مدیریت صنعتی
Journal of Industrial Management
دانشکدۀ مدیریت دانشگاه تهران
دورۀ ۸، شمارۀ ۴
زمستان ۱۳۹۵
صص. ۶۵۲- ۶۲۵

مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی چند روش حمل و نقلی و چند کالایی در فضای غیرقطعی

مهدی شاهین[۱]، محمد سعید جبل عاملی[۲]، آرمین جبارزاده[۳]

چکیده: هدف این مقاله، مدل‌سازی و حل مسئلۀ مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی تک‌تخصیصه چند کالایی با در نظرگرفتن عدم قطعیت‌های موجود و ملاحظات کیفیت خدمت‌دهی است. شبکۀ هاب سلسله‌مراتبی طراحی شده، سه سطحی است که سطح بالا از شبکۀ کامل هاب‌های مرکزی تشکیل شده است و سطح دوم و سوم به‌ترتیب، شبکه‌های ستاره‌ای مربوط به هاب‌های غیرمرکزی با هاب‌های مرکزی و مراکز تقاضا به هاب‌ها (مرکزی و غیرمرکزی) هستند. در مدل پیشنهادی، با توجه به تابع هدف کمینه‌کردن مجموع هزینۀ حمل و نقل در شبکه، هزینۀ دیرکرد و هزینۀ فعال‌سازی مسیر برای خطوط هوایی غیرفعال، در خصوص مکان هاب‌ها، نحوۀ تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها و نوع وسایل نقلیۀ لازم در هر مسیر، تصمیم بهینه‌ای گرفته شده است. برای ارزیابی مدل ارائه شده، از مجموعه داده جمع‌آوری شده در ایران استفاده شده است. رفتار مدل با تغییرات پارامترها، آنالیز و تحلیل حساسیت شده و نتایج مدیریتی به‌دست آمده است.

***واژه‌های کلیدی:* برنامه‌ریزی ریاضی، سلسله‌مراتبی، عدم قطعیت، مکان‌یابی هاب، منطق فازی.**

۱. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۲. استاد گروه مهندسی صنایع دانشکدۀ مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۳. استادیار گروه مهندسی سیستم دانشکدۀ مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۲۸
تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۹
نویسندۀ مسئول مقاله: مهدی شاهین
E-mail: Mahdi_Shahin@ind.iust.ac.ir

مقدمه

مسئلهٔ مکان‌یابی هاب عبارت است از مکان‌یابی نقاط ترابری غیرمستقیم در یک شبکهٔ توزیع و تخصیص نقاط مبدأ و مقصد به هاب‌ها. کالاها و محصولات از نقاط مبدأ به‌وسیلهٔ هاب‌ها (کوچک، متوسط و بزرگ) جمع‌آوری شده، جابه‌جایی میان هاب‌های مد نظر صورت می‌گیرد و در نهایت عمل توزیع محصولات توسط کوچک‌ترین هاب با جمع‌آوری جریان‌هایی که دارای مقاصد یکسان هستند، به سوی مقاصد انجام می شود. با توجه به نوع درخواست مشتری، تعداد هاب هایی که کالا و محصولات از آنها عبور می‌کنند تا از مبدأ به مقصد مد نظر برسند، بسته به نوع مسئله، متفاوت است.

تخصیص هاب‌ها به دو صورت تکی و چندگانه است؛ در تخصیص چندگانه، جریان‌های ورودی و خروجی به یک نقطه می‌توانند از چند هاب مختلف تأمین شوند. اساسی‌ترین مسئله در سیستم های حمل و نقل، لجستیک و شبکه های ارتباطی، ارسال جریان از نقاط مبدأ به مقصد است. مسئلهٔ طراحی شبکهٔ هاب هنگامی نیاز است که مقداری جریان بین نقاط مبدأ و مقصد ارسال شود، اما برقراری ارتباط مستقیم به همهٔ نقاط موجود ناممکن یا پرهزینه باشد.

طی دو دههٔ اخیر مسائل طراحی شبکه‌های هابی و غیرهابی در بسیاری از زمینه‌ها، مانند حمل و نقل، ارتباطات مخابراتی، شبکه‌های کامپیوتری، خدمات پستی، ترانزیت کالا و مدیریت زنجیرهٔ تأمین، کاربرد روزافزونی داشته است. مسائل مکان‌یابی سلسله‌مراتبی تسهیلات، یکی از انواع مکان یابی تسهیلات است. برخی از کاربردهای مسئلهٔ مکان یابی سلسله‌مراتبی تسهیلات، در مدیریت پسماند و ضایعات، توزیع محصول، ارتباطات مخابراتی، حوزهٔ سلامت، خدمات پزشکی اورژانسی و غیره است. شبکه‌های هاب در طراحی شبکه دو فایدهٔ عمده دارند:

۱. تعداد ارتباطات در این نوع شبکه‌ها نسبت به یک شبکهٔ کامل که ارتباط مستقیم بین گره‌ها مجاز است، بسیار بسیار کمتر می‌شود.

۲. از آنجا که در جریان بین هاب‌ها یک ضریب تخفیف (معمولاً با α نشان داده می‌شود) وجود دارد، شبکه‌های هاب در بسیاری از کاربردها اقتصادی‌ترند.

در دنیای واقعی، پارامترهای مسئله عمدتاً غیرقطعی و نامعین هستند که باید در رویکرد حل مسئله در نظر گرفته شوند. بررسی مسائل هاب در فضای غیرقطعی، یکی از پرکاربردترین مسائل در حوزهٔ مکان‌یابی است و اهمیت زیادی دارد. برای مثال، یک شبکهٔ حمل و نقل هوایی را در نظر بگیرید که چندین فرودگاه و هواپیما دارد و هر فرودگاه نیز شامل چندین باند فرود می‌شود. این مسئله، یک مسئله از نوع هاب در فضای غیرقطعی است و برای مکان‌یابی بهینه، به حل

مسئلۀ هاب در فضای غیرقطعی نیاز دارد؛ چون تعداد مسافران و همچنین هواپیماهایی که به یک فرودگاه مراجعه می‌کنند، احتمالی بوده و مشخص نیست.

پیشینۀ پژوهش

نخستین مطالعه در زمینۀ مکان‌یابی در شبکه که دارای مفاهیم مشابه و نزدیک به مسئلۀ مکان‌یابی هاب بود، توسط حکیمی (۱۹۶۴) صورت گرفت. سپس توح و هیگینز (۱۹۸۵) به بررسی کاربرد شبکه‌های هاب در خطوط هوایی و هواپیمایی پرداختند. نخستین مقالات در این زمینه را اُکلی (۱۹۸۶) ارائه کرد و در آنها به معرفی تعدادی مدل ریاضی و روش حل آنها پرداخت. سپس محققان و پژوهشگران زیادی به این موضوع علاقمند شدند که نتیجۀ آن حجم عظیمی از تحقیقات و مقالات علمی بود.

ارمولیف و لئوناردی (۱۹۸۲) برای نخستین‌بار به بررسی مسائل مکان‌یابی در فضای عدم قطعیت پرداختند. لووکس (۱۹۸۶) مروری بر مدل‌های غیرقطعی در مسائل مکان‌یابی انجام داد که در همۀ آنها مکان‌یابی تسهیلات گام نخست تصمیم‌گیری و الگوی توزیع گام دوم در نظر گرفته شده است. در حال حاضر، تعداد مطالعاتی که به بررسی مسائل مکان‌یابی شبکۀ هاب در حالت غیرقطعی پرداخته باشند، بسیار ناچیز است. از آنجا که در دنیای واقعی با مقولۀ عدم قطعیت مواجه‌ایم، این حوزه به توجه بیشتری نیاز دارد.

آلومور، یامان و کارا (۲۰۱۲) برای نخستین‌بار مدل چندلایه‌ای با سطح برنامه‌ریزی عملیاتی به‌صورت تک‌دوره‌ای و تک‌هدفه را در فضایی گسسته با در نظر گرفتن مسئلۀ پوشش ارائه کردند. مدل مطرح‌شده شامل چهار لایه، از جمله سی گرۀ تقاضا در سطح صفر، هفت هاب غیرمرکزی در سطح یک، سه هاب غیرمرکزی میانه در سطح دو و در نهایت یک هاب مرکزی در سطح یک بود. محدودیت بودجه همراه با ظرفیت محدود برای تسهیلات در نظر گرفته شده و زمان قطعی تحویل در شبکۀ هوایی ترکیه در ۸۱ شهر آن پیاده‌سازی شده است. یکی از ایرادهایی که مدل این پژوهش دارد، آن است که در تابع هدف، فاصله و زمان حداقل شده‌اند، ولی هزینه‌های دیرکرد و ریسک‌های محیطی در نظر گرفته نشده‌اند.

داوری و زرندی (۲۰۱۲) به بررسی مسئلۀ مکان‌یابی هاب در حالت سلسله‌مراتبی با تقاضای غیرقطعی و فازی در حالت تک‌محصولی با تخصیص تکی در سه سطح سلسله‌مراتب پرداختند. ساختار مدل برگرفته از تحقیق یامان (۲۰۰۹) است و چهار هاب غیرمرکزی و چهار هاب مرکزی با ۶ گرۀ تقاضا را دربردارد. در این پروژه فرض شده است که تقاضاها به‌طور دقیق مشخص نیستند و با استفاده از متغیرهای فازی تخمین زده می‌شوند.

یامان و آلومور (۲۰۱۲) به بررسی مسائل مکان‌یابی هاب در سه سطح با اتصال شبکهٔ ستاره‌مانند پرداختند. شبکهٔ ستاره‌ای شبکه‌ای است در آن p هاب انتخاب شده و با اتصال مستقیم به شبکهٔ مرکزی مرتبط می‌شود و گرهٔ غیرهاب را به یک هاب متصل می‌کند. شبکهٔ متصل‌کنندهٔ گره‌های هاب به یکدیگر شبکهٔ اصلی و شبکهٔ متصل‌کنندهٔ گره‌های مصرف‌کننده، شبکهٔ دسترسی نامیده می‌شود. در این پژوهش دو حالت در نظر گرفته شده است؛ حالت اول، مسئلهٔ ایجاد p هاب مرکزی با شبکه‌ای ستاره‌مانند در جهت حداقل‌کردن طول بلندترین مسیر است و در حالت دوم، ایجاد شبکهٔ ستارهٔ p هاب میانی است که حداقل کردن هزینهٔ مسیریابی هدف آن در نظر گرفته شده است.

آید (۲۰۱۳) مدلی با سطح عملیاتی تک‌هدفهٔ تک‌دوره‌ای را در فضایی گسسته در دو سطح سلسله‌مراتب در حالتی که مکان گره‌ها از قبل مشخص بوده و پارامترهای مسئله نیز حالت قطعی داشتند، ارائه کرده است. در این مدل مانند سایر مدل‌ها، هزینه‌های ثابت و هزینه‌های حمل‌ونقل حداقل شده‌اند. اگر سایر هزینه‌های موجود در سیستم‌ها به این مدل اضافه شود، این مدل به خوبی قابل توسعه خواهد بود.

صبوری، غفاری‌نسب، برزین‌پور و جبل‌عاملی (۲۰۱۳) شبکه‌های سلسله‌مراتبی سه‌لایه‌ای را با شبکه‌های قابل دسترسی و شبکهٔ مرکزی به هم مرتبط در نظر گرفتند. ارشدی خمسه و دوست‌محمدی (۲۰۱۴) مدل سه لایه‌ای را با سطح برنامه‌ریزی راهبردی و عملیاتی به‌صورت تک‌دوره‌ای و تک‌هدفه و تک‌محصولی در فضایی گسسته با در نظر گرفتن ظرفیت تسهیلات یکسان و تعداد تسهیلات معین ارائه کردند. همچنین مدل را در حالت قطعی مورد بررسی قرار دادند.

شهانقی و همکارانش یک مدل سه‌لایه‌ای را با سطح برنامه‌ریزی عملیاتی به‌صورت تک‌دوره‌ای و تک‌هدفه و تک‌محصولی در فضایی گسسته و قطعی با در نظر گرفتن ظرفیت تسهیلات یکسان و تعداد تسهیلات معین ارائه کردند (شهانقی، یاوری و حمیدی، ۲۰۱۵).

با مرور مقالات مربوط به هاب سلسله‌مراتبی و عدم قطعیت، به خلأهای موجود در این زمینه پی برده شد. بنابراین از آنجا که در دنیای واقعی با عدم قطعیت روبه‌رو هستیم، این مقوله به توجه بیشتری نیاز دارد. در دنیای واقعی، اغلب پارامترها مانند هزینه، تقاضا، فاصله و زمان به‌دلیل شرایط محیطی و سیاست‌های مختلف دارای عدم قطعیت هستند که باید در رویکرد حل مسئله در نظر گرفته شوند. برای مثال، اگر زمان حمل و نقل مسیر تغییر کند، موجب تأخیر در تحویل کالا و در نتیجه نارضایتی مشتری و هزینهٔ فروش از دست رفته و ... می‌شود. به‌طور کلی سه نوع تکنیک برای مدل‌سازی داده‌های غیرقطعی وجود دارد.

الف) برنامه‌ریزی احتمالی[1]**:** زمانی که توزیع احتمال داده‌ها در دسترس و داده‌ها کافی باشد، استفاده می‌شود.

ب) بهینه‌سازی استوار[2]**:** زمانی که توزیع احتمال داده‌ها در دسترس نباشد و داده‌های کافی نیز موجود نباشد، استفاده می‌شود.

ج) برنامه‌ریزی فازی[3]**:** در وضعیتی که داده‌ها ماهیت کیفی و مبهم یا نادرست داشته باشند و داده‌های تاریخی موجود نباشد، از این روش استفاده می‌شود. داده‌ها نیز زیر نظر کارشناسان استخراج می‌شود.

با توجه به نداشتن داده‌های کافی برای زمان مسیر، این پارامتر به عوامل مختلفی مانند آب و هوا، شرایط ترافیکی، شرایط فیزیکی راه، حجم تقاضا و... وابسته است. همچنین بعضی اطلاعات ممکن است نادرست یا مبهم باشند، برای مقابله با چنین مسئله‌ای و برای واقعی‌تر کردن مسئله، پارامتر زمان مسیر به‌صورت فازی در نظر گرفته شده است.

در این مقاله مدل‌سازی جدیدی ارائه شده است که بتواند مقدار تأخیر و زمان مسیر را برای هر مبدأ و مقصد محاسبه کند؛ موضوعی که به‌دلیل مدل‌سازی پیچیدۀ آن، یکی از خلأهای تحقیقاتی به حساب می‌آمد. به‌طور خلاصه نوآوری‌های این تحقیق عبارت‌اند از:

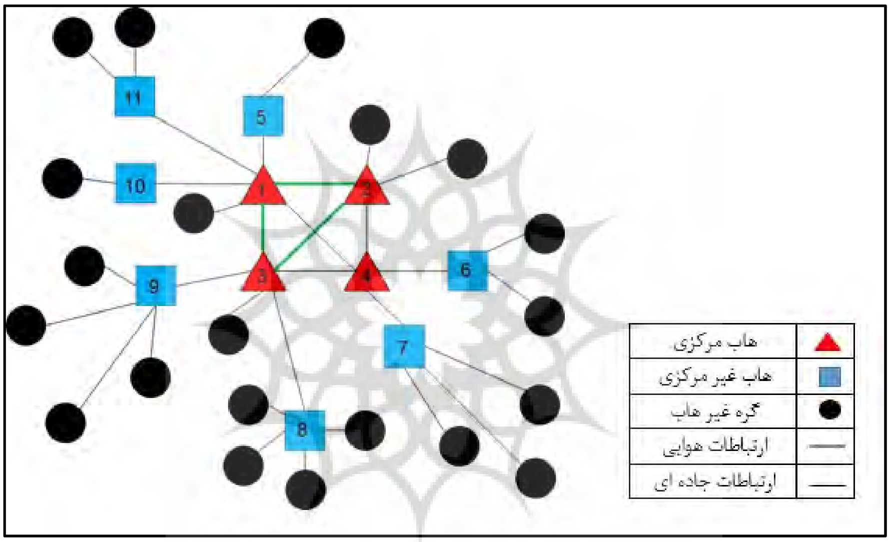
۱. ارائۀ یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جدید برای مکان‌یابی و تخصیص در هاب سلسله‌مراتبی؛
۲. بازه‌ای بودن زمان تحویل کالا؛
۳. طراحی شبکۀ حمل و نقل هاب سلسله‌مراتبی چند روش حمل و نقلی چندکالایی با توجه به ملاحظات کیفیت خدمات‌رسانی در شرایط عدم قطعیت.

تعریف مسئله

شبکۀ هاب سلسله‌مراتبی طراحی شده سه سطحی است که سطح بالا از شبکۀ کامل هاب‌های مرکزی تشکیل شده است و سطح دوم و سوم به‌ترتیب متشکل از شبکه‌های ستاره‌ای مربوط به هاب‌های غیرمرکزی با هاب‌های مرکزی و مراکز تقاضا به هاب‌ها (مرکزی و غیرمرکزی) است؛ یعنی برای انتقال کالا از مبدأ به مقصد، از مسیرهای «مبدأ به هاب غیرمرکزی»، «هاب غیرمرکزی به هاب مرکزی»، «هاب مرکزی مربوط به مبدأ به هاب مرکزی مربوط به مقصد»، «هاب مرکزی به هاب غیرمرکزی متصل به مقصد» و «هاب غیرمرکزی مربوط به مقصد به

1. Stochastic Programming
2. Robust optimization
3. Fuzzy programming

مقصد» استفاده می‌شود. همچنین هریک از این مسیرها ممکن است حذف شوند. برای مثال برای انتقال کالا از مرند به جلفا، انتقال کالا ممکن است فقط از هاب غیرمرکزی تبریز انجام شود و نیازی به استفاده از هاب مرکزی نباشد. در شکل ۱ ساختار شبکهٔ طراحی شده نمایش داده شده است. در این مدل، استفادهٔ همزمان از هر دو روش حمل و نقل جاده‌ای و هوایی بین هاب‌های مرکزی امکان‌پذیر است، مثلاً می‌توان برای کالای ضروری از خطوط هوایی و برای کالای غیرضروری از خطوط جاده‌ای استفاده کرد. استفاده از روش هوایی برای یک مسیر، مستلزم منطقی بودن ارتباط هوایی در آن مسیر و وجود فرودگاه در ابتدا و انتهای مسیر است.



شکل ۱. شبکهٔ هاب سلسله‌مراتبی طراحی‌شده

سؤالاتی که در این مقاله به آنها پاسخ داده می‌شود، عبارت‌اند از:

۱. عدم قطعیت در دنیای واقعی و تغییرات پارامترها چه تأثیری بر طراحی شبکه دارد؟
۲. برای رسیدن به خدمت‌دهی مطلوب در شبکهٔ هاب از چه نوع وسایل حمل و نقل استفاده شود؟
۳. حفظ کیفیت سطح خدمت‌دهی به مشتری چه تأثیری در طراحی شبکه و مکان‌یابی هاب‌ها و تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها دارد؟

اهداف مقاله به‌صورت زیر است:

۱. بررسی تأثیر عدم قطعیت موجود در دنیای واقعی در طراحی شبکهٔ هاب سلسله‌مراتبی؛

۲. ارائهٔ یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جدید برای مسئلهٔ هاب سلسله‌مراتبی؛
۳. تعیین مکان هاب‌ها و تخصیص غیرهاب‌ها به هاب‌ها و تعیین نوع وسایل نقلیهٔ لازم در شبکه؛
۴. طراحی شبکهٔ هاب با توجه به تابع هدف کمینه‌کردن مجموع هزینهٔ حمل و نقل در شبکه، هزینهٔ دیرکرد و هزینهٔ فعال‌سازی مسیر برای خطوط هوایی غیرفعال؛
۵. بررسی کاربرد شبکهٔ هاب سلسله‌مراتبی با ارائهٔ مطالعهٔ موردی؛
۶. تعیین تأثیر کیفیت سطح خدمت‌دهی برای مشتری روی طراحی شبکه؛

مفروضات مسئله

۱. ظرفیت گره‌های هاب نامحدود است.
۲. هزینهٔ نصب تسهیلات هاب در نظر گرفته نشده است.
۳. نحوهٔ تخصیص گره‌های هاب به گره‌های غیرهاب به‌صورت تخصیص تکی است.
۴. فضای جواب به‌صورت شبکه (جست‌وجوی جواب روی گره‌های شبکه) است.
۵. امکان ارتباط مستقیم بین دو گرهٔ غیرهاب وجود ندارد.
۶. دو نوع روش حمل و نقل جاده‌ای و هوایی و کامیون‌های با ظرفیت مختلف در نظر گرفته شده است.
۷. ارتباط مراکز تقاضا با هاب‌ها، هاب‌های غیرمرکزی با مرکزی جاده‌ای فرض شده است.
۸. زمان سفر به‌صورت عدد فازی مثلثی فرض شده است.
۹. شبکهٔ بین هاب‌های مرکزی به‌صورت شبکهٔ کامل فرض شده است.
۱۰. ارتباط هاب‌های مرکزی با یکدیگر از طریق هوایی و زمینی امکان‌پذیر است.
۱۱. مسئلهٔ مد نظر چندکالایی است و هر کالا اهمیت متفاوتی دارد. بنابراین زمان تحویل و هزینهٔ تأخیر برای کالاها یکسان نیست. همچنین زمان تحویل به‌صورت بازه‌ای در نظر گرفته شده است.
۱۲. دو نوع ضریب تخفیف هزینه‌ای و زمانی بین هاب‌ها وجود دارد. ناگفته نماند که ضریب تخفیف بین هاب‌های مرکزی با یکدیگر با ضریب تخفیف مربوط به بین هاب‌های غیرمرکزی و مرکزی، متفاوت فرض شده است (طبیعی است که تجمیع جریان بین هاب‌های مرکزی بیشتر صورت می‌گیرد).
۱۳. زمان تخلیه و بارگیری برای روش حمل و نقل هوایی بین هاب‌های مرکزی در نظر گرفته شده است.

مدل ریاضی

در این بخش، مدل برنامه‌ریزی ریاضی جدید برای مسئلهٔ مکان‌یابی هاب چند روشی حمل و نقل فازی تک‌هدفهٔ چند محصولی ارائه شده و در ادامه دی‌فازی شده است. اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله به‌صورت زیر است:

واحد پارامترها

واحد تقاضا: هزار تن — واحد هزینهٔ حمل و نقل: میلیون تومان

واحد حجم: مترمکعب — واحد مسافت: کیلومتر

واحد زمان: ساعت

مجموعه‌ها

I: مجموعهٔ گره‌ها (شهرها)؛ شهرهای ایران بر اساس جمعیت مرتب می‌شوند. برای مثال وقتی می‌گوییم برای ۱۶ شهر بررسی می‌کنیم، منظور ۱۶ شهر پرجمعیت ایران است.

$H \subseteq I$: مجموعهٔ گره‌های بالقوهٔ هاب؛ طبق آنچه یامان (۲۰۰۹) در پژوهش خود انجام داده است، در این پژوهش نیز شهرهایی که از نظر باربری و حمل کالا فعال‌اند و شرکت باربری هاب دارند، مجموعهٔ H' در نظر می‌گیریم و اشتراک این مجموعه را با مجموعهٔ I، مجموعهٔ H می‌نامیم.

$C \subseteq H$: مجموعه گره‌های بالقوهٔ هاب مرکزی؛ تعدادی از شهرهای مجموعهٔ H' که بیشترین جمعیت را دارند (برای مثال ۱۰ شهر) مجموعهٔ C' فرض می‌کنیم و اشتراک این مجموعه را با مجموعهٔ I، مجموعهٔ C می‌نامیم.

Q: مجموعهٔ وسایل نقلیه (B_2، B_1 و A به‌ترتیب هوایی، جاده‌ای با کامیون عادی ۱۰ تنی و کامیون پیشرفته ۱۵ تنی را نشان می‌دهد).

P: محصولات (ضروری و نیمه ضروری و غیرضروری به‌ترتیب اهمیت با اعداد ۱، ۲ و ۳ نشان داده می‌شوند). ضروری بودن این کالا از نظر زمانی ممکن است به‌دلایل فاسد شدن کالا یا هر دلیلی که مشتری برای ارسال آن عجله دارد (مثلاً کالاهایی مانند دارو و ...)، باشد.

پارامترها

W_{im}^{p}: مقدار تقاضا بین دو گرهٔ مبدأ و مقصد $i \in I$ و $m \in I$ برای کالای $p \in P$؛

d_{ij}: فاصلهٔ جاده‌ای دو گره $i, j \in I$ برحسب کیلومتر (برای سادگی ماتریس مسافت متقارن فرض شده است).

$d_{ij}^{'}$: فاصلهٔ مستقیم (هوایی) دو گرهٔ $i,\ j \in I$ برحسب کیلومتر؛

h^{q}: هزینهٔ مسیر برای واحد مسافت (کیلومتر) با وسیلهٔ حمل و نقل q؛

h^{qp}: هزینهٔ مسیر واحد مسافت (کیلومتر) برای واحد تقاضای کالای p با وسیلهٔ حمل و نقل q؛

vo^{q}: حجم وسیلهٔ نقلیهٔ q بر حسب واحد حجم؛

vo^{p}: حجم اشغالی کالای p بر حسب واحد حجم؛

π_{p}: هزینهٔ (جریمه) دیرکرد واحد کالای ۱، ۲ و ۳ برای واحد زمان (ساعت). برای هر ساعت دیرکردِ واحدکالای ۱، ۲ و ۳ (برحسب هزار تن) به‌ترتیب ۱۰ و ۵ و ۲ واحد پولی (میلیون تومان) در نظر گرفته شده است (این جریمه برای متعهد کردن شرکت به خدمات‌رسانی بهتر، به‌ویژه در خصوص کالاهای ضروری، به‌منظور پایدار ماندن در فضای رقابتی و رضایت مشتری اعمال شده است و فقط به‌معنای خراب شدن یا فاسد شدن کالا نیست).

T_{1}^{p} و T_{2}^{p}: آرمان سطح اول و دوم برای زمان تحویل کالای p (به هیچ وجه نباید از T_{2}^{p} بیشتر شود و اگر بیشتر از شد، باید جریمه‌ای معادل π_{p} در هر واحد زمانی دیرکرد برای کالای p در نظر گرفت).

α_{H}: ضریب تخفیف هزینه‌ای ارتباط هاب‌های غیرمرکزی با مرکزی؛

α_{C_1}: ضریب تخفیف هزینه‌ای ارتباط هوایی بین هاب‌های مرکزی؛

α_{C_2}: ضریب تخفیف هزینه‌ای ارتباط جاده‌ای بین هاب‌های مرکزی؛

α'_{H}: ضریب تخفیف زمانی ارتباط هاب‌های غیرمرکزی با مرکزی؛

α'_{C_1}: ضریب تخفیف زمانی ارتباط هوایی بین هاب‌های مرکزی؛

α'_{C_2}: ضریب تخفیف زمانی ارتباط جاده‌ای بین هاب‌های مرکزی؛

p_1: تعداد هاب‌های غیرمرکزی؛

p_0: تعداد هاب‌های مرکزی؛

p: تعداد هاب‌ها؛

a_{lv}: اگر در هر دو گره‌هاب مرکزی $l, v \in C$ و $v \neq l$ فرودگاه داشته باشیم و ارتباط هوایی بین این دو گره معقول باشد، مقدار آن ۱ است.

F_{lv} : هزینهٔ مدیریت مسیر بین $l, v \in C$ $v \neq l$ اگر ارتباط هوایی فعال شود. طبق اطلاعات به‌دست آمده، برخی شهرها فرودگاه غیرفعال دارند؛ بنابراین برای فرودگاه‌هایی که غیرفعال هستند این هزینه را می‌توان در نظر گرفت.

$\tilde{t}_{ij}^{q}$: زمان انتقال بین دو گره $i\in I$ و $j\in I$ با وسیلهٔ نقلیه $q\in Q$. به‌دلیل ناتوانی در تخمین دقیق زمان، این پارامتر به‌صورت فازی مثلثی در نظر گرفته می‌شود.

v^{q}: سرعت وسیلهٔ نقلیه $q\in Q$. سرعت ۸۰ کیلومتر و ۸۰۰ کیلومتر بر ساعت برای کامیون و هواپیما. اگر فاصله جاده‌ای (d_{ij}) یا هوایی (d'_{ij}) بین دو گره j و i را داشته باشیم و سرعت وسایل نقلیه برای سفر بین این دو گره (i,j) نیز داده شده باشد، فرض می‌کنیم:

$\tilde{t}_{ij,2}^{A}=\frac{d'_{ij}}{v^{A}}$ و $\tilde{t}_{ij,2}^{B_1}=\frac{d_{ij}}{v^{B_1}}$ و $\tilde{t}_{ij,1}^{q}=0.9\tilde{t}_{ij,2}^{q}$ و $\tilde{t}_{ij,3}^{q}=1.1\tilde{t}_{ij,2}^{q}$.

$(l_1>l_2>l_3)l_1,l_2,l_3$: مجموع زمان تخلیه و بارگیری و مرتب‌سازی در بین هاب‌های مرکزی جاده‌ای (l_3)، بین هاب غیرمرکزی و مرکزی (l_2)، بین هاب‌های مرکزی هوایی (l_1) (تغییریافتن از روش جاده‌ای به هوایی از نظر بارگیری و تخلیه و... زمان‌بر است برای همین فقط l_1 را برای محاسبهٔ زمان در نظر می‌گیریم).

این زمان فقط برای هواپیما در نظر گرفته می‌شود و حدود ۴۵ تا ۶۰ دقیقه است که ما ۱ ساعت فرض می‌کنیم؛ بنابراین $l_1=2$ ساعت. همچنین $l_2=0.8$ و $l_3=0.5$ ساعت.

این مطالعه برای شبکهٔ حمل و نقل کشور و برای کلیهٔ کالاها انجام شده است. ناگفته نماند که داده‌ها و پارامترها از طریق مراجعهٔ حضوری به سازمان حمل و نقل جاده‌ای و منابع الکترونیکی به‌دست آمده است. همچنین سعی شده است طبق اطلاعات موجود، تا حد امکان نسبت محصولات ضروری و غیرضروری و نیمه ضروری درست در نظر گرفته شود.

متغیرهای تصمیم

Z_{ijl}: اگر گرهٔ $i\in I$ به هاب $j\in H$ و هاب $j\in H$ به هاب مرکزی $l\in C$ تخصیص یابد، عدد ۱ در نظر گرفته می‌شود و در غیر این صورت صفر است (نکتهٔ شایان توجه اینکه امکان دارد Z_{ijl} برابر با ۱ شود، اما لزومی ندارد $j\in H$ حتماً هاب غیرمرکزی باشد، ممکن است هاب مرکزی باشد. همچنین Z_{lll} وقتی ۱ است که $l\in C$ هاب مرکزی شود و Z_{jjl} نیز هنگامی برابر با ۱ است که هاب $j\in H$ به هاب مرکزی $l\in C$ تخصیص یابد. اگر $\sum_{\substack{l\in C\\ j\neq l}} Z_{jjl}=1, \forall j\in H$ آن وقت گرهٔ $j\in H$ هاب غیرمرکزی است)؛

$\widetilde{dt}_{im}^{p}$: زمان طی شده برای انتقال کالای $p\in P$ بین دو گره $i\in I$ و $m\in I$؛

dl_{im}^{p}: تأخیر در زمان انتقال کالای $p\in P$ بین دو گره $i\in I$ و $m\in I$ از مقدار T_1^{p}؛

f_{kl}^{iqp} : مقدار جریان عبوری از $i\in I$ به‌عنوان مبدأ برای کالای $p\in P$ به سمت مقصد از طریق هاب‌های مرکزی متمایز $k\in K, l\in C$ به‌طوری که بین هاب‌های مرکزی از وسیلهٔ حمل و نقل $q\in Q$ استفاده می‌کند؛

g_{jl}^{ip}: مقدار جریان انتقالی از $i \in I$ به‌عنوان مبدأ یا مقصد بین هاب $j \in H$ و هاب مرکزی $l \in C$ برای کالای $p \in P$؛

z_{lv} : اگر دو هاب مرکزی $l, v \in C$ و $v \neq l$ برای انتقال جریان از طریق هوایی استفاده کنند برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است؛

z_{lv}^{p}: اگر دو هاب مرکزی $l, v \in C$ و $v \neq l$ برای انتقال جریان کالای $p \in P$ از طریق هوایی استفاده کنند برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است.

مدل پیشنهادی (غیرخطی و فازی)

رابطهٔ ۱)

$$f : min \sum_{i \in I} \sum_{m \in I} \sum_{p \in P} (w_{im}^{p} + w_{mi}^{p}) \sum_{j \in H} d_{ij} h^{B_1 p} \sum_{l \in C} z_{ijl}$$
$$+ \sum_{i \in I} \sum_{j \in H} \sum_{l \in C/\{j\}} \sum_{p \in P} \alpha_H d_{jl}\, g_{jl}^{ip} h^{B_1 p} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in C} \sum_{l \in C/\{j\}} \sum_{p \in P} \alpha_{c_1} d'_{jl} f_{jl}^{iAp} h^{Ap} +$$
$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in C} \sum_{l \in C/\{j\}} \sum_{p \in P} \alpha_{c_2} d_{jl} f_{jl}^{iB_2 p} h^{B_2 p} +$$
$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in I} \sum_{p \in P} \pi_p (dl_{im}^{p} w_{im}^{p}) + \sum_{\substack{l,v \in C \\ l \neq v}} F_{lv} z_{lv}$$

عبارت اول این تابع هدف ($\sum_{i \in I} \sum_{m \in I} \sum_{p \in P} (w_{im}^{p} + w_{mi}^{p}) \sum_{j \in H} d_{ij} h^{B_1 p} \sum_{l \in C} z_{ijl}$) مجموع هزینهٔ جریان انتقالی از مبدأ $i \in I$ به هاب مربوط به مبدأ $j \in H$ (مرکزی یا غیر مرکزی) و از هاب $j \in H$ مربوط به مقصد (مرکزی یا غیر مرکزی) $m \in I$ را محاسبه می‌کند. بخش دوم رابطه با توجه به اینکه g_{jl}^{ip} را مقدار جریان انتقالی از $i \in I$ به‌عنوان مبدأ یا مقصد بین هاب $j \in H$ و هاب مرکزی $l \in C$ برای کالای $p \in P$ تعریف کردیم، مجموع هزینهٔ بین هاب $j \in H$ (مرکزی یا غیر مرکزی) و هاب مرکزی $l \in C$ (از هاب $j \in H$ به هاب $l \in C$ و هم برعکس، یعنی از هاب $l \in C$ به هاب $j \in H$) را نشان می‌دهد. به‌طور خلاصه این بخش، هزینهٔ بین هاب غیرمرکزی و هاب مرکزی را محاسبه می‌کند. دقت شود که اگر $j \in H$ مرکزی باشد، $l \in C$ نیز مرکزی است و در نتیجه هزینه صفر خواهد بود (این موضوع را می‌توانید از تابع هدف نیز نتیجه بگیرید، با توجه به اینکه اگر $j \in H$ و $l \in C$ هر دو مرکزی باشند، باید حتماً مساوی باشند و در نتیجه d_{jl} صفر خواهد بود). پس می‌توان گفت این عبارت هزینهٔ بین هاب غیرمرکزی و هاب مرکزی را محاسبه کرده و عبارت سوم و چهارم نیز هزینهٔ بین هاب‌های

مرکزی را محاسبه می‌کند. همچنین عبارت پـنجم و ششـم بـه‌ترتیـب، هزینـهٔ تـأخیر و هزینـهٔ فعال‌سازی مسیر را نشان می‌دهند.

رابطهٔ ۲)
$$s.t: \quad \sum_{j\in H}\sum_{l\in C} z_{ijl} = 1 \quad \forall i\in I$$

این محدودیت بیان‌کنندهٔ این نکته است که هر گره باید فقط به یک هاب تخصیص یابد.

رابطهٔ ۳)
$$z_{ijl} \le z_{jjl} \quad \forall i\in I, j\in H/\{i\}, l\in C$$

این محدودیت نشان می‌دهد زمانی z_{ijl} می‌تواند برابر با ۱ شود که z_{jjl} نیز ۱ باشد. به بیان دیگر، اگر گره $i\in I$ به هاب $j\in H$ و هاب $j\in H$ به هاب مرکزی $l\in C$ تخصیص یابد، باید حتماً هاب غیرمرکزی یا مرکزی $j\in H$ نیز به هاب مرکزی $l\in C$ تخصیص یابد.

رابطهٔ ۴)
$$\sum_{m\in H} z_{jml} \le z_{lll} \quad \forall j\in H, l\in C/\{j\}$$

محدودیت فوق الزام می‌کند که اگر $\sum_{m\in H} z_{jml}$ برابر با ۱ شود، باید $l\in C$ هاب مرکزی باشد.

رابطهٔ ۵)
$$\sum_{j\in H}\sum_{l\in C} z_{jjl} = p$$

محدودیت بالا بیان می‌کند که تعداد هاب‌ها (مرکزی و غیرمرکزی) باید برابر مقدار مشخص از پیش تعیین شدهٔ p باشد. همچنین محدودیت زیر تعداد هاب‌های مرکزی را نشان می‌دهد.

رابطهٔ ۶)
$$\sum_{l\in C} z_{lll} = p_0$$

رابطهٔ ۷)
$$\Big(\sum_{k\in C/\{l\}} f_{lk}^{iAp} - \sum_{k\in C/\{l\}} f_{kl}^{iAp}\Big) + \Big(\sum_{k\in C/\{l\}} f_{lk}^{iB_2p} - \sum_{k\in C/\{l\}} f_{kl}^{iB_2p}\Big) = \sum_{m\in I} w_{im}^{p} \sum_{j\in H}(z_{ijl} - z_{mjl}) \quad \forall i\in I, l\in C, p\in P$$

محدودیت‌های بالا، محدودیت تعادلی بین هاب‌هـای مرکـزی اسـت. بـرای هـاب مرکـزی $l\in C$ مقدار جریان عبوری از $i\in I$ به‌عنوان مبدأ بـرای کـالای $p\in P$ بـه سـمت مقصـد از طریق هاب‌های مرکزی متمایز $k\in K, l\in C$ است؛ به‌طوری کـه بـین هـاب‌هـای مرکـزی از وسیلهٔ حمل و نقل $q\in Q$ استفاده می‌کند و وابسته به این است که مقصد به همان هاب مرکزی $l\in C$ متصل نباشد، چون اگر مبدأ و مقصد به یک هاب مرکزی وصل باشند، دیگر جریانی بـین

هاب‌های مرکزی صورت نخواهد گرفت، به همین دلیل، تفاضل z_{ijl}, z_{mjl} را در نظر می‌گیریم، اگر هر دو برابر با ۱ یا هر دو صفر باشند، جریان بین هاب‌های مرکزی صورت نگیرد.

محدویت‌های زیر نیز محدودیت‌های تعادلی مربوط به جریان انتقالی بین هاب غیرمرکـزی و هاب مرکزی است.

رابطهٔ ۸)
$$g_{jl}^{ip} \geq \sum_{m\in I/\{j\}} \left(w_{im}^{p} + w_{mi}^{p}\right)(z_{ijl} - z_{mjl})$$
$$\forall i \in I, j \in H, l \in C/\{j\}, p \in P$$

رابطهٔ ۹)
$$z_{ljl} = 0 \quad \forall j \in H, l \in C/\{j\}$$

رابطهٔ ۱۰)
$$f_{kl}^{iAp}, f_{kl}^{iB_2p} \geq 0 \qquad \forall i \in I, k \in C, l \in C/\{k\}, p \in P$$

رابطهٔ ۱۱)
$$g_{jl}^{ip} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in H, l \in C/\{j\}, p \in P$$

رابطهٔ ۱۲)
$$dl_{im}^{p}, d\tilde{t}_{im}^{p} \geq 0 \quad \forall i \in I, m \in I, i \neq m, p \in P$$

رابطهٔ ۱۳)
$$d\tilde{t}_{ii}^{p}, dl_{ii}^{p} = o \qquad \forall i \in I, p \in P$$

رابطهٔ ۱۴)
$$\sum_{i\in I} f_{lv}^{iAp} \leq M.z_{lv}^{p} \qquad \forall l, v \in C, l \neq v, p \in P$$

رابطهٔ ۱۵)
$$z_{lv} \leq a_{lv} \qquad \forall l, v \in C, l \neq v$$

رابطهٔ ۱۶)
$$z_{lv}^{p} \leq z_{lv} \qquad \forall l, v \in C, l \neq v, p \in P$$

محدودیت‌هـای بـالا بیـان مـی‌کننـد کـه مقـدار جریـان هـوایی بـین هـاب‌هـای مرکـزی $l, v \in C, l \neq v$ برای کالای $p \in P$ زمانی می‌تواند مقدار بگیرد که رابطـهٔ هـوایی بـین آنهـا برای آن کالا فعال شده باشد و زمانی می‌تواند رابطهٔ هوایی برای یک کالا فعال شود کـه رابطـهٔ هوایی بین این دو گره، معقول بوده و همچنین رابطهٔ هوایی فعال شده باشد.

رابطهٔ ۱۷)
$$z_{lv} \leq z_{lll}, z_{lv} \leq z_{vvv}$$
$$\forall l, v \in C, l \neq v$$

محدودیت بالا الزام می‌کند که رابطهٔ هوایی فقط بتواند بین هاب‌های مرکزی برقرار شود.

محدودیت زیر نیز بیان‌کنندهٔ این نکته است که اگر دو هاب مرکزی $l,v\in C$ و $v\neq l$ برای انتقال جریان از طریق هوایی استفاده کنند، حتماً برای حداقل یک کالا رابطهٔ هوایی فعال شـود، یعنی خط هوایی آنها بدون استفاده بماند.

رابطهٔ ۱۸)
$$\sum_{p\in P} z_{lv}^{p} \geq z_{lv} \qquad \forall l,v\in C, l\neq v$$

رابطهٔ ۱۹)
$$\sum_{i\in I} f_{lv}^{iB_2p} \leq M.(1-z_{lv}^{p}) \qquad \forall l,v\in C, l\neq v, p\in P$$

این محدودیت گویای این نکته است که میزان جریان زمینی بین دو هاب مرکزی برای یک کالا، زمانی بزرگ‌تر از صفر است که جریان هوایی آن صفر باشد؛ یعنی امکان انتقالا از دو طریق برای یک کالا امکان‌پذیر نیست.

رابطهٔ ۲۰)
$$\sum_{v\in C, l\neq v} f_{lv}^{iAp} + f_{lv}^{iB_2p} \leq M.z_{lll} \qquad \forall l\in C, i\in I, p\in P$$

رابطهٔ ۲۱)
$$\sum_{l\in C, l\neq v} f_{lv}^{iAp} + f_{lv}^{iB_2p} \leq M.z_{vvv} \qquad \forall v\in C, i\in I, p\in P$$

محدودیت‌هـای فـوق بیـان مـی‌کننـد کـه مقـدار جریـان زمینـی یـا هـوایی بـین دو گـره $l,v\in C, l\neq v$ با مبدأ $i\in I$ برای کالای $p\in P$ یعنی $f_{lv}^{iAp}, f_{lv}^{iB_2p}$ زمانی می‌تواند مقدار بگیرد که هر دو گره هاب مرکزی باشند.

رابطهٔ ۲۲)
$$z_{ijl}\in\{0,1\} \quad \forall i\in I, j\in H, l\in C$$

رابطهٔ ۲۳)
$$z_{lv}{}^{p}, z_{lv}\in\{0,1\} \qquad \forall l,v\in C, l\neq v, p\in P$$

رابطهٔ ۲۴)
$$\begin{aligned} d\tilde{t}_{im}^{p} &= \sum_{j\in H}\sum_{l\in C} z_{ijl} z_{mjl} (\tilde{t}_{ij}^{B_1} + \tilde{t}_{jm}^{B_1}) + \\ &\sum_{\substack{j,u\in H\\ j\neq u}}\sum_{l\in C} z_{ijl} z_{mul} (\tilde{t}_{ij}^{B_1} + \alpha'_H \tilde{t}_{jl}^{B_1} + \alpha'_H \tilde{t}_{lu}^{B_1} + \tilde{t}_{um}^{B_1}) \\ &+ \sum_{\substack{j,u\in H\\ j\neq u}}\sum_{\substack{l,v\in C\\ l\neq v}} z_{ijl} z_{muv} ((\tilde{t}_{ij}^{B_1} + \alpha'_H \tilde{t}_{jl}^{B_1} + \alpha'_H \tilde{t}_{vu}^{B_1} + \tilde{t}_{um}^{B_1}) + \\ &((l_1 + \alpha'_{c_1} \tilde{t}_{lv}^{A}) z_{lv}^{p} + \alpha'_{c_2} \tilde{t}_{lv}^{B_2} (1 - z_{lv}^{p}))) \\ &\forall i,m\in I, i\neq m, p\in P \end{aligned}$$

رابطۀ ۲۵) $\tilde{dt}_{im}^{p} - dl_{im}^{p} \le T_1^{p} \quad ,\tilde{dt}_{im}^{p} \le T_2^{p} \qquad \forall i,m \in I, i \neq m, p \in P$

محدودیت بالا نیز بیان می‌کند که مقدار زمان طی شده برای انتقال کـالای $p \in P$ بـین دو گرۀ $i \in I$ و $m \in I$ باید از مقدار T_2^{p} فراتر نرود. همچنین تأخیر در زمان انتقال کـالای $p \in P$ بین دو گرۀ $i \in I$ و $m \in I$ از مقدار T_1^{p} را محاسبه می‌کند.

خطی شدۀ مدل پیشنهادی

محدودیت ۲۴ یعنی محدودیت متناظر با محاسبۀ زمـان، غیرخطـی اسـت کـه خطـی‌شـدۀ آنهـا به‌صورت زیر است، همچنین متغیرهای تصمیم زیر نیز اضافه خواهند شد.

متغیرهای تصمیم جدید برای خطی کردن مدل

x_{ijlm}: برابر با ۱ است، هرگاه به ازای $\forall i,m \in I, i \neq m, j \in H, l \in C$ هر دو متغیـر Z_{mjl} و Z_{ijl} برابر با ۱ باشند؛ یعنی مبدأ و مقصد، هاب مرکزی و غیرمرکزی یکسان داشـته باشـند، در غیر این صورت برابر با صفر است.

x_{ijlum}: برابر با ۱ است، هرگاه به ازای $\forall i,m \in I, i \neq m, j,u \in H, j \neq u, l \in C$ هـر دو متغیر Z_{mul} و Z_{ijl} برابر با ۱ باشند؛ یعنی مبـدأ و مقصـد، هـاب مرکـزی یکسـان، ولـی هـاب غیرمرکزی متفاوت داشته باشند، در غیر این صورت صفر است.

$x_{ijlvump}^{1}$: برابـر بـا ۱ اسـت، هرگـاه بـه ازای $\forall i,m \in I, i \neq m, j,u \in H, j \neq u, l,v \in C$ $l \neq v, p \in P$ هرسه متغیر تصمیم $z_{ijl}, z_{muv}, z_{lv}^{p}$ برابر با ۱ باشند؛ یعنی مبدأ و مقصـد، هـاب مرکزی و هاب غیرمرکزی متفاوت داشته باشند و همچنین بین هاب‌های مرکزی بـرای کـالای $p \in P$ روش حمل و نقل هوایی به‌کار رود، در غیر این صورت صفر است.

$x_{ijlvump}^{2}$:برابر بـا ۱ اسـت، هرگـاه بـه ازای $\forall i,m \in I, i \neq m, j,u \in H, j \neq u, l,v \in C$ $l \neq v, p \in P$ دو متغیر تصمیم z_{ijl}, z_{muv} برابر با ۱ و z_{lv}^{p} صفر باشـد؛ یعنـی مبـدأ و مقصـد، هاب مرکزی و هاب غیرمرکزی متفاوت داشته باشند و همچنین بین هـاب‌هـای مرکـزی بـرای کالای $p \in P$ روش حمل و نقل جاده‌ای به‌کار رود، در غیر این صورت صفر است.

مدل خطی شده

رابطۀ ۲۶) $x_{ijlm} \ge z_{ijl} + z_{mjl} - 1,\ \ x_{ijlm} \le z_{ijl},\ \ x_{ijlm} \le z_{mjl},\ \ x_{ijlm} \in \{0,1\}$
$\forall i,m \in I, i \neq m, j \in H, l \in C$

رابطهٔ (۲۷)

$$x_{ijlum} \geq z_{ijl} + z_{mul} - 1,\ \ x_{ijlum} \leq z_{ijl},\ \ x_{ijlum} \leq z_{mul},\ \ x_{ijlum} \in \{0,1\}$$
$$\forall i, m \in I, i \neq m, j, u \in H, j \neq u, l \in C$$

رابطهٔ (۲۸)

$$x^{1}_{ijlvump} \geq z_{ijl} + z_{muv} + z^{p}_{lv} - 2,\ \ x^{1}_{ijlvump} \leq z_{ijl}, z_{muv}, z^{p}_{lv},\ \ x^{1}_{ijlvump} \in \{0,1\}$$
$$\forall i, m \in I, i \neq m, j, u \in H, j \neq u, l, v \in C, l \neq v, p \in P$$

رابطهٔ (۲۹)

$$x^{2}_{ijlvump} \geq z_{ijl} + z_{muv} - z^{p}_{lv} - 1,\ \ x^{2}_{ijlvump} \leq z_{ijl}, z_{muv}, 1 - z^{p}_{lv}\ \ \ x^{2}_{ijlvump} \in \{0,1\}$$
$$\forall i, m \in I, i \neq m, j, u \in H, j \neq u, l, v \in C, l \neq v, p \in P$$

رابطهٔ (۳۰)

$$d\tilde{t}^{p}_{im} = \sum_{j \in H} \sum_{l \in C} x_{ijlm} (\tilde{t}^{B_1}_{ij} + \tilde{t}^{B_1}_{jm}) + \sum_{\substack{j,u \in H \\ j \neq u}} \sum_{l \in C} x_{ijlum} (\tilde{t}^{B_1}_{ij} + \alpha'_{H} \tilde{t}^{B_1}_{jl} + \alpha'_{H} \tilde{t}^{B_1}_{lu} + \tilde{t}^{B_1}_{um})$$
$$+ \sum_{\substack{j,u \in H \\ j \neq u}} \sum_{\substack{l,v \in C \\ l \neq v}} x^{1}_{ijlvump} ((\tilde{t}^{B_1}_{ij} + \alpha'_{H} \tilde{t}^{B_1}_{jl} + \alpha'_{H} \tilde{t}^{B_1}_{vu} + \tilde{t}^{B_1}_{um}) + (l_1 + \alpha'_{c_1} \tilde{t}^{A}_{lv})) +$$
$$\sum_{\substack{j,u \in H \\ j \neq u}} \sum_{\substack{l,v \in C \\ l \neq v}} x^{2}_{ijlvump} ((\tilde{t}^{B_1}_{ij} + \alpha'_{H} \tilde{t}^{B_1}_{jl} + \alpha'_{H} \tilde{t}^{B_1}_{vu} + \tilde{t}^{B_1}_{um}) + (\tilde{t}^{B_2}_{lv} \alpha'_{c_2}))$$
$$\forall i, m \in I, i \neq m, p \in P$$

روش دی‌فازی کردن

زاده (۱۹۶۵) مفهوم مجموعه‌های فازی را برای نخستین‌بار مطرح کرد. تئوری امکـان نیـز بـرای نخستین‌بار توسط زاده (۱۹۷۸) ارائه شد و پس از وی، محققان بسـیاری مانند دوبیـوس و پریـد (۱۹۸۸) این تئوری را گسترش دادند. لیـو و لیـو (۲۰۰۲) برای اولین‌بار معیار اعتبار را ارائه کردند و بعد آن نیز در برهه‌های زمانی مختلف اصلاح و تعـدیل شد. در این بخش، اصول اولیه مربـوط به اعداد فازی تعریف می‌شود و این تعاریف و ویژگی‌ها، در بخش‌های بعدی مورد اسـتفاده قـرار می‌گیرد.

تعریف ۱: اگر اعداد فازی $\tilde{\xi}_1 = (a,b,c)$ و $\tilde{\xi}_2 = (d,e,f)$ مثلثی باشند، جمع و تفریق این اعـداد نیز اعداد فازی مثلثی خواهند بود (لی و هیونگ، ۲۰۰۶).

رابطهٔ (۳۱)

$$\tilde{\xi}_1 (+) \tilde{\xi}_2 = (a+d, b+e, c+f)$$

تعریف ۲: اگر $\tilde{\xi}$ یک عدد فازی و r عدد قطعی باشد، ارتباط بین سه معیار امکان[1]، الزام[2] و اعتبار[3] برای رویداد $\tilde{\xi} \leq r$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود (لیو و لیو، ۲۰۰۲):

1. Possibility
2. Necessity
3. Credibility

رابطهٔ ۳۲)
$$Cr\left\{\tilde{\xi} \le r\right\} = \frac{1}{2}\left(Pos\left\{\tilde{\xi} \le r\right\} + Nec\left\{\tilde{\xi} \le r\right\}\right)$$

طبق آنچه ژو و ژانگ (۲۰۰۹) اثبات کرده‌اند، اگر $\tilde{\xi}$ عدد فازی مثلثی و $\lambda >$ ۰/۵ باشد، داریم:

رابطهٔ ۳۳)
$$Cr\left\{\tilde{\xi} \le r\right\} \ge \lambda \Leftrightarrow r \ge (2-2\lambda)\xi^{(2)} + (2\lambda-1)\xi^{(3)}$$

براساس تعاریف سه معیار امکان، الزام و اعتبار برای رویداد $r \le \tilde{\xi}$ داریم:

رابطهٔ ۳۴)
$$Pos\{\tilde{D} \ge r\} = \begin{cases} 1, & \text{if } r \le d_2, \\ \dfrac{d_3 - r}{d_3 - d_2}, & \text{if } d_2 \le r \le d_3, \\ 0, & \text{if } r \ge d_3, \end{cases}$$

$$Nec\{\tilde{D} \ge r\} = \begin{cases} 1, & \text{if } r \le d_1, \\ \dfrac{d_2 - r}{d_2 - d_1}, & \text{if } d_1 \le r \le d_2, \\ 0, & \text{if } r \ge d_2, \end{cases}$$

$$Cr\{\tilde{D} \ge r\} = \begin{cases} 1, & \text{if } r \le d_1, \\ \dfrac{2d_2 - d_1 - r}{2(d_2 - d_1)}, & \text{if } d_1 \le r \le d_2, \\ \dfrac{d_3 - r}{2(d_3 - d_2)}, & \text{if } d_2 \le r \le d_3, \\ 0, & \text{if } r \ge d_3. \end{cases}$$

مدل ارائه شده در این پژوهش فازی است، اکنون مدل به‌کمک رویکرد (CCP)[1] مبتنی بر اعتبار، دی‌فازی می‌شود. به‌طور کلی، برنامه‌ریزی مقید شدهٔ تصادفی مبتنی بر اعتبار (لیو، ۲۰۰۴؛ لیو و لیو، ۲۰۰۲)، نوعی روش برنامه‌ریزی ریاضی فازی محاسباتی کارآمد به‌شمار می‌رود که به مفاهیم قوی ریاضی متکی است و می‌تواند برای انواع مختلف اعداد فازی مانند اعداد مثلثی و ذوزنقه‌ای به‌کار رود. همچنین امکان برآورده‌کردن برخی از محدودیت‌های احتمال در حداقل

1. Chance-Constrained Programming (CCP)

برخی از سطوح اطمینان داده شده را برای تصمیم‌گیرنده فراهم می‌کند. برای دی‌فازی کردن مدل فازی از رابطهٔ زیر استفاده می‌کنیم.

$$Cr\{\tilde{D} \geq r\} = \begin{cases} 1, & \text{if} \quad r \leq d_1, \\ \dfrac{2d_2 - d_1 - r}{2(d_2 - d_1)}, & \text{if} \quad d_1 \leq r \leq d_2, \\ \dfrac{d_3 - r}{2(d_3 - d_2)}, & \text{if} \quad d_2 \leq r \leq d_3, \\ 0, & \text{if} \quad r \geq d_3. \end{cases}$$ رابطهٔ ۳۵)

شایان ذکر است که چون ω (ضریب اعتبار فازی) مطلوب مسئله، تقریباً برابر با ۱ است (قصد داریم روابط و محدودیت‌ها برقرار باشند)، در این‌جا از عبارت $d_1 \leq r \leq d_2$ رابطهٔ فوق استفاده می‌کنیم. برای مثال رابطهٔ $\tilde{A} + \tilde{B} \geq C$ را به‌صورت زیر دی‌فازی می‌کنیم:

$$\tilde{D} = (d_1, d_2, d_3) = \tilde{A} + \tilde{B}$$ رابطهٔ ۳۶)

$$\tilde{A} = (A_1, A_2, A_3)$$

$$\tilde{B} = (B_1, B_2, B_3)$$

$$Cr(\tilde{A} + \tilde{B} \geq C) \geq \omega$$

با جایگذاری در رابطه، داریم:

$$\frac{2(A_2 + B_2) - (A_1 + B_1) - C}{2((A_2 + B_2) - (A_1 + B_1))} \geq \omega$$ رابطهٔ ۳۷)

با ساده کردن رابطهٔ بالا، به رابطهٔ زیر می‌رسیم:

$$2(1 - \omega)d_2 + (2\omega - 1)d_1 \geq C$$ رابطهٔ ۳۸)

بنابراین اگر $\tilde{D} = (d_1, d_2, d_3)$ باشد، رابطهٔ $\tilde{D} \geq r$ به‌صورت زیر دی‌فازی می‌شود:

$$2(1 - \omega)d_2 + (2\omega - 1)d_1 \geq C$$ رابطهٔ ۳۹)

مدل نهایی دی‌فازی شده

محدودیت‌های فازی ۱۲، ۱۳، ۲۵ و ۳۰ به محدودیت‌های زیر تبدیل می‌شوند، یعنی محدودیت‌های زیر معادل محدودیت شانس[1] محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳ و ۲۵ و ۳۰ هستند.

1. Chance-constrained

رابطهٔ ۴۰)
$$dl_{im}^{p}, d\tilde{t}_{im,1}^{p}, d\tilde{t}_{im,2}^{p} \geq 0 \qquad \forall i \in I, m \in I, i \neq m, p \in P$$

رابطهٔ ۴۱)
$$d\tilde{t}_{ii,1}^{p}, d\tilde{t}_{ii,2}^{p}, dl_{ii}^{p} = o \qquad \forall i \in I, p \in P$$

رابطهٔ ۴۲)
$$\begin{aligned}
d\tilde{t}_{im,1}^{p} = & \sum_{j \in H} \sum_{l \in C} x_{ijlm} (\tilde{t}_{ij,1}^{B_1} + \tilde{t}_{jm,1}^{B_1}) + \sum_{\substack{j,u \in H \\ j \neq u}} \sum_{l \in C} x_{ijlum} (\tilde{t}_{ij,1}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{jl,1}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{lu,1}^{B_1} + \tilde{t}_{um,1}^{B_1}) \\
& + \sum_{\substack{j,u \in H \\ j \neq u}} \sum_{\substack{l,v \in C \\ l \neq v}} x_{ijlvump}^{1} ((\tilde{t}_{ij,1}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{jl,1}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{vu,1}^{B_1} + \tilde{t}_{um,1}^{B_1}) + (l_1 + \alpha_{c_1}^{'} \tilde{t}_{lv,1}^{A})) + \\
& \sum_{\substack{j,u \in H \\ j \neq u}} \sum_{\substack{l,v \in C \\ l \neq v}} x_{ijlvump}^{2} ((\tilde{t}_{ij,1}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{jl,1}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{vu,1}^{B_1} + \tilde{t}_{um,1}^{B_1}) + (\tilde{t}_{lv,1}^{B_2} \alpha_{c_2}^{'})) \\
& \forall i, m \in I, i \neq m, p \in P
\end{aligned}$$

رابطهٔ ۴۳)
$$\begin{aligned}
d\tilde{t}_{im,2}^{p} = & \sum_{j \in H} \sum_{l \in C} x_{ijlm} (\tilde{t}_{ij,2}^{B_1} + \tilde{t}_{jm,2}^{B_1}) + \sum_{\substack{j,u \in H \\ j \neq u}} \sum_{l \in C} x_{ijlum} (\tilde{t}_{ij,2}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{jl,2}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{lu,2}^{B_1} + \tilde{t}_{um,2}^{B_1}) \\
& + \sum_{\substack{j,u \in H \\ j \neq u}} \sum_{\substack{l,v \in C \\ l \neq v}} x_{ijlvump}^{1} ((\tilde{t}_{ij,2}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{jl,2}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{vu,2}^{B_1} + \tilde{t}_{um,2}^{B_1}) + (l_1 + \alpha_{c_1}^{'} \tilde{t}_{lv,2}^{A})) + \\
& \sum_{\substack{j,u \in H \\ j \neq u}} \sum_{\substack{l,v \in C \\ l \neq v}} x_{ijlvump}^{2} ((\tilde{t}_{ij,2}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{jl,2}^{B_1} + \alpha_H^{'} \tilde{t}_{vu,2}^{B_1} + \tilde{t}_{um,2}^{B_1}) + (\tilde{t}_{lv,2}^{B_2} \alpha_{c_2}^{'})) \\
& \forall i, m \in I, i \neq m, p \in P
\end{aligned}$$

رابطهٔ ۴۴)
$$2(\omega - 1) d\tilde{t}_{im,2}^{p} + (1 - 2\omega) d\tilde{t}_{im,1}^{p} + dl_{im}^{p} + T_1^{p} \geq 0 \quad \forall i, m \in I, i \neq m, p \in P$$

رابطهٔ ۴۵)
$$2(\omega - 1) d\tilde{t}_{im,2}^{p} + (1 - 2\omega) d\tilde{t}_{im,1}^{p} + T_2^{p} \geq 0 \quad \forall i, m \in I, i \neq m, p \in P$$

یافته‌های پژوهش

مدل برنامه‌ریزی ریاضی شبکهٔ حمل و نقل ایران برای شهرهایی که در شکل ۲ نشان داده شده است، به‌وسیلهٔ نرم‌افزار (GAMS) به اجرا درآمد. در این بخش، ضمن بررسی مدل در حالت قطعی و غیرقطعی، تأثیرات تغییر پارامترها بر توابع هدف نیز تحلیل خواهد شد. پارامترهای کلیدی مسئله عبارت‌اند از تعداد گره‌های هاب مرکزی (p)، زمان تحویل کالا، ضریب اعتبار اعداد فازی (ω) و ضریب تخفیف هزینه‌ای و زمانی ($\alpha_H, \alpha_{C_1}, \alpha_{C_2}$). وسایل حمل و نقل در این مسئله هواپیما، کامیون عادی و پیشرفته فرض شده است. داده‌هایی که برای حل مسئله

استفاده شده، از تارنمای آمار ایران به‌دست آمده که به‌دلیل نوع مدل، تغییراتی در آنها اعمال شده است. مدل را در حالت قطعی (زمانی که پارامتر فازی زمان را به‌صورت عدد قطعی، برابر با عـدد وسط این عدد فازی مثلثی در نظر بگیریم) بررسی می‌کنیم. طبیعی است که جواب مدل در حالت فازی و $\omega =$ ۰/۵ برابر با حالت قطعی می‌شود. بعـد از بررسـی مـدل در حالـت قطعـی، حالـت غیرقطعی نیز بررسی می‌شود و نتایج آنها مقایسه و تجزیه تحلیل خواهد شد. شایان ذکر است که نتایج به‌دست آمده با نظر کارشناسان و خبرگان حوزهٔ حمل و نقـل مطابقـت داشـته و بـه تأییـد ایشان رسیده است.

شکل۲. موقعیت ١٦شهر پرجمعیت ایران در نقشه

تحلیل حساسیت روی پارامتر زمان تحویل کالا در حالت قطعی و غیرقطعی

بازهٔ زمانی تحویل کالا برای کالای ۱، ۲ و ۳ را به‌ترتیب برابر (۲۵ و ۱۰)، (۳۵ و ۳۰)، (۴۰ و ۳۵) فرض می‌کنیم. در این قسمت، مدل را برای ۱۲ شهر پرجمعیت ایران در حالتی که زمان تحویـل کالا به‌ترتیب ۱، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳ و ۱/۴ برابر شود، پیاده سازی می‌کنیم. نتـایج حاصـل از اجـرای مدل به‌صورت خلاصه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. نتایج مدل با تغییرات در پارامتر زمان تحویل کالا در شبکهٔ ستاره‌ای در حالت غیرقطعی

	$p_1 = 2$, $p_{.} = 2, \omega = 0/9$, $\alpha_H = 0/95$, $\alpha_{c_1} = \alpha_{c_2} = 0/9$ $T_1^P = (10, 30, 35)$, $T_2^P = (25, 35, 40)$				
چند برابر شدن زمان تحویل کالا	۱	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴
زمان حل (ثانیه)	۵۲۰	۱۰۷۲	۱۹۵۵	۲۴۷۴	۳۵۶۹
مقدار تابع هدف هزینه بر حسب میلیون واحد	۱/۲۷۰۵۲	۱/۲۰۴۲۳۲	۱/۱۶۰۰۴	۱/۱۰۴۸	۱/۱۰۴۸
هاب‌های مرکزی	۱و۲	۱ و ۳	۱ و ۳	۱ و ۳	۱ و ۳
هاب‌های غیرمرکزی	۳ و ۵	۲ و ۵	۲ و ۵	۲ و ۵	۲ و ۵
تخصیص گره‌ها	۴ و ۸ و ۹ و ۱۱ به ۱ ۱۲ به ۲ ۱۰ به ۵ ۶ و ۷ به ۳	۴ و ۷ و ۸ و ۹ و ۱۱ و ۱۲ به ۱ ۱۰ به ۵ ۶ به ۳	۴ و ۸ و ۹ و ۱۱ به ۱ ۱۰ به ۵ ۶ و ۷ و ۱۲ به ۳	۴ و ۸ و ۹ و ۱۱ به ۱ ۱۲ به ۲ ۱۰ به ۵ ۶ و ۷ به ۳	۴ و ۸ و ۹ و ۱۱ به ۱ ۱۲ به ۲ ۱۰ به ۵ ۶ و ۷ به ۳
تخصیص هاب غیرمرکزی به هاب‌ها	۳ و ۵ به ۱	۲ و ۵ به ۱	۲ و ۵ به ۱	۲ و ۵ به ۱	۲ و ۵ به ۱
روش حمل و نقل	هوایی برای کالای ۱ از ۱ به ۲ و ۲ به ۱	همهٔ ارتباطات جاده‌ای است.	همهٔ ارتباطات جاده‌ای است.	همهٔ ارتباطات جاده‌ای است.	همهٔ ارتباطات جاده‌ای است.

با توجه به جدول ۲ مشهود است که با افزایش در زمان تحویل کالا، هزینه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در حالات اولیه میزان کاهش بیشتر است، به‌عبارتی در حالتی که زمان ۱/۱ برابر می‌شود، کاهش شایان توجهی در هزینه‌ها دیده می‌شود که علت آن استفاده از روش حمل و نقل جاده‌ای به جای روش حمل و نقل هوایی است. در همهٔ حالات به جز حالت اول (یعنی حالت سخت‌گیرانه برای محدودیت زمان تحویل کالا) هاب‌های مرکزی و غیرمرکزی یکسان هستند و فقط تغییرات در تخصیص صورت گرفته است. همچنین همهٔ ارتباطات جاده‌ای است. در حالت سخت‌گیرانه، ۱ و ۲ به‌عنوان هاب مرکزی و ۳ و ۵ به‌عنوان هاب غیرمرکزی انتخاب شده‌اند و در بقیهٔ حالات، ۱ و ۳ هاب مرکزی و ۲ و ۵ هاب غیرمرکزی است . بنابراین برای رسیدن به شبکهٔ حمل و نقل بهینه، باید به این نکته توجه شود که اگر زمان تحویل کالا سخت‌گیرانه است تصمیم در مورد مکان هاب‌ها که تصمیمی استراتژیک است با حالت سهل‌گیرانه متفاوت خواهد

بود؛ ضمن آن که در تمام حالات، شهر ۱ به‌عنوان هاب مرکزی انتخاب شده و تمـام هـاب‌هـای غیرمرکزی به هاب مرکزی ۱ تخصیص یافته‌اند که این امر اهمیت شهر ۱ و مسـیرهای منتهـی به آن را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه نتایج مدل با تغییرات در پارامتر زمان تحویل کالا در شبکهٔ ستاره‌ای در حالت قطعی

	$p_1 = ۲$, $p_. = ۲, \omega = ۰/۵$, $\alpha_H = ۰/۹۵$, $\alpha_{c_1} = \alpha_{c_2} = ۰/۹$				
چند برابر شدن زمان تحویل کالا	۱	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴
زمان حل (ثانیه)	–	۵۴۷	۱۱۷۵	۱۸۹۶	۲۴۲۰
مقدار تابع هدف هزینه بر حسب میلیون واحد	–	۱/۳۵۶۹	۱/۱۹۹۸	۱/۱۵۸۶	۱/۱۰۶۵
هاب‌های مرکزی	–	۱ و ۲	۱ و ۳	۳ و ۴	۱ و ۳
هاب‌های غیرمرکزی	–	۳ و ۵	۲ و ۵	۲ و ۵	۲ و ۵
تخصیص گره‌ها	–	۴ و ۸ و ۹ و ۱۱ به ۱ ۱۲ به ۲ ۱۰ به ۵ ۶ و ۷ به ۳	۴ و ۷ و ۸ و ۹ و ۱۱ و ۱۲ به ۱ ۱۰ به ۵ ۶ به ۳	۱ و ۸ و ۹ و ۱۱ به ۱ ۱۰ به ۵ ۶ و ۷ و ۱۲ به ۳	۴ و ۸ و ۹ و ۱۱ به ۱ ۱۲ به ۲ ۱۰ به ۵ ۶ و ۷ به ۳
تخصیص هاب غیرمرکزی به هاب‌ها	–	۳و ۵ به ۱	۲ و ۵ به ۱	۲ و ۵ به ۴	۲ و ۵ به ۱
روش حمل و نقل	–	هوایی برای کالای ۱ از ۱ به ۲ و ۲ به ۱	همهٔ ارتباطات جاده‌ای است.	همهٔ ارتباطات جاده‌ای است.	همهٔ ارتباطات جاده‌ای است.

در اینجا نیز مثل حالت غیرقطعی با افزایش در زمان تحویل کالا، هزینه‌ها کاهش می‌یابد. در حالات اولیه میزان کاهش بیشتری دیده می‌شود و دلیل آن استفاده از روش حمل و نقل جاده‌ای به جای روش حمل و نقل هوایی است. همچنین تفـاوت در مکـان‌یـابی و تخصـیص در حالـت قطعی و غیرقطعی، لزوم توجه به عدم قطعیت را نشان می‌دهد.

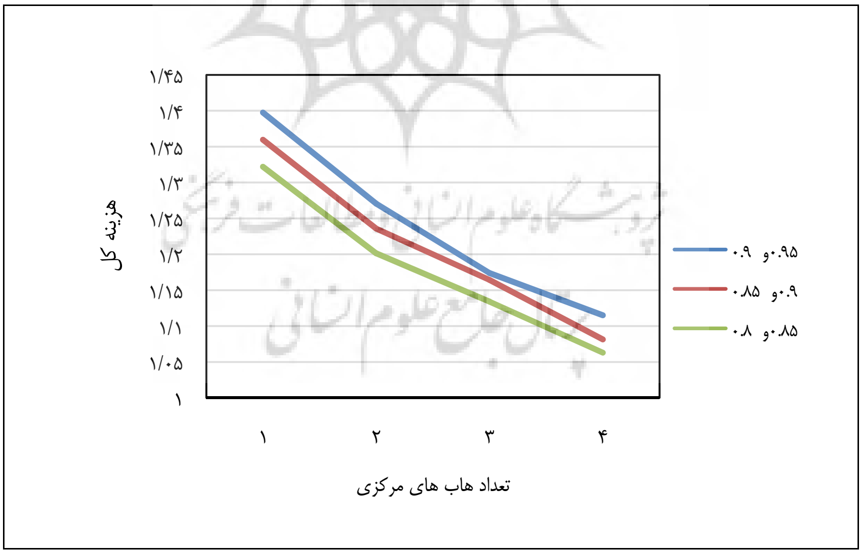
جدول ۳. نتایج مدل با تغییرات در پارامتر زمان تحویل کالا، تعداد هاب مرکزی و ضریب تخفیف

$P = p_1 + p_. = ٤ \;, \omega = ٠/٩ \;, n = ١٢$

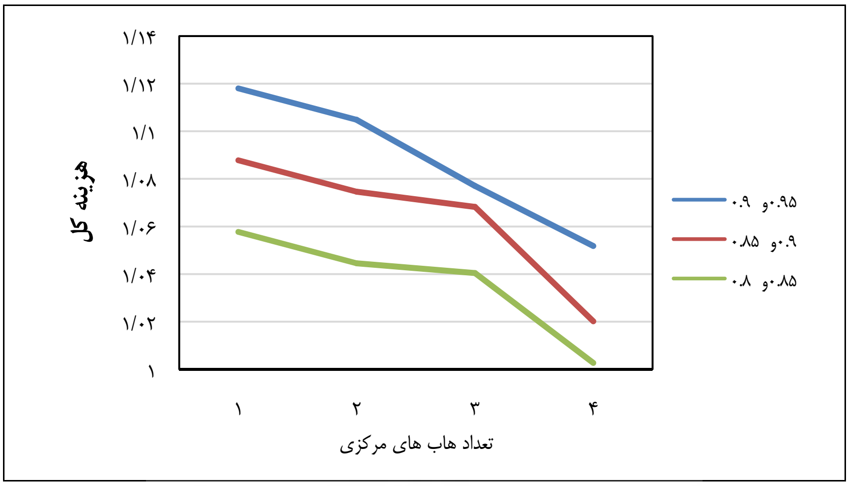
زمان حل	هاب‌های غیرمرکزی	هاب‌های مرکزی	مقدار تابع هدف هزینه ($\times ١٠^٦$)	$p_.$	چند برابر شدن زمان تحویل کالا	$\alpha_H, \alpha_{c_1} = \alpha_{c_2}$
۲۹۸	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۱۱۴۹۰۸	۴	۱	۰/۹ و ۰/۹۵
۷۶۵	۵	۱ و ۲و ۳	۱/۱۷۳۹۳	۳		
۵۲۰	۳ و ۵	۱ و ۲	۱/۲۷۰۵۲	۲		
۳۹۷	۲ و ۳ و ۵	۱	۱/۳۹۷۵	۱		
۴۳۰	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۰۸۳۳۵۴	۴	۱/۱	
۱۴۷۳	۵	۱ و ۲و ۳	۱/۱۲۰۰۸	۳		
۱۰۷۲	۲ و ۵	۱ و ۳	۱/۲۰۴۲۳۲	۲		
۲۹۶	۱ و ۲ و ۶	۳	۱/۳۴۱۶	۱		
۵۲۲	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۰۷۲۸۳۶	۴	۱/۲	
۱۷۵۸	۵	۱ و ۲ و ۳	۱/۱۰۹۳۱	۳		
۱۹۵۵	۲ و ۵	۱ و ۳	۱/۱۶۰۰۴	۲		
۴۹۰	۲ و ۳ و ۵	۱	۱/۲۲۹۸	۱		
۶۰۴	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۰۵۱۸	۴	۱/۳	
۲۵۵۱	۵	۱ و ۲ و ۳	۱/۰۷۷۰	۳		
۲۴۷۴	۲ و ۵	۱ و ۳	۱/۱۰۴۸	۲		
۶۹۴	۲ و ۳ و ۵	۱	۱/۱۱۸۰	۱		
۳۷۶	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۰۸۱۴۱۲	۴	۱	۰/۸۵ و ۰/۹
۷۹۸	۲	۱ و ۳ و ۵	۱/۱۶۴۳۳۸	۳		
۶۹۰	۳ و ۵	۱ و ۲	۱/۲۳۵۷۹	۲		
۳۵۱	۲ و ۳ و ۵	۱	۱/۳۵۹۷۵	۱		
۵۲۳	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۰۵۰۸۰۶	۴	۱/۱	
۱۷۹۵	۵	۲ و ۳ و ۴	۱/۱۱۰۹۲۸	۳		
۱۳۸۷	۳ و ۵	۲ و ۴	۱/۱۷۱۳۱۴	۲		
۳۹۶	۲ و ۳ و ۵	۱	۱/۳۰۵۳۶	۱		
۵۹۹	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۰۴۰۶۰۴	۴	۱/۲	
۱۹۴۵	۵	۱ و ۲ و ۳	۱/۱۰۰۲۴۶	۳		
۱۸۶۰	۲ و ۵	۱ و ۳	۱/۱۲۸۳۳	۲		
۴۸۵	۲ و ۳ و ۵	۱	۱/۱۹۶۵۸	۱		
۸۸۲	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۰۲۰۲	۴	۱/۳	
۳۰۵۱	۲	۱ و ۳ و ۵	۱/۰۶۸۲	۳		
۲۶۷۹	۲ و ۵	۱ و ۳	۱/۰۷۴۶	۲		
۶۱۷	۲ و ۳ و ۵	۱	۱/۰۸۷۸	۱		

ادامهٔ جدول ۳

$P = p_{۱} + p_{.} = ٤ \ ,\omega = ۰/۹ \ ,n = ۱۲$						
زمان حل	هاب‌های غیرمرکزی	هاب‌های مرکزی	مقدار تابع هدف هزینه ($\times ۱۰^{٦}$)		چند برابر شدن زمان تحویل کالا	$\alpha_H, \alpha_{c_۱} = \alpha_{c_۲}$
۴۱۰	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۰۶۲۸۶۲	۴	۱	۰/۸ و ۰/۸۵
۱۰۳۹	۲	۱ و ۳ و ۵	۱/۱۳۴۰۳۶	۳		
۹۳۸	۳ و ۵	۱ و ۲	۱/۲۰۱۱۷۵	۲		
۴۶۸	۲ و ۳ و ۵	۱	۱/۳۲۲۱۲۵	۱		
۵۰۳	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۰۳۲۷۸۱	۴	۱/۱	
۱۸۲۳	۳	۱ و ۲ و ۵	۱/۰۸۲۰۱۶	۳		
۱۴۰۱	۲ و ۵	۱ و ۳	۱/۱۳۸۵۰۵	۲		
۴۰۳	۲ و ۳ و ۵	۱	۱/۲۶۹۲۴	۱		
۵۶۳	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۰۲۲۷۵۴	۴	۱/۲	
۲۰۸۹	۵	۱ و ۲ و۳	۱/۰۷۱۶۱۲	۳		
۲۴۵۰	۳ و ۵	۱ و ۲	۱/۰۹۶۷۲۵	۲		
۵۳۸	۲ و ۳ و ۵	۱	۱/۱۶۳۴۷	۱		
۷۱۰	–	۱ و ۲ و۳ و ۵	۱/۰۰۲۷	۴	۱/۳	
۲۹۶۴	۳	۱ و ۲ و ۵	۱/۰۴۰۴	۳		
۲۵۳۰	۲و ۵	۱ و ۳	۱/۰۴۴۵	۲		
۷۶۵	۲ و ۳ و ۵	۱	۱/۰۵۷۷	۱		

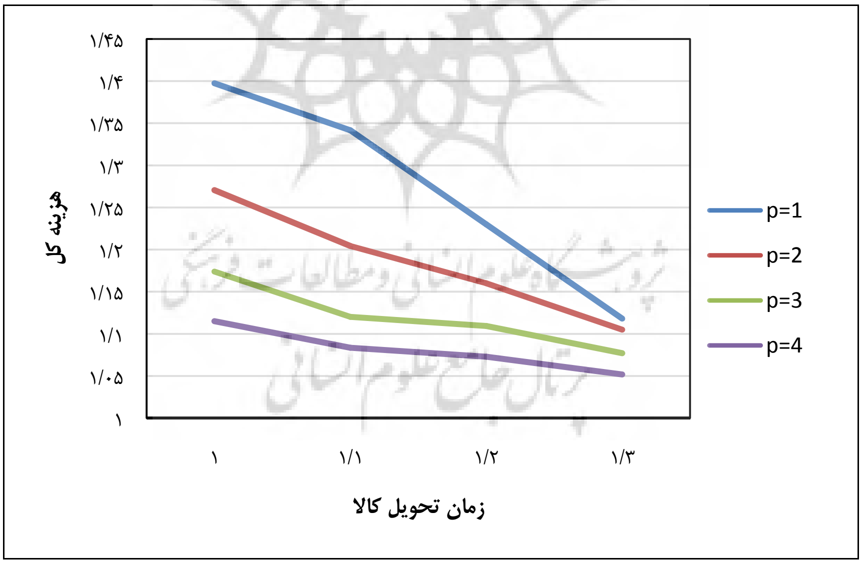


شکل ۳. بررسی تغییرات در تابع هدف هزینه برای
$T_{۱}^{p} = (۱۰, ۳۰, ۳۵) \ ,T_{۲}^{p} = (۲۵, ۳۵, ٤۰)$



شکل ٤. بررسی تغییرات در تابع هدف هزینه برای

$T_{۱}^{p} = \left(۱۳, ۳۹, ٤۵/۵\right)$,$T_{۲}^{p} = (۳۲/۵, ٤۵/۵, ۵۲)$



شکل ۵. بررسی تغییرات در تابع هدف هزینه برای

$\alpha_{H} = ۰/۹۵$, $\alpha_{C_{۱}} = \alpha_{C_{۲}} = ۰/۹$

با توجه به جدول می‌توان پی برد که با کاهش ضـریب تخفیـف هزینـه‌ای و افـزایش تعـداد هاب‌های مرکزی و زمان تحویل کالا، هزینهٔ کل کاهش می‌یابد. همچنین با تغییـر در پارامترهـا مکان هاب‌های مرکزی و غیرمرکزی نیز تغییر می‌یابد، اما نکتهٔ جالب توجه آن است کـه هرچـه ضریب تخفیف هزینه‌ای و زمانی کاهش می‌یابد، تأثیر تغییرات در مکـان هـاب‌هـای مرکـزی و غیرمرکزی بیشتر می‌شود. علاوه بر این در همهٔ موارد شهر ۱ به‌عنوان هاب مرکزی انتخاب شده که نشان‌دهندهٔ اهمیت این شهر است. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ مشهود است کـه بـا افـزایش تعداد هاب‌های مرکزی، هزینهٔ کل کاهش یافته و هنگامی که تعداد هاب‌ها برابر تعداد هاب‌های مرکزی است، هزینه به کمترین مقدار خود می‌رسد؛ به‌عبارت دیگر در شبکه‌های کامل نسبت بـه شبکه‌های ستاره‌ای، هزینهٔ حمل و نقل کمتر است. همچنین با کاهش ضریب تخفیف هزینـه‌ای نیز، هزینه کاهش یافته است. با مقایسهٔ شـکل‌هـای ۳ و ۴ کـه بـه‌ترتیـب مربـوط بـه تحمیـل محدودیت زمانی تحویل کالا به‌صورت سخت‌گیرانه و سهل‌گیرانه‌اند، مـی‌تـوان دریافـت کـه در حالت سخت‌گیرانه اثر کاهش هزینه با افزایش تعداد هاب‌های مرکزی بیشتر است. به‌طـور مثـال برای ضریب تخفیف (۰/۹ و ۰/۹۵) هنگامی که تعداد هاب‌های مرکزی از ۴ به ۱ کاهش می‌یابد، در حالت سخت‌گیرانه و سهل‌گیرانه به‌ترتیب ۲۵/۳۴ درصد و ۶/۲۹ درصد افزایش هزینه خواهیم داشت که نشان می‌دهد در شبکه‌های ستاره‌ای نسبت به شـبکه‌هـای کامـل افـزایش هزینـه بـا تحمیل محدودیت زمانی بیشتر است. با توجه به شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش زمان تحویل کالا هزینهٔ حمل و نقل کاهش می‌یابد همچنین با توجه به این که شیب خطوط بـا زیـاد شدن تعداد هاب‌های مرکزی کاهش یافته است، می‌توان نتیجه گرفت که شبکه‌هـای کامـل بـا اعمال محدودیت زمانی تحویل کالا انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به شبکه‌های ستاره‌ای دارند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله مدل‌سازی جدیدی برای مسـئلهٔ مکـان‌یـابی هـاب سلسـله‌مراتبـی تـک‌تخصیصـهٔ چندکالایی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود و ملاحظات کیفیت خدمت‌دهی ارائه شد که می‌تواند مقدار تأخیر و زمان مسیر را برای هر مبدأ و مقصد محاسبه کند. این موضوعی بـود کـه به دلیل مدل‌سازی پیچیدهٔ آن، یکی از خلأهای تحقیقاتی محسوب می‌شد. در مـدل پیشـنهادی، با توجه به تابع هدف کمینه‌کردن مجموع هزینهٔ حمل و نقل در شبکه، هزینـهٔ دیرکـرد و هزینـهٔ فعال‌سازی مسیر برای خطوط هوایی غیرفعال، تصـمیم بهینـه در مـورد مکـان هـاب‌هـا، نحـوهٔ تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها و نوع وسایل نقلیهٔ لازم در هر مسیر حاصل شد. همچنین مدل غیرخطی به مدل خطی تبدیل گردید و مدل فازی نیـز بـا رویکـرد برنامـه‌ریـزی شانسـی،

دی‌فازی شد. برای ارزیابی مدل پیشنهادی از مجموعه دادهٔ جمع‌آوری شده در ایران استفاده شد. با تحلیل حساسیت روی رفتار مـدل در دو حالـت قطعـی و غیرقطعـی و تغییـر پارامترهـا، نتـایج مدیریتی به‌دست آمد. نتایج نشان داد شبکه‌های کامل نسبت به شبکه‌های ستاره‌ای، در تحمیـل محدودیت زمانی انعطاف‌پذیری بیشتری دارند، اما به‌دلیل اینکه هزینهٔ احداث هاب در شبکه‌های کامل نسبت به شبکه‌های ستاره‌ای بیشتر است، تصمیم‌گیرنده باید تعادلی بین هزینهٔ ایجاد هـاب و هزینهٔ حمل و نقل برقرار کند و در خصوص تعداد هـاب‌هـای مرکـزی و غیرمرکـزی تصـمیم بگیرد. همچنین برای این که با افزایش تحمیل محدودیت زمـانی، مسـئله نشـدنی نشـود، انـواع وسایل حمل و نقل در نظر گرفته شده است. در تحقیقات آتی، می‌توان برای هاب‌هـا و مسـیرها ظرفیتی در نظر گرفت و همچنین به توسعهٔ روش‌های هیوریستیک یا متاهیوریستیک برای حـل مسائل با ابعاد بزرگ‌تر پرداخت.

References

Alumur, S. A., Yaman, H., & Kara, B. Y. (2012). Hierarchical multimodal hub location problem with time-definite deliveries. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(6), 1107–1120.

Arshadi Khamseh, A. & Doost Mohamadi, M. (2014). Complete/Incomplete Hierarchical Hub Center Single Assignment Network Problem. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 7(14), 1–12.

Baoding, L. (2004). *Uncertainty theory: an introduction to its axiomatic foundations* (1 edition), Springer.

Ben-Ayed, O. (2013). Parcel distribution network design problem. *Operational Research*, 13(2), 211–232.

Davari, S. & Fazel Zarandi, M. H. (2012). The single-allocation hierarchical hub median location problem with fuzzy demands. *African Journal of Business Manegement*, 6(1), 347–360.

Dubois, D., Prade, H., Farreny, H., Martin-Clouaire, R. & Testemale, C. (1988). *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. New York: Collaboration of Plenum Press.

Ermoliev, Y. M., & Leonardi, G. (1982). Some proposals for stochastic facility location models. *Mathematical Modelling*, 3(5), 407–420.

Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3), 450–459.

Lee, K. H. (2006). *First course on fuzzy theory and applications* (Vol. 27). Springer Science & Business Media.

Liu, B. & Liu, Y. K. (2002). Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models. *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, 10(4), 445-450.

Louveaux, F. V. (1986). Discrete stochastic location models. *Annals of Operations Research,* 6(2), 21–34.

O'Kelly, M. E. (1986). Activity levels at hub facilities in interacting networks. *Geographical Analysis,* 18(4), 343–356.

O'kelly, M. E. (1986). The location of interacting hub facilities. *Transportation Science,* 20(2), 92–106.

Saboury, A., Ghaffari-Nasab, N., Barzinpour, F., & Jabalameli, M. S. (2013). Applying two efficient hybrid heuristics for hub location problem with fully interconnected backbone and access networks. *Computers & Operations Research,* 40(10), 2493–2507.

Shahanaghi, K., Yavari, A., & Hamidi, M. (2015). Developing a model for Capacitated Hierarchical hub location with considering Delivery Time Restriction. *Applied mathematics in Engineering, Management and Technology*, 3(1), 540-548.

Toh, R. S. & Higgins, R. G. (1985). The impact of hub and spoke network centralization and route monopoly on domestic airline profitability. *Transportation Journal,* 24(4), 16-27.

Yaman, H. (2009). The hierarchical hub median problem with single assignment. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(6), 643–658.

Yaman, H., & Elloumi, S. (2012). Star p-hub center problem and star p-hub median problem with bounded path lengths. *Computers & Operations Research*, 39(11), 2725–2732.

Zadeh, L. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1(1978), 3-28.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.

Zhu, H. & Zhang, J. (2009, November). A credibility-based fuzzy programming model for APP problem. In Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009. *AICI'09. International Conference on (Vol. 1, pp. 455-459).* IEEE.