد. در این خصوص توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری جهت حل این مسئله در ابعاد بزرگ می‌تواند یکی از راهکارهای مناسب جهت کاهش زمان حل باشد. به منظور انجام مطالعات بعدی می‌توان این مسئله را با در نظر گرفتن اختلالات در تأمین تقاضاها بررسی نمود. همچنین غیرقطعی بودن زمان‌های سفر و احتمالی فرض کردن آن نیز می‌تواند مباحث جدیدی برای تحقیقات آتی باشد.

مراجع

- [1] Drezner, Z., (2013). "Facility location. A survey of applications and methods", Springer, New York.
- [2] O'Kelly, M.E., (1986). "The location of interacting hub facilities", *Transportation Science*, (20): 92-105.
- [3] O'Kelly, M.E., (1987). "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities", *European Journal of Operational Research*, (32): 393-404.
- [4] O'Kelly, M.E., Lao, Y., (1991). Mode choice in a hub-and-spoke network: a zero-one linear programming approach. *Geographical Analysis* (23): 283-397.
- [5] Campbell, J.F., (1994). "Integer programming formulations of discrete hub location problems", *European Journal of Operational Research*, (72): 387-405.
- [6] Limbourg, S., Jourquin, B., (2009). "Optimal rail-road container terminal locations on the European network", *Transportation Research Part E*, (45): 551-563.
- [7] Ishfaq, R., Sox, C.R., (2011). "Hub location-allocation in intermodal logistic networks", *European Journal of Operational Research* (210): 213-230.

- [24] O'Connell, J.F., Bueno, O.E., (2016). "A study into the hub performance Emirates, Etihad Airways and Qatar Airways and their competitive position against the major European hubbing airlines", *Journal of Air Transport Management*, In Press, Corrected Proof, Available online 27.
- [22] Puerto, J., Ramos, A.B., Rodríguez-Chía, A.M., Sánchez-Gil, M.C., (2016). "Ordered median hub location problems with capacity constraints", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, (70): 142-156.
- [23] Mahmutogullari, A.I., Kara, B.K., (2016). "Hub location under competition", *European Journal of Operational Research*, (250): 214-225.



Modeling and Solving the Hierarchical Hub Location Problem Considering Several Different Vehicle and Capacity for the Hubs

M. Asadian¹, S.M.H. Hosseini^{1,*}, A.A. Hassani¹

¹ Faculty of Industrial Engineering and Management, Shahrood university of technology, Shahrood, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 November 2016

Accepted 21 May 2017

Keywords:

Location

Hierarchical hub

Multi vehicle

Restricted the hub capacity

ABSTRACT

The hierarchical hub location problem with different kind of vehicle aims to find the number of different needed hub and their location in several levels and also the vehicle and their path in order to minimize total cost of installing and transportations. In this paper, the hierarchical hub location problem considering capacity and verity of vehicles is studied. This condition leads the problem to real world and so the results can be useful for researchers and industrial managements. At first the problem is defined and then its parameters and variables are illustrated. After that a new mathematical model is developed for these new conditions. This is a mixed integer problem and in order to be solved, the GAMS problem is used. Some standard problem that are illustrated in one of the references is used to evaluate and analysis the results. Based on the result, two parameters, the number of hubs and their capacity have high effect on the objective function and time solution.

* Corresponding author. Seyed Mohammad Hassan Hosseini

Tel.: 021-77253999; E-mail address: sh.hosseini@shahroodut.ac.ir