

## مطالعه موردی مدل مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی با در نظر گرفتن چند مورد حمل‌ونقل و حداکثر تأخیر مجاز در شبکه پستی ایران

فیروزه کاوه<sup>۱</sup>، جعفر رزمی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران
۲. استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۹۳/۰۹/۱۶ - تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۴/۰۲/۱۱ - تاریخ تصویب ۹۴/۱۰/۰۷)

### چکیده

در این پژوهش، مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی با در نظر گرفتن چند مورد حمل‌ونقل و حداکثر تأخیر مجاز بررسی شده است. این مطالعه در شبکه پست ویژه ایران و با در نظر گرفتن حداکثر دو روز تأخیر در تحویل کالا و در حالی که دو نوع هاب زمینی و فرودگاه وجود دارد انجام گرفته است. مسئله مورد نظر نوعی از مسائل مکان‌یابی و تخصیص یگانه برای جمع‌آوری، انتقال و توزیع مرسولات پستی است. تمام هاب‌های مورد بررسی ظرفیت محدود داشته‌اند و علاوه بر این به‌ازای هر روز تخطی از حداکثر تأخیر مجاز در تحویل کالا جریمه‌ای در نظر گرفته شده است. هدف راهبردی از بررسی این مدل تعیین مکان بهینه نقاط هاب زمینی و فرودگاه و تخصیص مسیرها به این دو نوع هاب است. این تخصیص به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که کمترین تأخیر در تحویل کالا رخ دهد و همین‌طور هزینه‌های کلی سیستم بهینه شود. مدل مورد بررسی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی است. در نهایت، مطالعه موردی به منظور پیاده‌سازی مدل در قسمتی از شبکه پستی ایران انجام گرفته و تحلیل حساسیت روی پارامترهای مهم مدل از طریق نرم‌افزار GAMS صورت پذیرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** تخصیص یگانه، ظرفیت محدود هاب، مسئله مکان‌یابی، سلسله‌مراتبی هاب، مسئله مکان‌یابی هاب.

### مقدمه

هاب بزرگ)، به آن مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی<sup>۴</sup> گفته می‌شود.

در این مطالعه، شبکه پست ویژه ایران در قالب یک شبکه هاب سلسله‌مراتبی سه سطحی بررسی شده است که در آن مرسولات پستی از مبدأهای خود جمع‌آوری می‌شود و با عبور از شهرهای واسطه به‌عنوان هاب با حداکثر دو روز تأخیر، در مقصدهای خود توزیع می‌شود. در این مسئله، هدف بهینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل و تأسیس هاب‌ها است. در این شبکه، نقاط تقاضا با تخصیص یگانه و به‌واسطه ارتباطات زمینی به هاب زمینی متصل می‌شوند. اگر از مقصد ارتباطی زمینی با هاب زمینی وجود داشته باشد، از طریق همان ارتباط، کالا به مقصد فرستاده می‌شود. در غیر این‌صورت کالا از طریق ارتباط زمینی (جاده‌ها) به نزدیک‌ترین هاب فرودگاه فرستاده می‌شود و از طریق هاب

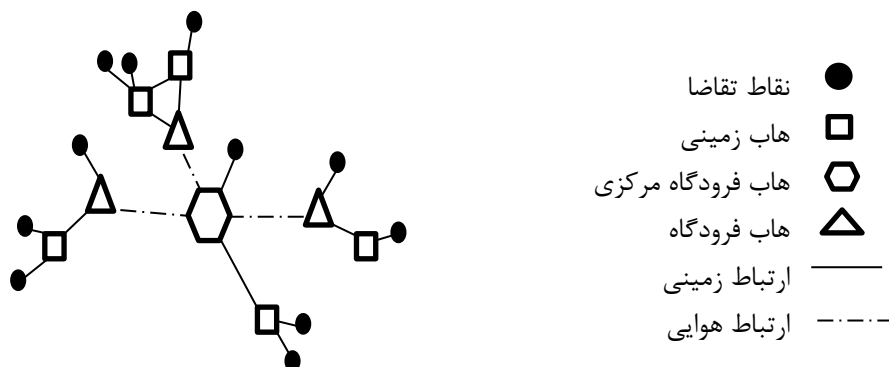
تسهیلات هاب<sup>۱</sup> در بسیاری از شبکه‌های توزیع از جمله خطوط هوایی، شبکه‌های حمل‌ونقل کالا، شبکه‌های پستی، شبکه‌های مخابراتی و... به‌کار می‌رود. هاب‌ها عبارت‌اند از مراکز جمع‌آوری، سازماندهی و توزیع که با هدف ارتباطی میان و غیرمستقیم میان دو نقطه استفاده می‌شوند. در یک مسئله مکان‌یابی هاب، هدف یافتن مکان مناسب هاب‌ها و تخصیص نقاط تقاضا به آن‌ها به‌منظور فرستادن جریان از مبدأ به مقصد به‌گونه‌ای است که هزینه فرایند جمع‌آوری، مسیریابی و پخش بهینه شود [۱]. تخصیص نقاط تقاضا به هاب‌ها به دو صورت تکی و چندگانه صورت می‌گیرد. در تخصیص تکی<sup>۲</sup> از هر مبدأ می‌توان فقط با یک هاب ارتباط برقرار کرد، درحالی‌که در تخصیص چندگانه<sup>۳</sup> این فرض وجود ندارد. اگر بین نقاط هاب سلسله‌مراتب وجود داشته باشد (برای مثال هاب کوچک، هاب متوسط و

از هزینه جریمة دیرکرد باشد، حداکثر دو روز تأخیر در رساندن کالاها به مقصد، مجاز در نظر گرفته شده است. در واقع، شرکت پستی به منظور افزایش رضایت مشتریان، خود را متعهد به تحویل مرسولات پستی در بازه زمانی ویژه‌ای می‌داند، ولی برای کاهش هزینه‌ها، حداکثر دو روز تأخیر از بازه تعهدشده را مجاز می‌داند و برای جلوگیری از تأخیرهای غیرمجاز جریمه‌ای را نیز در نظر می‌گیرد. به این ترتیب، شرکت ضمن تلاش به منظور رساندن به موقع کالاها، هزینه‌های سیستم را نیز بهینه می‌کند. در پژوهش حاضر فرض بر این است که هاب فرودگاه مرکزی حتماً باید تأسیس شود. در ضمن، ظرفیت همه هاب‌ها محدود در نظر گرفته شده است. در شکل ۱، نمایی از شبکه مورد بررسی برای درک بهتر ارتباطات آورده می‌شود.

ضرورت پیاده‌سازی این سیستم به دلیل هزینه‌های گزاف حمل‌ونقل است که برای تحویل به موقع محصولات پستی در شبکه ایجاد می‌شود. در واقع، اگر تسهیلات هاب و تخصیص مبداها و مقصدها به آن‌ها به صورت بهینه نباشد، شرکت به منظور ارسال و توزیع محصولات مورد تقاضای مشتریان متحمل هزینه‌های سنگینی می‌شود.

در دنیای رقابتی امروز زمان تحویل کالاها به مشتریان از فاکتورهای اساسی رضایت مشتریان محسوب می‌شود؛ به همین علت باید شبکه به گونه‌ای طراحی شود که در آن کمترین هزینه حمل‌ونقل به منظور رساندن کالا از مبداها به مقاصد با کمترین دیرکرد در تحویل ایجاد شود.

فرودگاه توسط خطوط هوایی به فرودگاه مرکزی ارسال می‌شود. اگر از هاب فرودگاه مرکزی به هاب زمینی، که مقصد به آن متصل است، ارتباط مستقیمی وجود داشته باشد، مرسولات از طریق ارتباط زمینی به هاب زمینی ارسال می‌شود و از آنجا از طریق ارتباطات زمینی به سمت مقاصد مورد نظر فرستاده می‌شود. در غیر این صورت مرسولات از طریق یک ارتباط هوایی به نزدیک‌ترین هاب فرودگاه منتقل می‌شود و از آنجا از طریق یک ارتباط زمینی به مقصد مورد نظر می‌رسد. اگر دو هاب زمینی هم‌جوار باشند و از هریک ارتباط زمینی به یک هاب فرودگاه وجود داشته باشد، می‌توانیم یک ارتباط زمینی بین آن دو هاب زمینی ایجاد کنیم، زیرا اگر دو هاب زمینی به یک هاب فرودگاه متصل شوند آن دو هاب زمینی به یکدیگر نزدیک‌اند و ممکن است زمان انتقال از طریق ارتباط زمینی در بازه تعهد ما باشد و چون هزینه ارتباط زمینی کمتر از هزینه ارتباط هوایی است، مقرون به صرفه‌تر است که کالا از طریق هاب زمینی منتقل شود. در این پژوهش فرض می‌شود وسیله نقلیه مورد استفاده در ارتباطات زمینی کامیون و در ارتباطات هوایی هواپیما است. زمان انتقال مرسولات از طریق یک ارتباط هوایی کمتر از انتقال از طریق ارتباطی زمینی است، اما هزینه احداث یک ارتباط هوایی بیشتر از هزینه احداث یک ارتباط زمینی است. با توجه به اینکه هزینه‌های ارسال از راه‌های مختلف به منظور انتقال کالا در زمان تعهدشده ممکن است گران‌تر



شکل ۱. نمای کلی استقرار هاب‌ها و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر

## مروری بر ادبیات موضوع

مکان‌یابی هاب کاربرد لجستیکی گسترده‌ای دارد. به همین دلیل، محققان زیادی از جهات مختلف مسائل مکان‌یابی هاب را بررسی کرده‌اند.

اوکلی (۱۹۸۷) اولین پژوهش‌ها را در حوزه مکان‌یابی هاب منتشر کرد. براین اساس، در سال‌های اخیر انتشار تحقیق‌ها رشد شایان توجهی داشته است. مسائل هاب سلسله‌مراتبی از جمله موضوعات جدید مورد بررسی در این زمینه است. کنتراس (۲۰۱۵) در یک تحقیق مروری مسائل مکان‌یابی هاب را از دیدگاه طراحی شبکه، خصوصیات و فرضیاتی بررسی کرده است که در تحقیقات اخیر بیشتر مورد توجه بوده است [۲]. با توجه به اینکه موضوع مورد بررسی در این پژوهش، مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی است، بررسی‌های انجام‌گرفته روی کارهای منتشرشده در سال‌های اخیر مرتبط با مسائل مکان‌یابی هاب در حالت سلسله‌مراتبی صورت گرفته است.

## مدل‌های مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی با ظرفیت نامحدود

تکسریا و همکاران (۲۰۰۸) یک مدل مکان‌یابی سلسله‌مراتبی را در حالت گسسته برای برنامه‌ریزی تسهیلات عمومی ارائه کردند. اهداف اصلی این پژوهش، ماکزیم‌سازی دسترسی در تابع هدف با سطوح مختلف تقاضا در شبکه تسهیلات تودرتویی است. محدودیت‌های این مسئله ماکزیم‌سازی ظرفیت است. شبکه مورد بررسی در این پژوهش دارای تخصیص یگانه است [۳].

یامان (۲۰۰۹) یک مدل هاب سلسله‌مراتبی را در سه سطح بررسی کرد. در مدل وی بالاترین سطح شامل یک شبکه ارتباطی کامل است که یک هاب مرکزی را دربرمی‌گیرد. سطح دوم و سوم یک شبکه ستاره‌ای را تشکیل می‌دهند که هاب‌های باقیمانده را به هاب مرکزی متصل می‌کنند. در این مدل که در فضای قطعی و با فرض چندمحصولی توسعه داده شده است، هدف مینیم‌سازی هزینه مسیریابی و مکان‌یابی نقاط هاب است. همچنین، وی سطح خدمت را در قالب محدودیت حداکثر زمان مجاز در مدل خود لحاظ کرده است [۴].

داوری و همکاران در سال ۲۰۱۲ مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی را با تقاضای غیرقطعی و جریان فازی بین نودها در حالت تک‌محصولی و در یک شبکه هاب میانه با تخصیص تکی در سه سطح سلسله‌مراتب بررسی کرده‌اند. مدل شامل چهار هاب غیرمرکزی، چهار هاب مرکزی و شش گره تقاضا در حالت قطعی است. مسئله به صورت فازی با یک الگوریتم ترکیبی مدل‌سازی و درنهایت با برنامه‌نویسی CPLEX حل شده است [۵].

آلامور و همکاران (۲۰۱۲) برای نخستین بار مدلی سه سطحی و تک‌هدفه را در فضای گسسته با در نظر گرفتن مسئله پوشش بررسی کردند. این مدل شامل هفت هاب غیرمرکزی در سطح اول، سه هاب غیرمرکزی میانه در سطح دوم و یک هاب مرکزی است. در این مدل دو نوع هاب و دو نوع ارتباط زمینی و هوایی وجود دارد. همچنین، مدل مذکور با در نظر گرفتن زمان نقل و انتقال بین گره‌ها، زمان خدمت‌دهی به مشتریان را تضمین می‌کند [۶].

یامان و همکاران (۲۰۱۲) یک شبکه دو سطحی ستاره‌ای را با در نظر گرفتن ملاحظات کیفیت سرویس‌دهی بررسی کرده‌اند.  $p$  هاب به عنوان تعداد هاب‌های مورد نیاز انتخاب می‌شود و این هاب‌ها به هاب مرکزی با یک ارتباط مستقیم متصل می‌شوند. در این پژوهش دو حالت بررسی شده است: حالت اول ایجاد  $p$  هاب مرکزی با شبکه ستاره‌ای است که هدف از آن کمینه‌کردن طول بلندترین مسیر است و حالت دوم تشکیل یک شبکه ستاره‌ای  $p$ -هاب میانی با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های مسیریابی است [۷].

مارتین دوسا و همکاران (۲۰۱۳) مسئله مکان‌یابی شبکه هاب درختی را با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز بهبودیافته بررسی کردند. با توجه به پیچیدگی‌های حل مدل‌های مکان‌یابی هاب درختی، الگوریتم بندرز با استفاده از مسئله آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل به کار رفته است [۸].

فیگوئیردو و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل دوسطحی مکان‌یابی هاب را برای حمل‌ونقل هوایی برزیل ارائه کردند. این پژوهش در دو فاز بررسی شده است: فاز اول  $p$  هاب را به عنوان فرودگاه‌های منطقه‌ای انتخاب می‌کند و در فاز دوم با در نظر گرفتن این هاب‌ها یک مسئله مکان‌یابی را با  $q$  هاب حل می‌کند [۹].

فراهانی و همکاران (۲۰۱۴) مدل مکان‌یابی هاب

آید (۲۰۱۱) مسئله طراحی شبکه توزیع را برای انتقال جاده‌ای بررسی کرد و مدل بهینه‌سازی آن را ارائه داد. وی در مدل خود وسایل حمل‌ونقل را متفاوت و دارای حجم محدود به ازای سطوح ارتباط در نظر گرفت. هدف راهبردی در مدل وی، تعیین محل، اندازه و ارتباط بین کارگاه‌های شکل‌گیری به گونه‌ای است که هزینه‌های حمل‌ونقل بهینه شود [۱۴].

سندر و کلوزن (۲۰۱۱) در بررسی خود به دنبال ایجاد مدل جدید مکان‌یابی هاب برای طراحی شبکه ترافیک واگنی با سه سطح سلسله‌مراتب و با در نظر گرفتن فضای حل گسسته و حداقل کردن هزینه‌های عملیاتی و حمل‌ونقل بوده‌اند. هدف راهبردی در حل این مدل تعیین ساختار شبکه و در نتیجه هزینه و کارایی شبکه است. همچنین، آن‌ها برای کاهش پیچیدگی مدل تست‌هایی انجام داده‌اند. مدل از طریق نرم‌افزار GAMS و با روش CPLEX حل شده است [۱۵].

چی و همکاران (۲۰۱۱) ارتباط بین وقوع رخدادهای مخرب و کمک‌های انسان‌دوستانه را در یک مسئله مکان‌یابی تسهیلات ترکیبی با سطوح متغیر و با فرض حداقل حداکثر شعاع، ظرفیت محدود و حداقل هاب بررسی کردند. آن‌ها با دو روش به بهبود الگوریتم ژنتیک پرداختند [۱۶].

منظور آل‌اجداد و همکاران (۲۰۱۲) مشکلات مسیریابی وسایل نقلیه و مکان‌یابی تسهیلات را یکی از مسائل مهم لجستیکی دانستند و مشکلات مسیریابی سلسله‌مراتبی با فاصله اقلیدسی را بررسی کردند [۱۷].

شو و لین (۲۰۱۲) مدل برنامه‌ریزی سلسله‌مراتبی هاب را برای پیکربندی شبکه لجستیک جهانی ارائه کردند. مدل آن‌ها شامل سه سطح است و ریسک فعالیت‌های بحرانی نیز در آن لحاظ شده است. روش معرفی شده که براساس برنامه‌ریزی عدد صحیح و روش‌های تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی است، تعداد و مکان مورد نظر تسهیلات و دامنه سرویس را تعیین می‌کند [۱۸].

صبوری و همکاران (۲۰۱۳) شبکه‌های سلسله‌مراتبی دولایه‌ای را با شبکه‌های قابل‌دسترس و شبکه مرکزی به هم مرتبط در نظر گرفته‌اند. دو روش حل ابتکاری ترکیبی برای حل این مدل استفاده شده است. این الگوریتم‌ها می‌توانند جواب بهینه را به راحتی به دست آورند و راه‌حلی با کیفیت مناسب ارائه دهند [۱۹].

سلسله‌مراتبی با حداکثر پوشش را با فرض امکان ایجاد اختلال در تسهیلات معرفی کردند. به کارگیری این فرض در مسئله سنتی مکان‌یابی هاب موجب ایجاد مسئله مکان‌یابی با قابلیت اطمینان می‌شود. آن‌ها مدل ارائه‌شده را با الگوریتم ترکیبی کولونی زنبور عسل<sup>۵</sup> حل کردند [۱۰].

## مدل‌های هاب سلسله‌مراتبی با ظرفیت محدود

سومادسن و لارسن (۲۰۰۷) یک شبکه دو سطحی را با فرض اینکه هر سطح یک شبکه کامل را تشکیل می‌دهد بررسی کردند. با توجه به اینکه روش آزادسازی خطی روشی تقریباً ضعیف است، در این مدل فرمول‌بندی براساس مجموعه خوشه‌بندی و تولید ستونی توسعه داده شده است. زیرمسئله‌های این مدل با تولید ستونی و با برخی از مسائل کوادراتیک کوله‌پشتی حل شده‌اند. روش توسعه داده‌شده آن‌ها توانایی حل مسائل با بیش از ۲۵ نود را دارد. مدل بررسی‌شده از سوی آن‌ها شامل چهار هاب مرکزی و هشت گره تقاضاست که در فضای قطعی و با فرض چندمحصولی حل شده است [۱].

ساهین و سورال (۲۰۰۷) در یک تحقیق مروری، مدل‌های مکان‌یابی سلسله‌مراتبی را بررسی کردند. آن‌ها در این تحقیق ابتدا تسهیلات سلسله‌مراتبی را براساس الگوی جریان، سطح دسترسی به خدمات و سطح سلسله‌مراتب دسته‌بندی کرده‌اند و سپس مدل‌های مختلط عدد صحیح و راه‌حل‌های مربوط به آن‌ها را بررسی کرده‌اند [۱۱].

لین و چن (۲۰۰۸) شبکه تعمیم‌یافته هاب و اسپوک را به منظور حداقل کردن هزینه‌های جریان و با استفاده از الگوریتم شمارش ضمنی در حالت چندمحصولی به کار بردند [۱۲].

چن (۲۰۱۰) روشی ابتکاری را با هدف حل مسئله برنامه‌ریزی عملیات با زمان قطعی ارائه داد. با توجه به پیچیدگی تعیین نوع وسایل حمل‌ونقل، با در نظر گرفتن مسیریابی و برنامه‌ریزی هم‌زمان، وی با استفاده از مفاهیم الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه نوع وسیله نقلیه و مسیریابی را تعیین کرده است. مثال مورد بررسی در این مقاله با استفاده از اطلاعات موجود در تایوان حل شده است. روش ارائه‌شده الزاماً به جواب بهینه نمی‌رسد، اما جواب قابل‌قبولی نزدیک بهینه ارائه می‌دهد [۱۳].

شود، زیرا استفاده از مدل‌های هاب سلسله‌مراتبی نسبت به مدل‌های هاب سنتی به واقعیت نزدیک‌تر است. با توجه به خلأهای ذکرشده، در این بررسی مدلی جامع با رفع این خلأها ارائه می‌شود. در کل، نوآوری‌های این مدل عبارت‌اند از:

۱. در نظر گرفتن ظرفیت هاب به صورت محدود در شبکه سه سطحی هاب سلسله‌مراتبی برای هر دو نوع هاب زمینی و هاب فرودگاه.
۲. در نظر گرفتن حداکثر دو روز تأخیر مجاز در تحویل کالاها که به‌ازای هر ساعت تخطی از حداکثر تأخیر مجاز جریمه‌ای اعمال می‌شود.
۳. در نظر گرفتن دو نوع هاب و لینک هوایی و زمینی که وسیله مورد استفاده بر لینک‌های هوایی هواپیما و وسیله مورد استفاده بر لینک‌های زمینی کامیون است. در ادامه، خلاصه‌ای از تحقیقات از سال ۲۰۰۷ تا سال ۲۰۱۵ در جدول ۱ می‌آید.

### مدل ریاضی پیشنهادی

در این قسمت مدل ریاضی مربوط به شبکه پست ویژه بررسی شده است. با توجه به توضیحات در قسمت مقدمه، فرضیات مدل به شرح زیر است:

- مدل شامل سه سطح است: سطح اول شامل گره‌های هاب زمینی، سطح دوم شامل گره‌های فرودگاه و سطح سوم شامل هاب فرودگاه مرکزی.
- تأخیر در تحویل کالا مجاز و به‌اندازه حداکثر دو روز در نظر گرفته شده است که به‌ازای هر ساعت تخطی از حداکثر تأخیر مجاز جریمه‌ای اعمال می‌شود.
- هاب‌ها ظرفیتی محدود دارند.
- هاب مرکزی حتماً باید تأسیس شود.
- در صورتی که دو هاب زمینی به یک هاب فرودگاه مشابه متصل شود، آنگاه می‌توان بین آن دو یک ارتباط زمینی ایجاد کرد.
- در ادامه، اندیس‌ها، پارامترها، متغیرها و مدل‌سازی ریاضی این مسئله بررسی می‌شود.

ریسون و همکاران (۲۰۱۳) به دنبال گسترش مدل‌های مسائل مکان‌یابی سلسله‌مراتبی در شبکه خطوط هوایی و توجه به فرکانس متریک عملیاتی در مسیریابی همراه با قابلیت دسترسی بوده‌اند. آن‌ها از این مدل توسعه‌یافته به منظور ارزیابی خطوط هوایی به‌عنوان هاب، قبل و بعد از یکپارچه‌سازی استفاده کردند و دریافتند هاب‌ها در شبکه هوایی در بیش از سه درخت قرار می‌گیرند و همچنین، فرکانس پرواز یک متغیر کلیدی در تعریف هاب سلسله‌مراتبی است [۲۰].

ترکستانی (۲۰۱۳) مدل احتمالی مکان‌یابی هاب را با تخصیص سلسله‌مراتبی و تقاضای محدود بررسی کرده است. در این مدل که روی شبکه پستی ایران انجام گرفته است، ظرفیت هاب‌ها و ارتباطات به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. این مدل شامل هفت سطح و سه نوع هاب است و با سه نوع کالای مختلف بررسی شده و به صورت سناریویی حل شده است [۲۱].

کریمی و همکاران (۲۰۱۴) یک مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی با تخصیص یگانه را با فرض ظرفیت محدود و پوشش تقاضا بررسی کرده‌اند. همچنین، آن‌ها گزینه‌های تعدیل‌کننده‌ای را با توجه به روند افزایشی تقاضا مد نظر قرار داده‌اند [۲۲]. همچنین ادیبی و رزمی (۲۰۱۵) مدلی تحت شرایط عدم قطعیت برای انتخاب بهترین سیستم هاب در شبکه هوایی ایران ارائه دادند [۲۳] و در مطالعه‌ای دیگر نیز رزمی و رحمن‌نیا (۲۰۱۳) مدل انتخاب هاب را بر مبنای ظرفیت محدود و تضمین سطح سرویس ارائه شده ارائه دادند [۲۴].

همان‌طور که در ادبیات موضوع مشاهده می‌شود، تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه دخیل کردن زمان رساندن کالا به مشتری و همچنین در نظر گرفتن تأخیر مجاز در شبکه هاب سلسله‌مراتبی انجام نگرفته است. همچنین، در شبکه پستی در بین سطوح مختلف سلسله‌مراتب وجود دارد (یعنی هاب‌های موجود در شهرها، هاب‌های کوچک محسوب می‌شوند و هاب‌های موجود در پایتخت هاب بزرگ محسوب می‌شوند و از لحاظ سلسله‌مراتب در یک سطح قرار ندارند)؛ بنابراین بهتر است این سلسله‌مراتب در بررسی‌ها لحاظ

جدول ۱. خلاصه‌ای از تحقیقات انجام گرفته در زمینه هاب سلسله مراتبی از سال ۲۰۰۷ تا سال ۲۰۱۵

ردیف	مؤلف	نوع پارامترها		نوع فضای حل		نوع تابع هدف		محدودیت‌ها		تعداد متغیرها		تعداد محصولات		تعداد	نوع سبب				
		اجتماعی	فنی	گسسته	پیوسته	منیجم سازی هرزپه	جریان	زمان سفر	حداکثرسازی	تک هدف	چند هدف	ظرفیت	زمان			جریمه	تخصیص	پوشش کامل	چیزی
۱	Thomadsen et al. 2007													۱	ورودی				
۲	Sahin et al. 2007													۱	ورودی				
۳	Lin et al. 2008													۱	ورودی				
۴	Teixeira et al. 2008													۱	ورودی				
۵	Yaman, 2009													۱	ورودی				
۶	Chen, 2010													۱	ورودی				
۷	Ayed, 2011													۱	ورودی				
۸	Chi et al. 2011													۱	ورودی				
۹	Sender et al. 2011													۱	ورودی				
۱۰	Davari et al. 2012													۱	ورودی				
۱۱	Alumur et al. 2012													۲	ورودی				
۱۲	Shen et al. 2012													۱	ورودی				
۱۳	Manzour-al-Ajdad al. 2012													۱	ورودی				
۱۴	Yaman et al. 2012													۱	ورودی				
۱۵	Ryerson et al. 2013													۱	ورودی				
۱۶	de Sa et al. 2013													۱	ورودی				
۱۷	Saboury et al. 2013													۱	ورودی				
۱۸	Torkesani et al. 2013													۱	ورودی				
۱۹	Figueiredo et al. 2014													۱	ورودی				
۲۰	Farahani et al. 2014													۱	ورودی				
۲۱	Karimi et al. 2014													۱	ورودی				
۲۲	<b>our work</b>													۲	ورودی				

متغیری که زمانی مقدار یک می‌گیرد که زمان انتقال از تأخیر مجاز تجاوز نکند	$Fu'_o$	اندیس‌ها $D$	مجموعه نقاط تقاضا
جریانی که از $i$ نشئت می‌گیرد و از فرودگاه $z$ با هواپیما به سمت فرودگاه هاب مرکزی می‌رود	$g_{jo}^i$	$H \subseteq D$	مجموعه نقاط ممکن برای هاب‌های زمینی و فرودگاه
کوتاه‌ترین زمانی که یک کامیون یا هواپیما ممکن است از هاب $z$ به طرف سایر هاب‌ها طی کند	$r_j$	$A \subseteq H$	مجموعه نقاط ممکن برای هاب‌های فرودگاه
کوتاه‌ترین زمانی که کامیون‌ها از گره‌های تقاضا و هاب‌های زمینی و هواپیماها از فرودگاه‌ها به هاب فرودگاه مرکزی می‌رسند	$r_o$	$O \subseteq A$	نقطه مربوط به هاب فرودگاه مرکزی
طولانی‌ترین زمانی که برای تحویل کالا به گره‌های تقاضایی که به هاب زمینی $z$ متصل‌اند نیاز است	$\bar{r}_j$	$P$	تعداد هاب‌هایی که باید ساخته شود
زمان بارگذاری در هاب فرودگاه مرکزی	$m_o$	$W_{ij}$	حجم انتقال از نود $i$ به $j$ ( $i, j \in D$ )
زمانی که به مشتری برای رسیدن کالا تضمین شده است	$T$	$t_{ij}$	زمان سفر از نود $i$ به $j$ با کامیون
میزان تأخیر مجاز	$F$	$t_{ij}^p$	زمان سفر از نود $i$ به $j$ با هواپیما
هزینه انتقال واحد کالا از $ie \in D$ به $je \in H$ توسط کامیون اگر یکی از گره‌ها غیر هاب و دیگری هاب زمینی (یا فرودگاه) باشد	$c_{ij}$	پارامترها $\alpha$	زمان سفر برای کامیون‌ها با ضریب تخفیف $\alpha$ کم می‌شود
هزینه انتقال واحد کالا از $je \in H$ به $ke \in H$ توسط کامیون اگر حداقل یکی از دو گره هاب زمینی باشند	$c_{jk}^T$	$m_j$	زمان بارگذاری در هاب فرودگاه $z$
هزینه انتقال واحد کالا از هاب فرودگاه $\{jeA/\{j\}$ به هاب فرودگاه مرکزی $O$ از طریق هواپیما	$c_{jo}^p$	متغیرهای تصمیم $X_{ij}$	اگر نقطه تقاضا $i$ به هاب (زمینی یا فرودگاه) $j$ تخصیص یابد ۱ و در غیر این صورت ۰
هزینه انتقال واحد کالا از هاب فرودگاه $\{jeA/\{j\}$ به هاب $O$ از طریق هواپیما	$c_{oj}^p$	$X_{jj}$	اگر هاب (فرودگاه یا زمینی) در نقطه $j$ تأسیس شود ۱ و در غیر این صورت ۰
هزینه ثابت برپایی یک ارتباط زمینی بین نود غیر هاب $i \in D$ و هاب زمینی (یا هاب فرودگاه) $j \in H$	$c_{ij}$	$Y_{jl}$	اگر هاب زمینی $j$ به فرودگاه $l$ تخصیص یابد ۱ و در غیر این صورت ۰
هزینه ثابت برپایی یک ارتباط زمینی بین دو هاب $k \in H$ و $j \in H$ اگر حداقل یکی از دو گره هاب زمینی باشند	$c_{jk}^T$	$Y_{jj}$	اگر هاب فرودگاه در نقطه $j$ مستقر شود ۱ و در غیر این صورت ۰
هزینه ثابت برپایی یک ارتباط هوایی بین هاب فرودگاه و هاب فرودگاه مرکزی	$c_j^p$	$Z_{jk}^l$	اگر یک ارتباط زمینی از هاب زمینی $j$ به هاب زمینی $k$ وجود داشته باشد و $k$ و $j$ هر دو به هاب فرودگاه مشابه $l$ متصل باشند ۱ و در غیر این صورت ۰
هزینه ثابت احداث یک هاب زمینی	$B_g$	$f_{jk}^i$	جریانی که از $i$ نشئت می‌گیرد و از هاب $z$ به هاب $k$ با استفاده از کامیون منتقل می‌شود (اگر حداقل یکی از هاب‌های $k$ و $z$ هاب زمینی باشند)
هزینه ثابت احداث یک هاب فرودگاه	$B_A$	$\bar{r}_O$	طولانی‌ترین زمانی که برای تحویل کالا از هاب فرودگاه مرکزی به همه هاب‌ها و گره‌های تقاضا نیاز است
		$Fu_o$	متغیری که زمانی مقدار یک می‌گیرد که تأخیر از میزان تأخیر مجاز بیشتر شود

(۱۴)	$\sum_{k \in H \setminus \{O\}} f_{Ok}^i + \sum_{j \in A \setminus \{O\}} g_{Oj}^i - \sum_{j \in A \setminus \{O\}} g_{jO}^i - \sum_{k \in H \setminus \{O\}} f_{kO}^i = \sum_{s \in D} W_{is} (x_{iO} - x_{sO}) \quad \forall i \in D$	<p>هزینه هر واحد زمان دیرکرد از زمان تعهدشده <math>\theta</math></p> <p>ظرفیت یک هاب زمینی <math>F_g</math></p> <p>ظرفیت یک هاب فرودگاه <math>F_a</math></p> <p>ظرفیت فرودگاه مرکزی <math>F_o</math></p>
------	---	--

**مدل ریاضی**

$$f_{jk}^i \leq \sum_{s \in D} \sum_{l \in A} W_{is} z_{jl}^l \quad \forall i \in D, j \in H, k \in H \setminus \{j\} \quad (1)$$

$$g_{jO}^i + g_{Oj}^i \leq \sum_{s \in D} W_{is} y_{jj} \quad \forall i \in D, j \in A \setminus \{O\} \quad (2)$$

$$r_j \geq t_{ij} x_{ij} \quad \forall i \in D, j \in H \quad (3)$$

$$r_o \geq r_j + \sum_{l \in A} (\alpha t_{jl} + m_l + t_{lo}^p) y_{jl} \quad \forall j \in H \quad (4)$$

$$\bar{r}_j \geq t_{ji} x_{ij} \quad \forall i \in D, j \in H \quad (5)$$

$$\bar{r}_o \geq \sum_{l \in A} (t_{ol}^p + m_l + \alpha t_{lj}) y_{jl} + \bar{r}_j \quad \forall j \in H \quad (6)$$

$$r_j + \sum_{l \in A} \alpha t_{jk} z_{jk}^l + \bar{r}_k - T \leq f \quad \forall j \in H, k \in H \setminus \{j\} \quad (7)$$

$$r_o + m_o + \bar{r}_o - T \leq f \quad (8)$$

$$\sum_{i \in D} W_{ij} + \sum_{i \in D} \sum_{k \in H} f_{kj}^i \leq F_g \quad \forall j \in H \quad (9)$$

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in H} f_{jl}^i + \sum_{i \in D} f_{-l}^i \leq F_A \quad \forall l \in A \quad (10)$$

$$\sum_{i \in D} \sum_{k \in H} f_{kO}^i \leq F_o \quad (11)$$

$$r_o + m_o + \bar{r}_o - T - f = Fu_o - Fu'_o \quad (12)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (13)$$

$$y_{jl} \in \{0, 1\} \quad (14)$$

$$z_{jk}^l \in \{0, 1\} \quad (15)$$

$$f_{jk}^i, g_{jO}^i, g_{Oj}^i, Fu_o, Fu'_o \geq 0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i \in D} \left( \sum_{j \in H} (c_{ij} \sum_{s \in D} W_{is} + c_{ji} \sum_{s \in D} W_{si}) x_{ij} + \sum_{j \in H} \sum_{k \in H \setminus \{j\}} c_{jk}^T f_{jk}^i \right. \\ & + \sum_{j \in A \setminus \{O\}} (c_{jO}^p g_{jO}^i + c_{Oj}^i g_{Oj}^i) + \sum_{i \in D} \sum_{j \in H} C_{ij} x_{ij} + \sum_{l \in A} \sum_{j \in H} \sum_{k \in H \setminus \{j\}} C_{jk}^T z_{jk}^l \\ & \left. + \sum_{j \in A \setminus \{O\}} C_j^p y_{jj} + \sum_{g \in H} B_g x_g + \sum_{l \in A} B_A x_l + Fu_o * \theta \right) \\ & \sum_{i \in H} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in D \end{aligned} \quad (17)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad \forall i \in D, j \in H \quad (18)$$

$$\sum_{l \in A} y_{jl} = x_{jj} \quad \forall j \in H \quad (19)$$

$$y_{jl} \leq y_{ll} \quad \forall j \in H, l \in A \quad (20)$$

$$\sum_{j \in H} x_{ij} = p \quad (21)$$

$$y_{oo} = 1 \quad (22)$$

$$z_{jl}^l = y_{jl} \quad \forall j \in H, l \in A \quad (23)$$

$$z_{lj}^l = y_{jl} \quad \forall j \in H, l \in A \setminus \{j\} \quad (24)$$

$$z_{jk}^l \leq y_{jl} \quad \forall j \in H, l \in A \setminus \{j\} \quad (25)$$

$$z_{jk}^l \leq y_{kl} \quad \forall j \in H, k \in h \setminus \{j\}, l \in A \quad (26)$$

$$\sum_{k \in H \setminus \{j\}} f_{jk}^i - \sum_{k \in H \setminus \{j\}} f_{kj}^i = \sum_{s \in D} W_{is} (x_{ij} - x_{sj}) \quad (27)$$

$$\forall i \in D, j \in H \setminus A \quad (28)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k \in H \setminus \{j\}} f_{jk}^i + g_{jO}^i - g_{Oj}^i - \sum_{k \in H \setminus \{j\}} f_{kj}^i \\ & = \sum_{s \in D} w_{is} (x_{ij} - x_{sj}) \quad \forall i \in D, j \in A \setminus \{O\} \end{aligned} \quad (29)$$

**توضیح تابع هدف و محدودیتها**

عبارت اول در تابع هدف هزینه نقل و انتقال بین گره‌های



حرکت کند. محدودیت ۱۸ بیان می‌کند هاب مرکزی صبر می‌کند کامیون‌ها و هواپیماهایی که از همه نودها می‌آیند برسند. محدودیت ۱۹ بیانگر طولانی‌ترین زمان مورد نیاز برای رساندن کالا از هر هاب به نودهای تقاضایی است که به آن تخصیص یافته‌اند. محدودیت ۲۰ طولانی‌ترین زمان مورد نیاز برای رساندن کالا از هاب فرودگاه مرکزی به همه هاب‌ها و نودهای تقاضا را تعیین می‌کند. محدودیت ۲۱ بیان می‌کند کالای منتقل شده که از طریق ارتباط مستقیم کامیونی بین نودهای هاب انتقال می‌یابد، نباید بیشتر از  $f$  واحد زمانی نسبت به زمان تضمین شده به مشتری تأخیر داشته باشد. محدودیت ۲۲ بیان می‌کند تأخیر برای رساندن کالا از مبدأ به مقصد که از هاب فرودگاه مرکزی عبور می‌کند نباید بیشتر از  $f$  واحد زمانی باشد. محدودیت‌های ۲۳ تا ۲۵ بیانگر محدودیت ظرفیت هاب‌های زمینی، فرودگاه و مرکزی است. محدودیت ۲۶ بیان می‌کند متغیر  $Fu_0$  فقط زمانی مقدار می‌گیرد که میزان تأخیر شبکه از میزان تأخیر مجاز بیشتر شده باشد و مقدار آن به اندازه مقدار تخطی از میزان تأخیر مجاز باشد. محدودیت‌های ۲۷ تا ۳۰ دامنه متغیرها را مشخص می‌کنند.

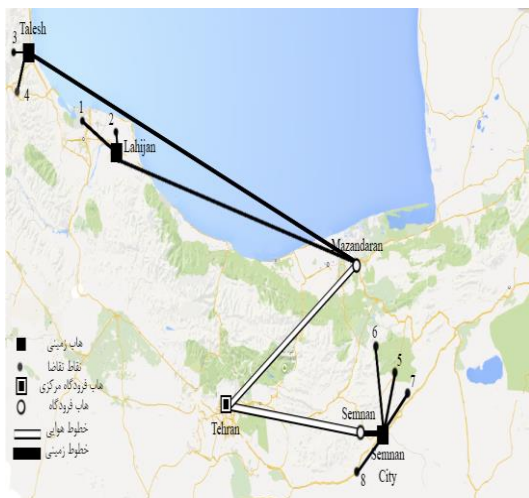
### مطالعه موردی

همان‌طور که در قسمت‌های قبل اشاره شد، مدل ارائه شده از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی<sup>۶</sup> است. این مدل از طریق نرم‌افزار (GAMS) نسخه ۲۴,۰,۱ و با روش CPLEX حل شده است. سپس با تغییر تعداد هاب‌ها، مقدار زمان تعهدشده و میزان تأخیر مجاز، حساسیت مدل نسبت به این پارامترها تحلیل شده است. مدل شامل هشت نقطه تقاضا و پنج نقطه بالقوه برای هاب زمینی، دو نقطه بالقوه برای هاب فرودگاه و یک هاب مرکزی (پایتخت) است. به منظور کوچک کردن فضای حل مدل، شهرهایی از هر استان با توجه به جمعیت آن‌ها، نماینده همه شهرهای استان در نظر گرفته شده است. شهرهای مورد بررسی عبارت‌اند از: پایتخت تهران، استان سمنان، استان مازندران، شاهرود، لاهیجان، رشت، طالش، و شهر سمنان. داده‌های مورد استفاده در این مدل براساس داده‌های میدانی، سایت آماری کشور و براساس آخرین قیمت‌های روز است و با

تقاضا و هاب‌ها را نشان می‌دهد. عبارت دوم، هزینه انتقال زمینی بین دو هاب زمینی (یا یک هاب زمینی با یک هاب فرودگاه) را نشان می‌دهد. عبارت سوم بیانگر هزینه نقل و انتقال از طریق ارتباط هوایی است. عبارت چهارم، پنجم و ششم به ترتیب بیانگر هزینه ایجاد ارتباطات زمینی بین نقاط تقاضا و هاب زمینی، هزینه ایجاد ارتباط زمینی بین دو هاب زمینی (یا یک هاب زمینی با یک هاب فرودگاه) و هزینه ایجاد ارتباط هوایی بین دو هاب فرودگاه است. عبارت هفتم و هشتم نشانگر هزینه ایجاد هاب زمینی و هاب هوایی است. و عبارت آخر بیانگر جریمه تخطی از تأخیر مجاز است.

معادله ۲ بیان می‌کند از هر گره تقاضا فقط به یک هاب ممکن است تخصیص وجود داشته باشد. محدودیت ۳ بیان می‌کند اگر یک نود تقاضا به یک نود مشخص تخصیص یابد، آن نود باید هاب باشد. محدودیت ۴ بیان می‌کند هر هاب دقیقاً به یک هاب فرودگاه تخصیص می‌یابد. در محدودیت ۵، اگر یک هاب به یک هاب فرودگاه تخصیص یابد، آن هاب فرودگاه باید تأسیس شده باشد. محدودیت ۶ بیان می‌کند تعداد هاب‌هایی که می‌خواهیم تأسیس کنیم  $P$  تا است. محدودیت ۷ نشان می‌دهد هاب مرکزی باید حتماً تأسیس شود. در محدودیت ۸ و ۹ نقل و انتقال بین هاب‌ها و هاب‌های فرودگاه تأسیس شده نیازمند استفاده از کامیون است. در محدودیت ۱۰ و ۱۱ ممکن است یک ارتباط مستقیم کامیونی بین دو هاب وجود داشته باشد، البته فقط در صورتی که این دو هاب  $z$  و  $k$  به یک هاب مشابه  $l$  متصل باشند. محدودیت‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ برقراری تعادل را در هاب‌های زمینی، فرودگاه و هاب مرکزی تضمین می‌کنند. محدودیت ۱۵ اطمینان حاصل می‌کند جریانی که از کامیون استفاده می‌کند، فقط می‌تواند از ارتباط کامیونی تأسیس شده عبور کند. محدودیت ۱۶ تضمین می‌کند جریانی که از هواپیما استفاده می‌کند، فقط از طریق ارتباطات هوایی جریان پیدا می‌کند. ایده اصلی محدودیت‌های ۱۷ تا ۲۲ این است که یک کامیون یا یک هواپیما که از یک هاب عبور می‌کند باید برای رسیدن همه جریان‌های در راه صبر کند. محدودیت ۱۷ تضمین می‌کند هاب فرودگاه مرکزی صبر می‌کند تا همه تقاضاهای تخصیص یافته به آن برسند سپس

به مشتری و میزان زمان مجاز تأخیر سنجیده شده است. همان طور که در جدول ۳ مشخص است، با کاهش زمان تعهدشده به مشتری هزینه کلی سیستم افزایش می یابد، زیرا با کاهش زمان تعهدشده، به منظور رساندن به موقع مرسولات پستی از مبادی به مقاصد باید از وسایل نقلیه پرسرعت تر استفاده کرد؛ بنابراین، با افزایش سطح خدمت، هاب ها و ارتباطات هوایی بیشتری باید تأسیس شود که به دلیل بالا بودن هزینه این تأسیسات هزینه های کلی سیستم افزایش می یابد. همچنین، همان طور که از جدول ۳ مشخص است، با افزایش میزان تأخیر مجاز در هر سطح از زمان تعهدشده، هزینه کلی سیستم کاهش می یابد.



شکل ۲. شبکه حاصل از ایجاد سه هاب زمینی، دو هاب فرودگاه، یک هاب مرکزی و هشت نقطه تقاضا

توجه به سایز مسئله و مفروضات آن تغییرات لازم داده شده است. با توجه به مشخص بودن فاصله بین شهرها، زمان مورد انتظار بین دو نقطه تقاضا با در نظر گرفتن متوسط سرعت کامیون ها (۶۰ کیلومتر بر ساعت) که متناسب با جاده های شمالی ایران است و سرعت هواپیما (۷۰۰ کیلومتر بر ساعت) به دست آمده است. میزان تقاضای روزانه بین نودها در جدول ۴ می آید. زمان بارگیری در فرودگاه ها نیم ساعت و در فرودگاه هاب مرکزی دو ساعت در نظر گرفته شده است.

هزینه احداث یک راه زمینی ۷۰۰ واحد پولی و هزینه یک خط هوایی ۳۵۰۰ واحد در نظر گرفته شده است. ضریب تخفیف ۰/۹، تأخیر مجاز دو روز، جریمه دیرکرد ۱۱۰۰ واحد پولی، زمان تعهدشده به منظور تحویل یک روز، هزینه ثابت تأسیس هاب های زمینی ۱۰۰۰۰۰ و هزینه ثابت تأسیس هاب مرکزی ۲۷۰۰۰۰ واحد پولی در نظر گرفته شده است. هزینه نقل و انتقال بین فرودگاه مازندران - پایتخت، ۱۱۲۰ و استان سمنان - پایتخت، ۹۷۲۰ در نظر گرفته شده است. سایر داده های مورد استفاده در جدول های ۵ و ۶ مشاهده می شود. مکان های نامزد برای هاب ها به شرح زیر است:

- هاب های زمینی: سمنان، لاهیجان، طالش و رشت
- هاب های فرودگاه: استان سمنان و مازندران
- هاب مرکزی: تهران

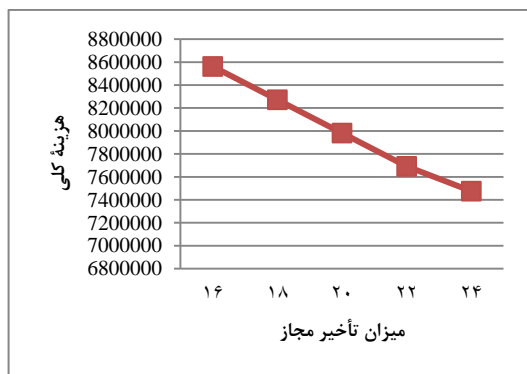
شبکه حاصل از حل با استفاده از داده های یادشده با در نظر گرفتن سه هاب زمینی، دو هاب فرودگاه، یک هاب مرکزی و هشت نقطه تقاضا در شکل ۲ آورده می شود.

### هزینه بهینه حاصل از حل مدل:

۷۴۷۵۲۴۱،۲۸

### تحلیل حساسیت

برای پیدا کردن پارامترهای مؤثر بر جواب، مدل در ۲۱ سناریوی مختلف حل شده است. نتایج هر حل در جدول های ۲ و ۳ آورده می شود. در جدول ۲، مدل با تغییر تعداد هاب های زمینی و فرودگاه حل شده و هاب های انتخاب شده در هر حل همراه با هزینه بهینه مشخص شده است. در جدول ۳، حساسیت مدل با تغییر زمان تعهدشده



شکل ۳. نمودار میزان تأثیر تأخیر مجاز بر هزینه کلی سیستم در شبکه ای با زمان تعهدشده هشت ساعت

جدول ۲. مدل یا تغییر تعداد هاب‌ها

تأخیر مجاز (ساعت)	زمان تعهدشده (ساعت)	هزینه بیهوده	هاب‌های فرودگاه	هاب‌های زمینی	هاب فرودگاه مرکزی	تعداد هاب‌های فرودگاه	تعداد هاب‌های زمینی	شماره سناریو
۴۸	۲۴	۱۸۷۲۶۰۶	مازندران	لاهیجان	تهران	۱	۱	۱
۴۸	۲۴	۱۹۰۰۵۷۸	مازندران، استان سمنان	لاهیجان	تهران	۲	۱	۲
۴۸	۲۴	۸۳۰۵۷۴۱	مازندران	سمنان، طالش	تهران	۱	۲	۳
۴۸	۲۴	۸۵۸۵۵۶۱/۴۴	مازندران، استان سمنان	سمنان، طالش	تهران	۲	۲	۴
۴۸	۲۴	۷۱۹۵۵۲۱/۲۸۰	مازندران	سمنان، طالش، لاهیجان، سمنان	تهران	۱	۳	۵
۴۸	۲۴	۷۴۷۵۲۴۱/۲۸	مازندران، استان سمنان	سمنان، طالش، لاهیجان، سمنان	تهران	۲	۳	۶
۴۸	۲۴	۶۷۱۴۸۰۵/۰۷	مازندران	سمنان، رشت، سمنان، طالش، لاهیجان، رشت	تهران	۱	۴	۷
۴۸	۲۴	۶۹۹۴۵۲۵/۰۷۱	مازندران، استان سمنان	سمنان، رشت، سمنان، طالش، لاهیجان، رشت	تهران	۲	۴	۸

جدول ۳. تغییر زمان تعهدشده و تأخیر مجاز

سناریو	زمان تعهدشده	تأخیر مجاز	هزینه
حالت پایه	۲۴	۴۸	۷۴۷۵۲۴۱/۲۸
۹	۱۲	۲۴	۷۴۷۵۲۴۱/۲۸
۱۰	۱۰	۲۰	۷۶۹۱۷۱۱/۴۶۹
۱۱		۲۲	۷۴۷۵۲۴۱/۲۸
۱۲		۲۴	۷۴۷۵۲۴۱/۲۸
۱۳	۹	۱۸	۸۱۲۶۹۷۳/۲۴۲
۱۴		۲۰	۷۸۳۶۷۹۸/۷۲۶
۱۵		۲۲	۷۵۴۶۶۲۴/۲۱۱
۱۶		۲۴	۷۴۷۵۲۴۱/۲۸
۱۷	۸	۱۶	۸۵۶۲۲۳۵/۰۱۶
۱۸		۱۸	۸۲۷۲۰۶۰/۵
۱۹		۲۰	۷۹۸۱۸۸۵/۹۸۴
۲۰		۲۲	۷۶۹۱۷۱۱/۴۶۹
۲۱		۲۴	۷۴۷۵۲۴۱/۲۸

جدول ۴. میزان تقاضا بین نودهای مختلف

$i_8$	$i_7$	$i_6$	$i_5$	$i_4$	$i_3$	$i_2$	$i_1$	$W_{ij}$
۲۱/۵۱	۲۹/۹۰	۱۱/۲۹	۱۴/۳۵	۱۹/۶۱	۶۴/۲۷	۶۴/۶۹	۰	$j_1$
۲۱/۴۰	۲۹/۴۳	۹۹/۲۱	۱۲/۸۱	۱۹/۵۹	۵۶/۶۸	۰	۹۳/۵۲	$j_2$
۲۱/۳۹	۲۹/۴۱	۹۸/۵۷	۱۲/۷۴	۱۹/۵۹	۰	۵۵/۲۲	۹۲/۹۴	$j_3$
۳۴/۲۲	۸۰/۷۱	۱۶/۰۵	۱۸/۲۶	۰	۸۹/۰۰	۱۰/۴۹	۱۴/۳۹	$j_4$
۲۱/۴۵	۲۹/۶۲	۱۰/۴۹	۰	۱۹/۶۰	۵۹/۸۳	۵۹/۴۰	۹۸/۶۰	$j_5$
۲۱/۳۸	۲۹/۳۸	۰	۱۲/۶۴	۱۹/۵۹	۵۵/۸۵	۵۴/۶۵	۹۲/۱۸	$j_6$
۲۳/۴۵	۰	۳۳/۹۸	۳۹/۹۴	۱۹/۹۵	۱۸/۹۸	۲۱/۴۳	۳۰/۸۵	$j_7$
۰	۵۲/۳۴	۱۰/۹۹	۱۴/۰۲	۱۹/۶۱	۶۲/۶۱	۶۲/۷۱	۱۰/۳۰	$j_8$

جدول ۵. هزینه انتقال از نودهای غیر هاب به هاب از طریق یک ارتباط زمینی

شاهرود	سمنان	طالش	لاهیجان	رشت	$C_{ih}$
۱۳۳۶۶/۸	۱۱۸۹۳/۲	۱۱۰۲/۴	۸۶۸	۰	$i_1$
۱۴۱۹۴	۱۱۷۴۴/۸	۱۵۷۰/۴	۰	۱۱۷۶	$i_2$
۱۵۶۰۴	۱۳۷۸۰	۰	۱۸۷۲/۴	۱۷۸۰/۸	$i_3$
۷۷۴۵/۶	۵۰۰۳/۲	۴۴۸۲/۴	۶۵۵۹/۶	۵۴۶۰	$i_4$
۴۰۰۰	۳۳۰۸/۸	۶۶۰۸	۶۷۶۰	۶۸۶۹/۶	$i_5$
۴۰۰۰	۰	۱۱۵۳۶	۸۶۳۲	۹۳۶۲	$i_6$
۶۵۰۴/۸	۴۵۳۶/۸	۷۱۰۳/۲	۵۳۳۲	۶۳۸۴	$i_7$
۳۴۴۰/۴	۲۱۲	۶۸۳۲/۸	۶۹۴۴	۹۵۵۹/۲	$i_8$

جدول ۶. فاصله بین نقاط

$i_8$	$i_7$	$i_6$	$i_5$	$i_4$	$i_3$	$i_2$	$i_1$	$d_{ij}$
۲۶۳	۲۶۷	۶۸۱	۴۲۵	۳۶۸	۱۱۴	۴۲	۰	$j_1$
۲۲۱	۲۲۹	۶۴۲	۵۶۷	۳۴۳	۷۴	۰	۴۲	$j_2$
۲۳۹	۲۳۵	۶۰۵	۵۳۱	۴۹۷	۰	۷۴	۱۱۴	$j_3$
۳۳۵	۳۲۵	۱۰۶	۷۰	۰	۴۹۷	۳۴۳	۳۶۸	$j_4$
۳۶۹	۵۲۹	۱۵۱	۰	۷۰	۵۳۱	۵۶۷	۴۲۵	$j_5$
۴۴۴	۴۳۱	۰	۱۵۱	۱۰۶	۶۰۵	۶۴۲	۶۸۱	$j_6$
۴	۰	۴۳۱	۵۲۹	۳۲۵	۲۳۵	۲۲۹	۲۶۷	$j_7$
۰	۴	۴۴۴	۳۶۹	۳۳۵	۲۳۹	۲۲۱	۲۵۲	$j_8$

در هزینه کلی سیستم صرفه‌جویی چشمگیری رخ می‌دهد، زیرا هزینه استفاده از وسایل پرسرعت مانند هواپیما به منظور رساندن کالا در بازه زمانی تعهدشده بیشتر از هزینه جریمه تأخیر است. براساس نتایج، هزینه حاصل از حل مدل با در نظر گرفتن حداکثر تأخیر مجاز نسبت به هزینه حاصل از حل بدون در نظر گرفتن این فرض بسیار کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در همه مدل‌های پیشین تأخیر غیرمجاز بوده است، با در نظر گرفتن این امکان نه تنها مدل به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود (زیرا در عمل همواره مقداری تأخیر نسبت به زمان تعهدشده در برخی موارد رخ می‌دهد)، بلکه در صورتی که وجود تأخیر موجب کاهش چشمگیری در هزینه‌ها شود بهتر است آن را لحاظ کنیم. در نتیجه، این مدل از لحاظ مدیریتی برتری بیشتری دارد. در مطالعات آتی می‌توان با در نظر گرفتن فرض چندکالایی، عدم قطعیت در پارامترها و با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری برای حل در سایزهای بزرگ‌تر، مدل ارائه شده را توسعه داد.

علت کاهش هزینه کلی سیستم با افزایش میزان تأخیر مجاز این است که با افزایش میزان تأخیر مجاز می‌توان به جای استفاده از وسایل پرسرعت گران قیمت نظیر هواپیما از خطوط زمینی و کامیون‌های بیشتری استفاده کرد که زمان انتقال بیشتر ولی هزینه کمتری دارند. شکل ۳ نمودار کاهش هزینه را برحسب میزان تأخیر مجاز برای زمان تعهدشده هشت ساعت نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است، مدل نسبت به افزایش تأخیر مجاز بسیار حساس است و با تغییر این پارامتر هزینه‌ها به شکل قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کنند.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این پژوهش، مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی با حداکثر تأخیر مجاز در شبکه پستی ایران بررسی شده است. مدل مورد بررسی در ۲۱ سناریوی مختلف حل شد که نتایج آن نشان می‌دهد در نظر گرفتن تأخیر مجاز موجب کاهش هزینه‌های بهینه سیستم می‌شود؛ بنابراین، با وجود در نظر گرفتن جریمه برای تأخیر، با لحاظ کردن تأخیر مجاز،

### مراجع

1. Thomadsen, T. and Larsen, J. (2007). "A hub location problem with fully interconnected backbone and access networks", *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No. 8, PP. 2520- 2531.
2. Contreras, I. (2015). "Hub Location Problems", *Location Science*, Springer, PP. 311- 344.
3. Teixeira, J. C. and Antunes, P. A. (2008). "A hierarchical location model for public facility planning", *European Journal of Operational Research*, Vol. 185, No. 1, PP. 92- 104.
4. Yaman, H. (2009). "The Hierarchical hub median problem with single assignment", *Transportation Research Part B*, Vol. 43, No. 6, PP. 643- 658.

5. Davari, S. and Zarandi, M. H. F. (2012). "The single-allocation hierarchical hub median location problem with fuzzy demands", *African Journal of Business Management*, Vol. 6, No. 1, PP. 347- 360.
  6. Alumur, S. A., Yaman, H. and Kara, B. Y. (2012). "Hierarchical multimodal hub location problem with time-definite deliveries", *Transportation Research Part E*, Vol. 48, No. 6, PP. 1107- 1120.
  7. Yaman, H. and Elloumi, S. (2012). "Star P-Hub center problem and star P-Hub median problem with bounded path lengths", *Computers & Operations Research*, Vol. 39, No. 11, PP. 2725- 2732.
  8. de sa, E. M., De Camargo, R. S. and de Miranda, G. (2013). "Descret optimization an improved benders decomposition algorithm for the tree of hubs location problem", *European Journal of Operation Research*, Vol. 266, PP. 185- 202.
  9. Figueiredo, R. M. A., O'Kelly, M. E. and Pizzolato, N. D. (2014). "A two-stage hub location method for air transportation in Brazil", *International Transactions in Operational Research*, Vol. 21, No. 2, PP. 275– 289.
  10. Zanjirani Farahani, R., Hassani, A., Mousavi, S. M. and Bakhshayeshi Baygi, M. (2014). "A hybrid artificial bee colony for disruption in a hierarchical maximal covering location problem", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 75, No. 6, PP. 129– 141.
  11. Sahin, G. and Sural, H. (2007). "A review of hierarchical facility location models", *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No. 8, PP. 2310- 2331.
  12. Lin, CH. CH. & Chen, SH. H. (2008). "An integral constrained generalized hub-and-spoke network design problem", *Transportation Research Part E*, Vol. 44, No. 6, PP. 986- 1003.
  13. Chen, SH. H. (2010). "A heuristic algorithm for hierarchical hub-and-spoke network of time-definite common carrier operation planning problem", *Networks and Spatial Economics. Springer Science*, Vol. 10, No. 4, PP. 509- 523.
  14. Ayed, O. B. (2011). "Parcel distribution network design problem", *Operational Research*, Vol. 3, No. 2, PP. 139- 149.
  15. Sender, J. and Clausen, U. (2011). "A new hub location model for network design of wagonload traffic", *Procedia Social and Behavioral Sciences*, Vol. 20, No. 8, PP. 90- 99.
  16. Chi, T. H., Yang, H. and Hsiao, H. M. (2011). "A new hierarchical facility location model and genetic algorithm for humanitarian relief", *Information Science And Service Science (NISS). Conference Publications*, Vol. 2, No. 3, PP. 367- 374.
  17. Manzour-al-Ajdad, S. M., Torabi, S. A. and Eshghi, K. (2012). "Single-source capacitated multi-facility weber problem-an iterative two phase heuristic algorithm", *Computers and Operations Research*, Vol. 39, No. 7, PP. 1465- 1476.
  18. Sheu, J. B. and Lin, A. Y. S. (2012). "Hierarchical facility network planning model for global logistics network configurations", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, No. 7, PP. 3053- 3066.
  19. Saboury, A., Ghaffari-Nasab, N., Barzinpour, F. and Jabalameli, M. S. (2013). "Applying two efficient hybrid heuristics for hub location problem with fully inter connected backbone and access networks", *Computers & Operations Research*, Vol. 40, No. 10, PP. 2493- 2507.
  20. Ryerson, M. S. and Kim H. (2013). "Integrating airline operational practices in to passenger airline hub definition", *Journal of Transport Geography*, Vol. 31, No. 12, PP. 84- 93.
  21. Torkestani, S. (2013). "A new hierarchical hub location model with limited demand for network design", MA thesis, Engineering school, Iran University of Science & Technology.
-

22. Karimi, M., Eydi, A. R. and Korani, E. (2014). "Modeling of the capacitated single allocation hub location problem with a hierarchical approach", *IJE Transactions A: Basics* Vol. 27, No. 4, PP. 573- 586.
23. Adibi A. and Razmi J. (2015), 2-Stage stochastic programming approach for hub location problem under uncertainty: A case study of air network of Iran, *J. of Air Transport Management*, Vol. 47, PP. 172-178
24. Razmi J. and Rahmanniya F. (2013), Design of distribution network using hub location model with regard to capacity constraint and service level, *Int. J. Logistics Systems and Management*, Vol. 16, No. 4, pp. 386-398

#### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Hub Facilities
  2. Single Allocation (SA)
  3. Multiple Allocation (MA)
  4. Hierarchical Hub Location Problem (HHLP)
  5. Hybrid Artificial Bee Colony (HABC) algorithm
  6. Mixed Integer Linear Programming (MILP)
-