

طراحی مدلی پایدار در مسائل مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی در شبکه حمل‌ونقل چندوجهی با در نظر گرفتن اثر اختلال (عامدانه و غیرعامدانه)

سارا سادات ترکستانی¹، سیدمحمد سیدحسینی^{2*}، احمد ماکوئی³، کامران شهبانقی⁴

- 1- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
- 2- استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
- 3- استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
- 4- دانشیار، گروه مهندسی سیستم، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

دریافت: 1396/10/9

پذیرش: 1396/4/24

چکیده

در یک شبکه حمل‌ونقل عمومی (هوایی-زمینی)، هدف اصلی انتقال مسافر از مبدأ به مقصد و توجه به اهمیت خدمات‌رسانی است. در نظر گرفتن انواع مختلف وسیله حمل‌ونقل و به دنبال آن افزایش خدمات‌رسانی (تنوع خدمات)، یکی از مسائل مهم و اساسی در سیستم‌های مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی است. همچنین بررسی اثر اختلال (عامدانه و غیرعامدانه)، تغییرات دامنه ارتباطات در شبکه توزیع، مکان‌یابی‌ها و تخصیص‌های مجدد و طراحی شبکه‌ای پایدار جهت پاسخ‌گویی با وجود اختلال، از جمله مسائلی هستند که در حوزه مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی کمتر مورد توجه قرار گرفته شده‌اند. در این پژوهش برای طراحی پایدار شبکه مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی، با در نظر گرفتن حمل‌ونقل چندوجهی و محدودیت ظرفیت خدمات‌رسانی در دو سناریو عدم وجود اختلال و وجود اختلال، از یک

مدل خطی استفاده شده و مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز و شبیه‌سازی مونت‌کارلو (نرم‌افزار متلب) حل شده است. از نتایج حاصل از سناریو عدم وجود اختلال برای به دست آوردن احتمال اختلال گره‌هاب‌های غیرمرکزی و مسیرهای هابی برای سناریو وجود اختلال استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که مدل و روش حل پیشنهادی حتی با وجود اختلال، تغییرات مکان‌یابی گره‌هاب‌های غیرمرکزی و تخصیص‌های مجدد سطوح سلسله‌مراتب شبکه، می‌تواند پاسخ‌گوی تقاضاهای موجود باشد. افزایش ضریب تخفیف، افزایش بازه اختلال و همچنین افزایش تعداد گره‌هاب‌های غیرمرکزی در شبکه سبب افزایش هزینه کلی شبکه می‌شود. همچنین افزایش سطوح خدمت‌رسانی، توجه به انواع مسیرها و وسیله‌های حمل‌ونقل می‌تواند قدرت تصمیم‌گیری در شبکه را گسترش دهد.

واژگان کلیدی: مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی؛ حمل‌ونقل چندوجهی؛ اختلال؛ شبیه‌سازی مونت‌کارلو.

1- مقدمه

اساسی‌ترین مسئله در سیستم‌های حمل‌ونقل، لجستیک و شبکه‌های ارتباطی ارسال جریان از نقاط مبدأ به مقصد است. هاب‌ها تسهیلات خاصی هستند که به‌عنوان نقاط متمرکزکننده (جمع‌آوری، جابه‌جایی و توزیع) در هنگامی که اتصال مستقیم دو نقطه در یک شبکه هزینه‌بر یا از نظر فیزیکی امکان‌ناپذیر باشد، نقشی اساسی را ایفا می‌نمایند [1، 2، 3].

با توجه به آنکه در جهان واقعی انواع مختلفی از سیستم‌های قطعی¹ و غیرقطعی² با ماهیت‌ها و ساختارهای مختلف در جریان و فعالیت هستند و با توجه به وجود انواع مختلفی از سیستم‌ها با خدمات متنوع و ساختارهای ارتباطی گوناگون در دنیای واقعی، فرض وجود سلسله‌مراتب یعنی سیستم‌هایی که با بیش از یک سطح از خدمات در نظر گرفته می‌شوند، امری بدیهی است [2، 3]. الگوی جریان، تنوع خدمت‌دهی و نوع پیکربندی در شبکه سلسله‌مراتبی سبب افزایش سرعت و سطح پاسخ‌گویی در

1. Definite
2. Uncertain

شبکه می‌شود، لذا هرگونه تغییرات تقاضا به دلیل عوامل غیرقابل‌پیش‌بینی (اختلال غیرعامدانه و یا عامدانه) سبب تغییرات مکان‌یابی و تخصیص در سطوح سلسله‌مراتب می‌گردد و شبکه از حالت طبیعی خود خارج می‌شود؛ قسمتی که فعال بوده غیرفعال می‌گردد و بالعکس. در این شرایط، توجه به یک طراحی پایدار که بتواند در هر موقعیتی پاسخ‌گوی نیاز مشتری (مشتریان) باشد، امری ضروری است.

ازجمله بیشترین کاربردهای مدل‌های مکان‌یابی هاب در حمل‌ونقل می‌توان به حمل هوایی مسافران، حمل هوایی مواد یا بار، ارسال سریع، عملیات پستی و سیستم ترانزیت سریع اشاره کرد.

بحث قابلیت اطمینان در یک سیستم ارتباطی ازجمله مواردی است که در حوزه مکان‌یابی هاب کمتر موردتوجه قرار گرفته شده است. طراحی سیستم باید به‌گونه‌ای باشد که شبکه بتواند با وجود ازکارافتادگی‌های احتمالی همچنان به فعالیت خود جهت پاسخ‌گویی به مشتری ادامه دهد. سرعت بالای تغییرات بر عدم اطمینان و ابهام در تصمیم‌گیری افزوده است [4] و به دنبال آن، اختلال پدیدآمده یکی از عوامل تأثیرگذار در چگونگی مدیریت سیستم‌ها در شرایط بحرانی است [5].

یکی از انگیزه‌های اصلی پژوهش انجام‌شده، طراحی سیستمی پایدار برای مسائل مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی مسافربری جهت مقابله با عدم کارایی سیستم در مواجهه با اختلال غیرعامدانه یا عامدانه است. پژوهش به‌عمل‌آمده در سیستم حمل‌ونقل هوایی - زمینی با سه سطح سلسله‌مراتب و دو نوع مختلف هاب - شامل هاب‌های غیرمرکزی و مرکزی در شبکه حمل‌ونقل چندوجهی - موردبررسی قرار گرفته است.

اسچالتز¹ [6]، کالو و مارکس² [7] برای اولین بار مسائل مکان‌یابی سلسله‌مراتبی در حالت عدم وجود اختلال در دهه 80 و در سال‌های 1970 و 1973 ارائه کردند. ازجمله برجسته‌ترین مسائل مکان‌یابی هاب در حالت عدم وجود اختلال در گره‌ها و مسیرهای هابی می‌توان به پژوهش یامان³ [8] و آلومور و همکارانش⁴ [9] اشاره

1. Schultz

2. Calvo and Marks

3. Yaman

4. Alumur et al.

نمود. یامان [8] در سال 2009 برای اولین بار مسئله‌ی مکان‌یابی p هاب میانه سلسله‌مراتبی در فضایی قطعی و بدون اختلال در شبکه را مطرح نمود. مدل چندمحصولی در فضایی گسسته با سطوح عملیاتی و راهبردی در سه لایه ارائه شده که سطح اول آن متشکل از چهار هاب مرکزی است و در سطح دوم آن، هفت هاب غیرمرکزی قرار گرفته است. سطح صفر را نیز گره‌های تقاضا تشکیل می‌دهد. آلمور و همکارانش [9] در سال 2012 برای اولین بار مدلی چندلایه با سطح برنامه‌ریزی عملیاتی به صورت تک‌دوره‌ای و تک‌هدفه در فضایی گسسته و بدون وجود اختلال در شبکه، با در نظر گرفتن مسئله پوشش، ارائه نمودند. آن‌ها به توسعه مدل پیشنهادی مکان‌یابی هاب با در نظر گرفتن محدودیت زمان جابه‌جایی در شبکه حمل‌ونقل چندوجهی نیز پرداختند [10]. صفرقلی و بهنامیان¹ [11] در سال 2017 مسئله مکان‌یابی سلسله‌مراتبی هاب در حالت عدم وجود اختلال را با در نظر گرفتن حداکثر زمان مجاز تحویل کالا تحت عنوان الزامات خدمت‌رسانی توسعه دادند.

مسائل مکان‌یابی هاب با در نظر گرفتن بحث قابلیت اطمینان و اثر اختلال در شبکه کمتر مورد توجه قرار گرفته شده و تقریباً کلیه تحقیقات صورت گرفته مربوط به بررسی قابلیت اطمینان کمان‌ها در شبکه‌های ارتباطی بوده و تعداد معدودی به بررسی اثر خرابی احتمالی گره‌ها پرداخته‌اند. اسنایدر و داسکین² [12] در سال 2005 برای نخستین بار اثر اختلال تسهیلات در شبکه را با هدف حداقل‌سازی هزینه خرابی و ازکارافتادگی تسهیلات تحت عنوان قابلیت اطمینان ارائه کردند. برمن و همکارانش³ [13] در سال 2009 مسئله حداکثر پوشش مکان‌یابی هاب را با در نظر گرفتن خرابی یک مسیر و هاب‌ها بررسی کردند. کویی و همکارانش⁴ [14] در تحقیقات خود در سال 2010 به بررسی اثر متفاوت بودن احتمال خرابی تسهیلات پرداختند.

پنگ و همکارانش⁵ [15] در سال 2011 عدم پایایی تسهیلات با در نظر گرفتن ظرفیت محدود و پیروی احتمال خرابی از توزیع برنولی را در حالت گسسته و

1. Safargholi and Behnamian

2. Snyder and Daskin

3. Berman et al.

4. Cui et al.

5. Peng et al.

سناریویی ارائه کردند. بهینه‌سازی طرح‌های مقاوم‌سازی در صورت مواجهه با خرابی‌های بزرگ توسط لیبراتور و همکارانش¹ [16] در سال 2011 معرفی شد. جبارزاده و همکارانش² [17] در سال 2012 با در نظر گرفتن ریسک خرابی جزئی و کامل تسهیلات به طراحی مدلی جهت تعیین هم‌زمان تعداد و مکان تسهیلات و نحوه تخصیص آن‌ها پرداختند. آزاد و همکارانش³ [18] در سال 2012 راهبردهایی جهت محافظت از اختلالات تصادفی در شبکه را پیشنهاد نمودند. پرورش و همکارانش⁴ [19] در سال 2014 به توسعه یک الگوریتم هیوریستیک برای حل مسئله مکان‌یابی هاب با وجود اختلال عامدانه در شبکه دوسطحی پیرو-پیشرو پرداختند. عزیزی و همکارانش⁵ در سال 2016 [20] غیرقابل دسترس بودن مرکز فعالیت را در مسئله کلاسیک تخصیص تکی p -هاب میانه با تخصیص تأسیسات پشتیبان به هر مرکز فعالیت در شبکه با هدف کاهش تأثیرات خرابی‌های یک مرکز فعالیت توسعه دادند. محمدی و همکارانش⁶ در سال 2016 یک شبکه تدارکات قابل اعتماد را با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان برای ظرفیت گره هاب‌ها با هدف حداقل‌سازی هزینه خرابی توسعه داده و با استفاده از روش p استوار بهینه⁷ به حل مدل پیشنهادی با تعریف سناریوهای خرابی پرداختند [21]. یحیایی و بشیری⁸ در سال 2017 مسئله مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه را با در نظر گرفتن ریسک اختلال توسعه دادند و جهت حل مدل پیشنهادی از الگوریتم تجزیه بندرز استفاده نمودند [22]. ژاله‌چیان و همکارانش⁹ در سال 2018 مسئله مکان‌یابی هاب را با در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی و اختلال به صورت سناریویی با توسعه روش حل ابتکاری بررسی نمودند [23].

1 Liberatore et al.

2 Jabbarzadeh et al.

3. Azad et al.

4. Parvaresh et al.

5. Azizi et al.

6. Mohammadi et al.

7. P-Robust

8. Yahyaei and Bashiri

9. Zhalechian et al.

حال در این پژوهش، یک مدل سلسله‌مراتبی مکان‌یابی هاب در دو حالت عدم وجود اختلال و وجود اختلال در حالتی که سطوح سلسله‌مراتب (تسهیلات و مسیرهای ارتباطی) در محیطی تصادفی، دچار اختلال غیرعامدانه می‌شوند و زمان دقیق رخداد اختلال (عدم قطعیت) مشخص نیست، به‌صورت سناریوهایی جهت تخصیص مجدد مشتریان و جلوگیری از عدم کارکرد صحیح شبکه بررسی شده است.

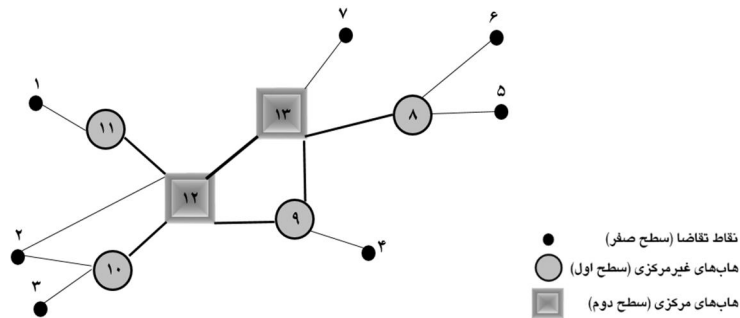
2- بیان مسئله

برای طراحی یک مدل پایدار سلسله‌مراتبی هاب با در نظر گرفتن الزامات خدمات‌رسانی در شبکه‌ای که با در نظر گرفتن اختلال، از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح استفاده شده است. شبکه حاصل دارای سه سطح سلسله‌مراتب از جمله گره‌های تقاضا (سطح صفر)، گره‌های غیرمرکزی (سطح یک) و گره‌های مرکزی (سطح دو) است. گره تقاضا می‌تواند به هر دو گره هاب غیرمرکزی یا مرکزی تخصیص یابد. سپس گره هاب غیرمرکزی به هاب مرکزی متصل می‌شود.

یک شبکه‌ی حمل‌ونقل چندوجهی (زمینی و هوایی) در سیستم حمل و نقل هوایی-زمینی در نظر گرفته شده است. ارتباط بین هر دو گره هاب هوایی و زمینی به ترتیب با استفاده از حمل‌ونقل هوایی و زمینی خواهد بود، حال آنکه ارتباط بین گره هاب هوایی و زمینی با استفاده از حمل‌ونقل زمینی خواهد بود. ازجمله الزامات خدمات‌رسانی در نظر گرفتن محدودیت حداقل و حداکثر ظرفیت اقتصادی جهت جابه‌جایی مسافر برای هر یک از گره‌های غیرمرکزی و مرکزی است؛ چراکه در هر نوع جابه‌جایی، ظرفیت باید به حداقل مقدار اقتصادی خود برسد و از حداکثر ظرفیت اقتصادی خود نیز بیشتر نشود تا سفر انجام پذیرد.

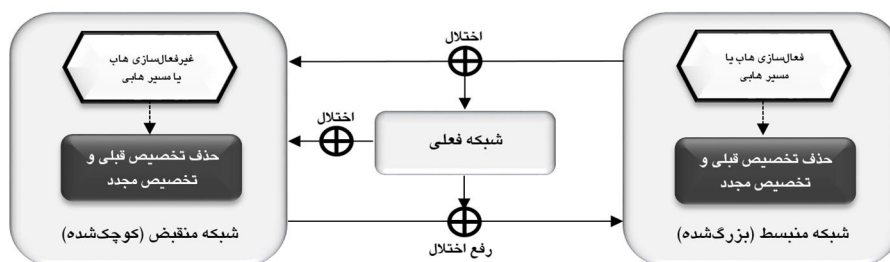
شکل 1 نمای کلی شبکه هاب با سه سطح سلسله‌مراتب، تخصیص تکی و چندگانه را نشان می‌دهد. هاب‌های مرکزی و غیرمرکزی شامل مراکز حمل‌ونقل زمینی و هوایی جهت جابه‌جایی مسافران است. مسافران از هر یک از سطوح غیرمرکزی و مرکزی می‌توانند سفر خود را انجام دهند. اتصال میان هاب‌های هوایی، به‌صورت

مسیر هوایی و میان هاب هوایی-زمینی و هاب‌های زمینی-زمینی، به صورت مسیر زمینی است.



شکل 1 نمای کلی شبکه هاب چندوجهی با سه سطح سلسله‌مراتب

پس از آنکه شبکه دچار اختلال می‌شود، گره یا مسیرهایی به طور موقت از شبکه حذف شده و برای مدتی تا پایان زمان تعمیر آن‌ها غیرفعال می‌شوند. جهت استفاده مجدد، گره‌ها و مسیرهای دچار اختلال نگهداری می‌شوند و هزینه‌ای برای آن‌ها پرداخت می‌شود (هزینه تعمیر و نگهداری). در هنگامی که این اختلال رفع شد، اگر مسیر یا گره مختل شده مجدداً بخواند مورد استفاده قرار گیرد، نیاز است که هزینه‌ای برای راه‌اندازی مجدد آن پرداخت شود؛ لذا مکان‌یابی، تخصیص و دامنه‌های ارتباطی دچار تغییرات شده، با شروع اختلال ارتباطات شبکه منقبض (کوچک) و پس از رفع آن، منبسط (بزرگ) خواهد شد. شکل 2 نمای کلی چگونگی اثر اختلال را در شبکه هاب سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد.



شکل 2 نمای کلی اثر اختلال در شبکه هاب با سه سطح سلسله‌مراتب

3- مدل‌سازی مسئله

در این بخش به طراحی پایدار یک مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی در یک شبکه حمل‌ونقل چندوجهی پرداخته شده است. برای مدل‌سازی مسئله از مدل ارائه‌شده توسط آلومور [9، 10] استفاده شده است. مدل در دو سناریو مورد بررسی قرار گرفته شده است:

- سناریو 1، با در نظر گرفتن عدم وجود اختلال (بخش 3-1).
- سناریو 2، با در نظر گرفتن وجود اختلال (بخش 3-2).

تفسیر مدل سناریو 1

یک مسئله مکان‌یابی هاب مسافربری با تعداد مشخص گره هاب، در حالت عدم وجود اختلال با سه سطح سلسله‌مراتب از جمله گره تقاضا، گره هاب‌های غیرمرکزی و گره هاب مرکزی با وجود دو نوع مختلف حمل‌ونقل هوایی و زمینی برای هر یک از سطوح سلسله‌مراتب ارائه شده است. مدل‌سازی مسئله بر اساس سه دسته اصلی محدودیت مکان‌یابی-تخصیص هاب‌ها، مسیریابی جریان در سطوح سلسله‌مراتب، الزامات خدمات‌رسانی (محدودیت ظرفیت) برای گره هاب‌ها با هدف اصلی حداقل نمودن هزینه‌های احداث و عملیاتی گره هاب‌ها و مسیرهای هابی و همچنین هزینه جابه‌جایی مسافر در شبکه توسعه داده شده است.

تفسیر مدل سناریو 2

مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی چندوجهی ارائه‌شده در سناریو 1، با در نظر گرفتن اختلال توسعه داده شده است. با توجه به شرایط اختلال موجود در شبکه، با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و احتمالات خرابی به‌دست‌آمده از سناریوی 1 در حالت سالم بودن سیستم، مدل‌سازی مسئله در حالت اختلال برای شبکه مذکور توسعه داده شده است. با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو حالت خرابی، تعداد خرابی، گره هاب‌ها یا مسیرهای هابی که دچار اختلال می‌شوند، تعیین شده و به دنبال آن هزینه‌های نگهداری، تعمیر و راه‌اندازی مجدد (پس از رفع خرابی) بر اساس مدت‌زمان اختلال به وجود آمده به هزینه‌های پیشین سیستم تحمیل

می‌شود و در این حالت، هدف اصلی حداقل نمودن هزینه‌های شبکه و مکان‌یابی-تخصیص مجدد در سیستم براساس این اصل است.

3-1- مدل‌سازی مسئله بدون وجود اختلال در شبکه (سناریو 1)

محدودیت‌های مدل ریاضی پیشنهادی در 3 بخش مکان‌یابی-تخصیص هاب‌ها، مسیریابی جریان و الزامات خدمات‌دهی (محدودیت ظرفیت) طبقه‌بندی و سپس توضیح داده شده است:

مکان‌یابی-تخصیص هاب‌ها در شبکه سلسله‌مراتبی

برای نوع حمل‌ونقل $m \in M$ متغیرهای تصمیم X_{ik}^m ، X_{il}^m و X_{iu}^m یک هستند، اگر گره تقاضا $i \in I$ به ترتیب به گره هاب غیرمرکزی زمینی $k \in H$ ، گره هاب غیرمرکزی هوایی $l \in H$ و گره هاب مرکزی $u \in C$ تخصیص داده شود و در غیر این صورت، صفر خواهند بود. بر این اساس، متغیرهای تصمیم X_{kk}^m ، X_{ll}^m و X_{uu}^m یک هستند، اگر به ترتیب در گره‌های $k \in H$ ، $l \in H$ و $u \in C$ ، هاب‌های غیرمرکزی زمینی، هوایی و گره هاب مرکزی احداث شده باشد و در غیر این صورت، صفر خواهند بود. متغیرهای تصمیم Z_{lu}^m و Z_{ku}^m ، Z_{ki}^m یک هستند، اگر به ترتیب میان گره هاب‌های غیرمرکزی زمینی-هوایی $(k-l)$ ، گره هاب غیرمرکزی زمینی-گره هاب مرکزی $(k-u)$ و گره هاب غیرمرکزی هوایی-گره هاب مرکزی $(l-u)$ مسیر هابی احداث شده باشد و در غیر این صورت، صفر خواهند بود. محدودیت‌های مکان‌یابی-تخصیص مدل به صورت روابط (1-16) است:

$$X_{ik}^g \leq X_{kk}^g \quad \forall i \in I, k \in H, g \in M \quad (1)$$

$$X_{il}^g \leq X_{ll}^m \quad \forall i \in I, l \in H, g, m \in M \quad (2)$$

$$X_{iu}^g \leq X_{uu}^m \quad \forall i \in I, u \in C, g, m \in M \quad (3)$$

$$\sum_{u \in C} Z_{ku}^g \leq X_{kk}^g \quad \forall k \in H, g \in M \quad (4)$$

$$\sum_{u \in C} Z_{lu}^g \leq X_{ll}^m \quad \forall l \in H, g, m \in M \quad (5)$$

$$Z_{kl}^g \leq X_{kk}^g \quad \forall l, k \in H, g \in M \quad (6)$$

$$Z_{kl}^g \leq X_{ll}^m \quad \forall l, k \in H, g, m \in M \quad (7)$$

$$Z_{ku}^g \leq X_{kk}^g \quad \forall k \in H, u \in C, g \in M \quad (8)$$

$$Z_{ku}^g \leq X_{uu}^m \quad \forall k \in H, u \in C, g, m \in M \quad (9)$$

$$Z_{lu}^m \leq X_{ll}^m \quad \forall l \in H, u \in C, m \in M \quad (10)$$

$$Z_{lu}^m \leq X_{uu}^m \quad \forall l \in H, u \in C, m \in M \quad (11)$$

$$\sum_{k \in H} X_{kk}^g = P_1 \quad \forall g \in M \quad (12)$$

$$\sum_{l \in H} X_{ll}^m = P_2 \quad \forall m \in M \quad (13)$$

$$\sum_{u \in C} X_{uu}^m = P_3 \quad \forall m \in M \quad (14)$$

$$X_{ik}^g, X_{il}^g, X_{iu}^g, X_{kk}^g, X_{jk}^g, X_{jl}^g, X_{ju}^g, X_{kk}^g, X_{ll}^m, X_{uu}^m \in \{0, 1\}$$

$$\forall i, j \in I, l, k \in H, u \in C, g, m \in M \quad (15)$$

$$Z_{kl}^g, Z_{lk}^g, Z_{ku}^g, Z_{uk}^g, Z_{lu}^m, Z_{ul}^m \in \{0, 1\} \quad \forall l, k \in H, u \in C, g, m \in M \quad (16)$$

محدودیت‌های 1-3 تضمین می‌نمایند که هر گره تقاضا به گره هاب غیرمرکزی یا مرکزی تخصیص داده شود. محدودیت‌های 4-5 گره هاب غیرمرکزی به بیش از یک گره هاب مرکزی تخصیص یابد. ارتباط میان گره هاب‌های غیرمرکزی در صورتی امکان‌پذیر است که ابتدا گره هاب در آن نقاط احداث شده باشد (محدودیت‌های 6-7). براساس محدودیت‌های 8-11 در صورتی جریان میان گره هاب مرکزی و

غیرمرکزی برقرار می‌شود، که هر دو هاب مرکزی و غیرمرکزی در ابتدا احداث شده باشند. محدودیت‌های 14-12 تعداد گره هاب غیرمرکزی زمینی P_1 ، گره هاب غیرمرکزی هوایی P_2 و گره هاب مرکزی P_3 را نشان می‌دهند. محدودیت‌های 16-15 متغیرهای تصمیم صفر و یک را نشان می‌دهند.

مسیریابی جریان

حجم جریان (مسافر) عبوری از گره $i \in I$ به گره $j \in I$ با استفاده از نوع حمل‌ونقل $m \in M$ است (نوع جریان عبوری بر اساس مدل ارنست و کریشنامورتی [2] در سال 1996 برای مکان‌یابی هاب با p گره توسعه داده شده است). حجم جریان عبوری با استفاده از نوع حمل‌ونقل $m \in M$ ، میان گره هاب غیرمرکزی زمینی و گره هاب غیرمرکزی هوایی با استفاده از Y_{kl}^m نشان داده شده است. همچنین حجم جریان عبوری میان گره هاب غیرمرکزی زمینی و گره هاب مرکزی با Y_{ku}^m و میان گره هاب غیرمرکزی هوایی و گره هاب مرکزی با Y_{lu}^m نشان داده شده است. محدودیت‌های جریان عبوری در شبکه سلسله‌مراتبی به صورت (17-28) است:

$$\sum_{l \in H} Y_{kl}^g - \sum_{l \in H} Y_{lk}^g = \sum_{j \in I} W_{ij}^m (X_{ik}^g - X_{jk}^g) \quad \forall i \in I, k \in H, g, m \in M \quad (17)$$

$$\sum_{l \in H} Y_{kl}^g + \sum_{u \in C} Y_{ku}^g - \sum_{u \in C} Y_{uk}^g - \sum_{l \in H} Y_{lk}^g = \sum_{j \in I} W_{ij}^m (X_{ik}^g - X_{jk}^g)$$

$$\forall i \in I, k \in H, g, m \in M \quad (18)$$

$$\sum_{k \in H} Y_{lk}^g - \sum_{k \in H} Y_{kl}^g = \sum_{j \in I} W_{ij}^m (X_{il}^g - X_{jl}^g) \quad \forall i \in I, l \in H, g, m \in M \quad (19)$$

$$\sum_{k \in H} Y_{lk}^g + \sum_{u \in C} Y_{lu}^m - \sum_{u \in C} Y_{ul}^m - \sum_{k \in H} Y_{kl}^g = \sum_{j \in I} W_{ij}^m (X_{il}^g - X_{jl}^g)$$

$$\forall i \in I, l \in H, g, m \in M \quad (20)$$

$$\sum_{k \in H} Y_{uk}^g + \sum_{l \in H} Y_{ul}^m - \sum_{l \in H} Y_{lu}^m - \sum_{k \in H} Y_{ku}^g = \sum_{j \in I} W_{ij}^m (X_{iu}^g - X_{ju}^g)$$

$$\forall i \in I, u \in C, g, m \in M \quad (21)$$

$$Y_{kl}^g + Y_{lk}^g \leq \sum_{j \in I} W_{ij}^m Z_{kl}^g \quad \forall i \in I, l, k \in H, g, m \in M \quad (22)$$

$$Y_{ku}^g + Y_{uk}^g \leq \sum_{j \in I} W_{ij}^m Z_{ku}^g \quad \forall i \in I, k \in H, u \in C, g, m \in M \quad (23)$$

$$Y_{lu}^m + Y_{ul}^m \leq \sum_{j \in I} W_{ij}^m Z_{lu}^m \quad \forall i \in I, l \in H, u \in C, m \in M \quad (24)$$

$$Y_{kl}^g \leq \sum_{j \in I} W_{ij}^m Z_{kl}^g \quad \forall i \in I, l, k \in H, g, m \in M \quad (25)$$

$$Y_{ku}^g \leq \sum_{j \in I} W_{ij}^m Z_{ku}^g \quad \forall i \in I, k \in H, u \in C, g, m \in M \quad (26)$$

$$Y_{lu}^m \leq \sum_{j \in I} W_{ij}^m Z_{lu}^m \quad \forall i \in I, l \in H, u \in C, m \in M \quad (27)$$

$$Y_{kl}^g, Y_{lk}^g, Y_{ku}^g, Y_{uk}^g, Y_{lu}^m, Y_{ul}^m \geq 0 \quad \forall l, k \in H, u \in C, g, m \in M \quad (28)$$

محدودیت‌های 17-18 معادله تعادلی جریان در گره هاب غیرمرکزی زمینی و محدودیت‌های 19-20 معادله تعادلی جریان در گره هاب غیرمرکزی هوایی را، هنگامی که تنها یک نوع حمل‌ونقل زمینی یا هر دو نوع حمل‌ونقل زمینی و هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد. محدودیت 21 معادله تعادلی جریان در گره هاب مرکزی را، هنگامی که هر دو نوع حمل‌ونقل زمینی و هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد. جریان هنگامی میان هاب‌های غیرمرکزی و همچنین هاب‌های مرکزی و غیرمرکزی برقرار می‌شود که مسیر منتهی به هاب احداث شده باشد (محدودیت‌های 22-24). میزان جریان میان هاب‌ها در سلسله‌مراتب از کل جریانی که به مقصد می‌رسد، باید کمتر باشد (محدودیت‌های 25-27). محدودیت 28 متغیرهای تصمیم پیوسته مسئله را نشان می‌دهد.

محدودیت ظرفیت خدمات‌دهی

در یک شبکه، هنگامی مسافر می‌تواند از هر گره هاب غیرمرکزی و مرکزی (پایانه زمینی و هوایی) خدمت دریافت نماید که وسیله حمل‌ونقل به ترتیب به حداقل و

حداکثر ظرفیت اقتصادی خود رسیده و از آن حد تجاوز نکرده باشد؛ بنابراین، حداقل ظرفیت اقتصادی گره هاب غیرمرکزی زمینی با Cap_k^{min} ، گره هاب غیرمرکزی هوایی با Cap_l^{min} و گره هاب مرکزی با Cap_u^{min} نشان داده شده است. همچنین حداکثر ظرفیت اقتصادی گره هاب غیرمرکزی زمینی با Cap_k^{max} ، گره هاب غیرمرکزی هوایی با Cap_l^{max} و گره هاب مرکزی با استفاده از Cap_u^{max} نشان داده شده است. محدودیت ظرفیت مدل به صورت 29-31 خواهد بود:

$$Cap_k^{min} X_{kk}^g \leq \sum_{i,j \in I} W_{ij}^m X_{ik}^g + \sum_{l \in H} Y_{lk}^g + \sum_{u \in C} Y_{uk}^g \leq Cap_k^{max} X_{kk}^g \quad \forall k \in H, g \in M \quad (29)$$

$$Cap_l^{min} X_{ll}^m \leq \sum_{i,j \in I} W_{ij}^m X_{il}^g + \sum_{k \in H} Y_{kl}^g + \sum_{u \in C} Y_{ul}^g \leq Cap_l^{max} X_{ll}^m \quad \forall l \in H, g, m \in M \quad (30)$$

$$Cap_u^{min} X_{uu}^m \leq \sum_{i,j \in I} W_{ij}^m X_{iu}^g + \sum_{k \in H} Y_{ku}^g + \sum_{l \in H} Y_{lu}^g \leq Cap_u^{max} X_{uu}^m \quad \forall u \in C, g, m \in M \quad (31)$$

محدودیت‌های 29-31 حداکثر و حداقل ظرفیت اقتصادی گره‌های غیرمرکزی زمینی، هوایی و گره هاب مرکزی هستند.

تابع هدف

هدف اصلی مدل ارائه شده حداقل نمودن هزینه کل جابه‌جایی مسافران از مبادی به مقاصد در یک شبکه حمل‌ونقل هوایی و زمینی به صورت سلسله‌مراتبی است. هزینه کل جابه‌جایی ($TotC_s$) شامل هزینه احداث گره‌های غیرمرکزی و مرکزی (FCE)، هزینه احداث مسیرهای هابی (Fco)، هزینه عملیاتی (OC) و هزینه حمل‌ونقل (TC) است.

بر اساس هزینه‌های موجود، هزینه احداث گره هاب غیرمرکزی زمینی، هوایی و گره هاب مرکزی برای نوع حمل‌ونقل $m \in M$ به ترتیب عبارت‌اند از: F_k^m ، F_l^m و F_u^m . به طور مشابه، به ترتیب هزینه‌های احداث مسیرهای هابی $(k-l)$ ، $(k-u)$ و

$(l - u)$ به صورت g_{ku}^m و g_{lu}^m است. هزینه‌های عملیاتی واحد جریان به وسیله گره هاب‌های غیرمرکزی زمینی، هوایی و گره هاب مرکزی به صورت OC_k^m ، OC_l^m و OC_u^m تعریف شده است. همچنین هزینه حمل‌ونقل واحد جریان از گره تقاضا $i \in I$ به گره هاب غیرمرکزی زمینی، هوایی و گره هاب مرکزی به ترتیب C_{ik}^m ، C_{il}^m و C_{iu}^m و هزینه حمل‌ونقل واحد جریان در مسیرهای هابی $(k - l)$ ، $(k - u)$ و $(l - u)$ به ترتیب C_{kl}^m ، C_{ku}^m و C_{lu}^m است. اجزای هزینه کل مدل سلسله‌مراتبی به صورت روابط (32-35) است:

$$FCE = \sum_{g \in M} \sum_{k \in H} F_k^g X_{kk}^g + \sum_{m \in M} (\sum_{l \in H} F_l^m X_{ll}^m + \sum_{u \in C} F_u^m X_{uu}^m) \quad (32)$$

$$FCO = \sum_{g \in M} \sum_{k \in H} \sum_{l \in H} g_{kl}^g Z_{kl}^g +$$

$$\sum_{m \in M} (\sum_{l \in H} \sum_{u \in C} g_{lu}^m Z_{lu}^m + \sum_{k \in H} \sum_{u \in C} g_{ku}^g Z_{ku}^g) \quad (33)$$

$$OC = \sum_{i, j \in I} \sum_{m \in M} \left(\sum_{g \in M} \sum_{k \in H} OC_k^g (\sum_{k \in H} W_{ij}^m X_{ik}^g + \sum_{l \in H} Y_{lk}^g + \sum_{u \in C} Y_{uk}^g) + \sum_{l \in H} OC_l^m (\sum_{g \in M} \sum_{k \in H} W_{ij}^m X_{il}^g + \sum_{g \in M} \sum_{k \in H} Y_{kl}^g + \sum_{u \in C} Y_{ul}^m) + \sum_{u \in C} OC_u^m (\sum_{\sum_{k \in H} Y_{kl}^g} \sum_{k \in H} W_{ij}^m X_{iu}^g + \sum_{l \in H} Y_{lu}^m + \sum_{\sum_{k \in H} Y_{kl}^g} \sum_{k \in H} Y_{ku}^g) \right) \quad (34)$$

$$TC = \sum_{i, j \in I} \sum_{m \in M} \sum_{g \in M} \left(\sum_{k \in H} W_{ij}^m C_{ik}^g X_{ik}^g + \sum_{g \in M} \sum_{k \in H} W_{ij}^m C_{il}^g X_{il}^g + \sum_{\sum_{k \in H} Y_{kl}^g} \sum_{k \in H} W_{ij}^m C_{iu}^g X_{iu}^g + \sum_{l \in H} \sum_{k \in H} \alpha_c^g C_{kl}^g Y_{kl}^g + \sum_{k \in H} \sum_{u \in C} \alpha_c^g C_{ku}^g Y_{ku}^g + \sum_{l \in H} \sum_{u \in C} \alpha_c^m C_{lu}^m Y_{lu}^m + \sum_{k \in H} W_{ij}^m C_{jk}^g X_{jk}^g + \sum_{g \in M} \sum_{k \in H} W_{ij}^m C_{jl}^g X_{jl}^g + \sum_{\sum_{k \in H} Y_{kl}^g} \sum_{k \in H} W_{ij}^m C_{ju}^g X_{ju}^g \right) \quad (35)$$

با استفاده از اجزای هزینه کل، مقدار تابع هدف در سناریوی اول به صورت (36) خواهد بود:

$$TotC_{s1} = FCE + FCO + OC + TC \quad (36)$$

در نتیجه، مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی با وجود چند نوع مختلف

سیستم حمل‌ونقل و با هدف حداقل نمودن هزینه کلی جابه‌جایی مسافران شامل هزینه احداث هاب‌ها و مسیرهای هابی، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های حمل‌ونقل خواهد بود:

$$\text{Minimize } TotC_{s1}$$

subject to: (1-31)

2-3- مدل‌سازی مسئله با وجود اختلال در شبکه (سناریو 2)

در بخش (1-3)، مسئله در حالتی که هیچ‌گونه اختلالی رخ نداده، مدل‌سازی شده است (سناریو 1). حال در این بخش، مسئله در حالتی واقعی با در نظر گرفتن تأثیر اختلال در شبکه هاب سلسله‌مراتبی جهت بررسی عوامل غیرقابل‌اجتناب در عالم واقعیت مدل‌سازی شده است؛ لذا احتمال اختلال برای هر یک از گره هاب‌های غیرمرکزی زمینی، هوایی و مسیر $(k-l)$ به صورت p_k^t ، p_l^t و p_{kl}^t در نظر گرفته شده است. پس از ایجاد اختلال در شبکه، گره یا مسیر غیرفعال شده و پس از تعمیر می‌تواند مجدداً فعال شود. حال اختلال (خرابی) سیستم در سناریو 2 به 4 حالت می‌تواند رخ دهد:

- حالت اول: اختلال تنها در گره هاب غیرمرکزی زمینی k رخ دهد؛

- حالت دوم: اختلال تنها در گره هاب غیرمرکزی هوایی l رخ دهد؛

- حالت سوم: اختلال در هر دو گره هاب غیرمرکزی زمینی k و هوایی l رخ دهد؛

- حالت چهارم: اختلال تنها در مسیر $(k-l)$ رخ دهد.

در شبکه موجود، پس از اختلال ناگهانی به وجود آمده، گره هاب یا مسیر هابی تا تعمیر شدن و رفع اختلال موجود نگهداری می‌شود؛ لذا هزینه‌های نگهداری (MC)، تعمیر (RC) و هزینه راه‌اندازی پس از تعمیر (SC) از جمله هزینه‌هایی هستند که در حالت اختلال به شبکه تحمیل می‌شود.

مؤلفه‌ها و متغیرهای تصمیم در حالت اختلال

جهت بررسی 4 حالت اختلال تعریف شده در سناریو 2، متغیرهای تصمیم با توجه به زمان رخداد اختلال تعریف شده است:

- $U_k^{(t-1,t)}$ یک است، اگر گره هاب غیرمرکزی زمینی در زمان $t \in T$ فعال باشد

و $(p_k^t = 0)$ و صفر است، اگر گره هاب در زمان $(t-1) \in T$ غیرفعال باشد $(p_k^t > 0)$.

– $U_l^{(t-1,t)}$ یک است، اگر گره هاب غیرمرکزی هوایی در زمان $t \in T$ فعال باشد
 و $(p_l^t = 0)$ و صفر است، اگر گره هاب در زمان $(t-1) \in T$ غیرفعال باشد $(p_l^t > 0)$.

– $V_{kl}^{(t-1,t)}$ یک است، اگر مسیر هابی $(k-l)$ در زمان $t \in T$ فعال باشد $(p_{kl}^t = 0)$
 و صفر است، اگر گره هاب در زمان $(t-1) \in T$ غیرفعال باشد $(p_{kl}^t > 0)$.

$$U_k^{(t-1,t)} - X_{kk}^g \leq 0 \quad \forall k \in H, g \in M, t \in T \quad (37)$$

$$U_l^{(t-1,t)} - X_{ll}^m \leq 0 \quad \forall k \in H, m \in M, t \in T \quad (38)$$

$$V_{kl}^{(t-1,t)} - Z_{kl}^g \leq 0 \quad \forall k \in H, m \in M, t \in T \quad (39)$$

محدودیت‌های 37-39 نشان می‌دهد که تا زمانی که گره (مسیر) به‌عنوان هاب (مسیر هابی) احداث نشده باشد، نمی‌تواند مختل شود.

هزینه غیرفعال‌سازی (تعمیر-نگهداری)

هزینه نگهداری گره هاب غیرمرکزی زمینی، هوایی و مسیر هابی $(k-l)$ در بازه اختلال $t \in T$ برای نوع حمل و نقل $m \in M$ به ترتیب MC_k^{mt} ، MC_l^{mt} و RM_{kl}^{mt} است. همچنین هزینه تعمیر گره هاب غیرمرکزی زمینی، هوایی و مسیر هابی $(k-l)$ برای نوع حمل و نقل $m \in M$ در بازه اختلال $t \in T$ به ترتیب به‌صورت RC_k^{mt} ، RC_l^{mt} و RRC_{kl}^{mt} تعریف شده است؛ لذا هزینه غیرفعال‌سازی به‌صورت روابط (40-41) است:

هزینه غیرفعال‌سازی (هزینه نگهداری)

$$\begin{cases} M_k^{gt} = \sum_{t'=t}^{t+1} MC_k^{gt'} & g \in M \text{ نوع حمل و نقل } k \text{ غیرمرکزی هاب نگهداری} \\ M_l^{mt} = \sum_{t'=t}^{t+1} MC_l^{mt'} & m \in M \text{ نوع حمل و نقل } l \text{ غیرمرکزی هاب نگهداری} \\ M_{kl}^{gt} = \sum_{t'=t}^{t+1} RM_{kl}^{gt'} & g \in M \text{ نوع حمل و نقل } k-l \text{ مسیر نگهداری} \end{cases} \quad (40)$$

هزینه غیرفعال‌سازی (هزینه تعمیر)

$$(41) \begin{cases} R_k^{gt} = \sum_{t'=t}^{t+1} RC_k^{gt'} & g \in M \text{ نوع حمل و نقل } k \text{ غیرمرکزی هاب} \\ R_l^{mt} = \sum_{t'=t}^{t+1} RC_l^{mt'} & m \in M \text{ نوع حمل و نقل } l \text{ غیرمرکزی هاب} \\ R_{kl}^{gt} = \sum_{t'=t}^{t+1} RRC_{kl}^{gt'} & g \in M \text{ نوع حمل و نقل } k-l \text{ مسیر} \end{cases}$$

هزینه فعال‌سازی (راه‌اندازی)

هزینه فعال‌سازی گره هاب غیرمرکزی زمینی، هوایی و مسیر هابی $(k-l)$ در بازه بعد از رفع اختلال $t \in T$ برای نوع حمل و نقل $m \in M$ به ترتیب SC_l^{mt} ، SC_k^{mt} و RSC_{kl}^{mt} است؛ لذا هزینه غیرفعال‌سازی به صورت رابطه (42) است:

هزینه فعال‌سازی مجدد (هزینه راه‌اندازی)

$$(42) \begin{cases} S_k^{gt} = \sum_{t'=t}^{t+1} SC_k^{gt'} & g \in M \text{ نوع حمل و نقل } k \text{ غیرمرکزی هاب} \\ S_l^{mt} = \sum_{t'=t}^{t+1} SC_l^{mt'} & m \in M \text{ نوع حمل و نقل } l \text{ غیرمرکزی هاب} \\ S_{kl}^{gt} = \sum_{t'=t}^{t+1} RSC_{kl}^{gt'} & g \in M \text{ نوع حمل و نقل } k-l \text{ مسیر} \end{cases}$$

تابع هدف با وجود اختلال

با وجود اختلال در شبکه، هزینه کل سیستم $(TotC_{s2})$ ، هزینه نگهداری (MC) و هزینه تعمیر (RC) مسیر و گره‌های دچار اختلال (غیرفعال‌سازی) و هزینه راه‌اندازی مجدد یا فعال‌سازی (SC) به سیستم تحمیل می‌شود. اجزای هزینه‌های غیرفعال‌سازی و فعال‌سازی مجدد در مدل سلسه‌مراتبی سناریو 2 به صورت روابط (43-45) است:

$$MC = \sum_{t \in T} \left(\sum_{g \in M} \sum_{k \in H} M_k^{gt} U_k^{(t-1,t)} + \right)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{l \in H} M_l^{mt} U_l^{(t-1,t)} + \sum_{g \in M} \sum_{k \in H} \sum_{l \in H} M_{kl}^{gt} V_{kl}^{(t-1,t)} \quad (43)$$

$$RC = \sum_{t \in T} \left(\sum_{g \in M} \sum_{k \in H} R_k^{gt} \left(1 - U_k^{(t-1,t)} \right) + \sum_{m \in M} \sum_{l \in H} R_l^{mt} \left(1 - U_l^{(t-1,t)} \right) + \sum_{g \in M} \sum_{k \in H} \sum_{l \in H} R_{kl}^{gt} \left(1 - V_{kl}^{(t-1,t)} \right) \right) \quad (44)$$

$$SC = \sum_{t \in T} \left(\sum_{g \in M} \sum_{k \in H} S_k^{gt} \left(1 - U_k^{(t-1,t)} \right) + \sum_{m \in M} \sum_{l \in H} S_l^{mt} \left(1 - U_l^{(t-1,t)} \right) + \sum_{g \in M} \sum_{k \in H} \sum_{l \in H} S_{kl}^{gt} \left(1 - V_{kl}^{(t-1,t)} \right) \right) \quad (45)$$

با استفاده از اجزای هزینه کل، مقدار تابع هدف در سناریوی دوم به صورت (46) خواهد بود:

$$TotC_{s2} = FCe + FCo + OC + TC + MC + RC + SC \quad (46)$$

در نتیجه، مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی با وجود چند نوع مختلف سیستم حمل‌ونقل با هدف حداقل نمودن هزینه کلی جابه‌جایی مسافران و با در نظر گرفتن اختلال، شامل هزینه احداث هاب‌ها و مسیرهای هابی و هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه نگهداری، تعمیر مسیر و گره‌های دچار اختلال (غیرفعال‌سازی) و هزینه راه‌اندازی مجدد (فعال‌سازی) خواهد بود:

$$\text{Minimize} \quad TotC_{s2}$$

subject to:

$$(1-31), (45-37)$$

4- مطالعه موردی

در این پژوهش سعی شده است تا با به‌کارگیری مثال‌های متعدد، صحت و اعتبار مدل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گیرد. مسئله بر روی شبکه‌ای با 20 گره تقاضا در مثال‌های عددی متنوع بررسی شده است. داده‌های مسئله از سایت OR Library بر اساس پژوهش بیسلی [24]، و الزامات خدمات‌دهی (محدودیت ظرفیت) بر اساس تابع توزیع یکنواخت استخراج و تولید شده است (جدول 1). هزینه‌های نگهداری، تعمیر و راه‌اندازی بر اساس پژوهش گلاره [25] استخراج شده است. جهت درک بهتر از عملکرد هر دو سناریوی موجود از تحلیل حساسیت با تغییر هدفمند مؤلفه‌ها در مطالعه موردی استفاده شده است.

جدول 1 اطلاعات مسئله (مثال عددی)

$Cap_{\text{گره}}^{\text{max}} \times 10^5$			$Cap_{\text{گره}}^{\text{min}} \times 10^3$			α^m (m = g m = a)	P_3	P_2	P_1	مثال
u	l	k	u	l	k					
-u(330, 380)	-u(290, 310)	-u(300, 320)	-u(172, 173)	-u(164, 165)	-u(161, 162)	(0/2 0/3)	2	4	5	1
						(0/4 0/7)	2	4	5	2
						(0/2 0/3)	2	8	9	3
						(0/4 0/7)	2	8	9	4

5- نتایج محاسباتی

از داده‌های شبکه هوایی-زمینی (مطالعه موردی) جهت اعتبارسنجی مدل برای حل هر دو سناریو استفاده شده است. همچنین مدل پیشنهادی هر دو سناریو با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز نسخه 23/4/3 و حل‌کننده CPLEX در سیستمی 5 هسته‌ای با 4 گیگ حافظه جانبی و دارای سیستم‌عامل ویندوز 7 حل شده است. از نرم‌افزار متلب برای تولید 4 حالت سناریو 2، گره یا مسیر دچار اختلال و تعداد اختلال (شبیه‌سازی مونت‌کارلو) استفاده شده است.

5-1- بررسی مدل پیشنهادی در حالت سالم بودن شبکه سلسله‌مراتبی
جدول 3 نتایج حل سناریو 1 در حالت عدم وجود هرگونه اختلالی را نشان می‌دهد.

جدول 3 نتایج مثال‌های عددی در حالت سالم بودن شبکه سلسله‌مراتبی چندوجهی

زمان حل (ثانیه)	تابع هدف $10^{12} \times$	مکان‌هاب‌های غیرمرکزی		مثال
		هوایی l	زمینی k	
242/96	1/80976	5, 6, 11, 12	5, 6, 9, 15, 20	1
434/56	1/81089	5, 6, 8, 11	5, 6, 9, 15, 20	2
219/704	3/36288	2, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 18	1, 5, 6, 7, 9, 15, 17, 18, 20	3
570/858	3/36365	2, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 18	1, 5, 6, 7, 9, 15, 17, 19, 20	4

با توجه به نتایج حاصل از حل مدل در حالت عدم وجود اختلال در شبکه (جدول 3) و مقایسه زوج مثال‌های (2 و 1) و (4 و 3) می‌توان دریافت که افزایش ضریب تخفیف میان‌هاب‌های غیرمرکزی تأثیر مستقیم بر روی مکان‌هاب‌های زمینی و هوایی مذکور خواهد گذاشت و پراکندگی در شبکه را به دنبال خواهد داشت. با کاهش تخفیف در هزینه انتقال جریان (افزایش ضریب تخفیف)، هزینه کلی شبکه نیز افزایش خواهد یافت و گره‌هایی در این حالت انتخاب می‌شوند که هزینه واحد انتقال آن‌ها کمتر باشند. همچنین با افزایش تعداد گره‌هاب‌های غیرمرکزی، هزینه کلی شبکه به دلیل افزایش جابه‌جایی در شبکه افزایش خواهد یافت.

5-2- بررسی مدل پیشنهادی با وجود اختلال در شبکه سلسله‌مراتبی
در این قسمت نیاز است که ابتدا بررسی شود که از میان 4 حالت موجود در سناریو 2 کدام حالت به وقوع می‌پیوندد، کدام گره یا مسیر دچار اختلال شده و تعداد اختلال در هر یک از 4 حالت سناریو 2 چقدر است. احتمال اختلال گره‌هاب‌ها و مسیرهای موجود به میزان جریان انتقالی از آن‌ها بستگی دارد؛ یعنی هرچه گره یا مسیر کارکرد بیشتری در شبکه داشته باشد، زودتر و سریع‌تر دچار اختلال خواهد شد.

بنابراین، احتمال اختلال هر یک از گره‌ها و مسیرها با استفاده از کارکرد آن‌ها در حالت سالم بودن (بخش 4-1) به دست می‌آید.

لذا با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به تولید 4 حالت سناریو 2، گره یا مسیر دچار اختلال و تعداد اختلال در هر حالت خواهیم پرداخت و بدین طریق اثر اختلال در شبکه، تغییرات مکان‌یابی و تخصیص را مشاهده خواهیم نمود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و میانگین تعداد اجرای مثال‌های 1 تا 4 با وجود اختلال تا 25%، 50% و 75% در جدول 4 بررسی شده است:

جدول 4 نتایج مثال‌های عددی برای حالت اختلال در شبکه سلسله‌مراتبی چندوجهی

میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین تابع هدف $\times 10^{12}$	مثال	تعداد خرابی گره‌ها و مسیرهای هابی
504/755	1/81022	1	(0%-25%)
371/980	1/81100	2	
274/819	3/36523	3	
305/583	3/36520	4	
517/126	1/81031	1	(0%-50%)
679/334	1/81143	2	
287/667	3/36532	3	
270/625	3/36676	4	
704/698	1/81038	1	(0%-75%)
515/825	1/81150	2	
322/607	3/36603	3	
364/937	3/36692	4	

همان‌طور که در جدول 4 براساس میانگین حاصل از تعداد دفعات شبیه‌سازی مونت‌کارلو مشاهده می‌شود، وجود اختلال سبب افزایش هزینه‌های کلی شبکه خواهد شد. با افزایش اختلال (گره‌هاب‌ها و مسیرهای هابی)، هزینه فعال‌سازی و غیرفعال‌سازی افزایش یافته و به دنبال آن هزینه کلی شبکه نیز روندی صعودی خواهد داشت.

با افزایش حد بالای بازه اختلال برای هر یک از مثال‌های 1، 2، 3 و 4، مقایسه بین دو بازه اختلال (0%-25%) و (0%-50%) می‌توان دریافت که هزینه کلی شبکه در بازه‌ی 0/003 تا 0/05 درصد؛ مقایسه دو بازه اختلال (0%-50%) و (0%-75%) در بازه‌ی 0/004 تا 0/02 درصد و همچنین مقایسه دو بازه اختلال (0%-25%) و (0%-75%) در بازه‌ی 0/009 تا 0/05 درصد افزایش داشته است.

با در نظر گرفتن بازه اختلال (0%-25%)، (0%-50%) و (0%-75%) در مثال 1، هزینه کلی شبکه حدود 0/025، 0/03، 0/034 درصد، در مثال 2 حدود 0/006، 0/03، 0/034 درصد، در مثال 3 حدود 0/07، 0/073، 0/094 درصد و همچنین در مثال 4، حدود 0/046، 0/092، 0/097 درصد نسبت به حالت عدم وجود اختلال افزایش خواهد یافت.

مقایسه زوج مثال‌های (3 و 1) و (4 و 2) بر اساس سه بازه اختلال تا 25%، 50% و 75% نشان می‌دهد با دو برابر نمودن تعداد گره‌هاب‌های غیرمرکزی، هزینه کلی شبکه مثال 3 نسبت به مثال 1 و همچنین مثال 4 نسبت به مثال 2 در حدود 86% افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه زوج مثال‌های (2 و 1) و (4 و 3) برای هر یک از سه بازه اختلال تا 25%، 50% و 75% می‌توان دریافت که هزینه کلی شبکه در بازه‌ای بین 0/03 تا 0/06 درصد افزایش خواهد داشت.

نتایج حاصل از تعداد دفعات شبیه‌سازی نشان‌دهنده تغییرات تخصیص و جایگزینی گره‌های هاب خواهد بود. سه دسته کلی جایگزینی‌ها و تغییرات تخصیص عبارت‌اند از:

- جایگزینی گره‌هاب‌های غیرمرکزی برای بازه اختلال (0%-25%)

○ شبکه هوایی

در مثال 1، هاب 8 حدود 56% و 44% جایگزین هاب‌های 12 و 11، در مثال 2 هاب‌های 11 و 8 حدود 67% و 33% جایگزین هاب 12، در مثال 3 هاب‌های 1 و 20 حدود 60% و 40% جایگزین هاب‌های 13 و 18 و در مثال 4، هاب‌های 1 و 20 حدود 86% و 14% جایگزین هاب‌های 18 و 13 هستند.

○ شبکه زمینی

در مثال 1، هاب‌های 1 و 7 حدود {22%، 44%} و 33% جایگزین هاب‌های {9، 15} و 9، در مثال 2 هاب‌های 7 و 9 حدود {50%، 13%} و 38% جایگزین هاب‌های {15، 9} و 19، در مثال 3 هاب 4 حدود 67% و 33% جایگزین هاب‌های 5 و 20، و در مثال 4، هاب‌های 4 و 18 حدود {50%، 17%، 17%} و 17% جایگزین هاب‌های {1، 20، 5} و 19 هستند.

- جایگزینی گره هاب‌های غیرمرکزی برای بازه اختلال (0%-50%)

○ شبکه هوایی

در مثال 1، هاب 8 حدود 60% و 40% جایگزین هاب‌های 12 و 11، در مثال 2 هاب‌های {12، 19} و {8، 11} حدود 30% و {30%، 10%} جایگزین هاب‌های 11 و 12، در مثال 3 هاب‌های 1، 20 و 17 حدود 56%، 44% و 11% جایگزین هاب‌های 18، 2 و 13، و در مثال 4، هاب‌های 1، 20 و 17 هرکدام حدود 33% جایگزین هاب‌های 2، 18 و 13 هستند.

○ شبکه زمینی

در مثال 1، هاب‌های 1 و 7 حدود 64% و 36% جایگزین هاب‌های 9 و 15، در مثال 2 هاب‌های 7 و 19 حدود {33%، 22%، 11%} و 33% جایگزین هاب‌های {9، 15، 19} و {15، 9}، مثال 3 هاب 4 حدود 67% و 33% جایگزین هاب‌های 5 و 20 و در مثال 4، هاب‌های 4، 10 و 19 حدود {40%، 20%}، 10% و 10% جایگزین هاب‌های {5، 18}، {7، 1} و {17، 20} هستند.

- جایگزینی گره هاب‌های غیرمرکزی برای بازه اختلال (0%-75%)

○ شبکه هوایی

در مثال 1، هاب‌های 8، 13 و 18 حدود {33%، 29%}، 10% و 10% جایگزین هاب‌های 11 و 12، در مثال 2 هاب‌های 12 و 19 حدود {29%، 29%، 6%} و 18% جایگزین هاب‌های {11، 8، 18} و {11، 8}، در مثال 3 هاب‌های 1 و 20 حدود 80% و 20% جایگزین هاب‌های 18 و 13 و در مثال 4، هاب‌های 1 و 20 حدود 60% و 40% جایگزین هاب‌های 13 و 18 هستند.

○ شبکه زمینی

در مثال 1، هاب‌های 1، 17 و 7 حدود {31%، 13%، 6%} جایگزین هاب‌های {15، 9}، در مثال 2 هاب‌های 7 و 19 حدود 50% و {36%، 14%} جایگزین هاب‌های 9 و {15، 9}، در مثال 3 هاب‌های {19، 4} و 10 حدود 45% و 9% جایگزین هاب‌های {20، 5} و 1 و در مثال 4، هاب‌های {18، 4}، 1 و {3، 12، 4} حدود 29%، 21%، و 7% جایگزین هاب‌های {20، 5}، 10 و {17، 19، 17} هستند.

6- جمع‌بندی و پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی

در این مقاله، یک مدل جدید مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی برای یک شبکه حمل‌ونقل چندوجهی با توجه به اثر اختلال در گره هاب‌ها و مسیرهای هابی در سیستم و الزامات خدمات‌دهی (ظرفیت اقتصادی) ارائه شده است. هدف اصلی ارائه مدلی پایدار در مقابله با بحث اختلال (غیرعامدانه و عامدانه) و بررسی اثرات این اختلال بر روی مکان‌یابی، تخصیص، نحوه مقابله شبکه با اختلال به وجود آمده و تغییرات هزینه در شبکه است. همچنین برای ایجاد سناریوهای اختلال، تعداد اختلال، انتخاب گره یا مسیر دچار اختلال از شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. صحت مدل پیشنهادی نیز در مثال‌های متعدد برای هر دو حالت عدم وجود اختلال و وجود اختلال ارائه و با یکدیگر مقایسه شد.

به‌منظور تسهیل در ارائه پژوهش‌های آتی، پیشنهادهایی در این زمینه ارائه

می‌شود:

- بررسی روش‌های حل مختلف و توسعه روشی جهت حل مسئله در ابعاد بزرگ (استفاده از روش‌های فرا ابتکاری):
- در نظرگرفتن بحث عدم قطعیت در مؤلفه‌های ورودی مسئله و توسعه و حل مدل در حالت عدم قطعیت جهت نزدیک‌تر شدن به آنچه در واقعیت دنیای کنونی وجود دارد؛
- در نظرگرفتن محدودیت زمان خدمت‌دهی در مفروضات مسئله؛ در مدل پیشنهادی، جهت ساده‌سازی، محدودیت زمان جهت خدمت‌دهی در نظر گرفته نشده است.

7- منابع

- [1] R. Z. Farahani, M. Hekmatfar, A. Boloori Arabani, and E. Nikbakhsh, "Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 64, no. 4, pp. 1096–1109, April 2013.
- [2] R. Z. Farahani, M. Hekmatfar, B. Fahimnia and N. Kazemzadeh, "Hierarchical Facility Location Problem: Models, Classifications, Techniques, and Applications," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 68, pp. 104–117, February 2014.
- [3] S. S. Torkestani, S. M. Seyedhosseini, A. Makui, A., and K. Shahanaghi, "Hierarchical Facility Location and Hub Network Problems: A literature review," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 9, pp. 1–22, 2016.
- [4] A. Azar, M. Rabiyeey, M. Modares Yazdi, and M. Fetanat Fard Haghighi, "The Fuzzy–Robust Multiple Objectives Mathematical Model for Sourcing: The Approach for Risk Management in the Supply Chain of Iran Khodro," *Management Researches in Iran*, vol. 15, no. 1, pp. 51–76, 2011.
- [5] M. Akbari, "A model for production and inventory control in crisis condition," *Management Researches in Iran*, vol. 19, no. 4, pp. 45–70, 2016.

- [6] G. P. Schultz, "The Logic of Health Care Facility Planning," *Socio-Economic Planning Science*, vol. 4, no. 3, pp. 383–393, September 1970.
- [7] A. B. Calvo and D. H. Marks, "Location of Health Care Facilities: An Analytical Approach," *Socio-Economic Planning Science*, vol. 7, no. 5, pp. 407–422, October 1973.
- [8] H. Yaman, "The Hierarchical Hub Median Problem with Single Assignment," *Transportation Research Part B*, vol. 43, no. 6, pp. 643–658, July 2009.
- [9] S. A. Alumur, B. Y. Kara, and O. E. Karasan, "Multimodal hub location and hub network design," *OMEGA*, vol. 40, no. 6, pp. 927–939, December 2012a.
- [10] S. A. Alumur, H. Yaman and B. Y. Kara, "Hierarchical Multimodal Hub Location Problem with Time-Definite Deliveries," *Transportation Research Part E*, vol. 48, no. 6, pp. 1107–1120, November 2012b.
- [11] A. H. Safargholi and J. Behnamian, "Locating hierarchical hub in multi-modal network with taking into account the requirements of service," *Modern Researches in Decision Making*, vol. 1, no. 4, pp. 101–115, 2017.
- [12] L. V. Snyder, and M. S. Daskin, "Reliability models for facility location: The expected failure cost case," *Transportation Science*, vol. 39, no. 3, pp. 400–416, August 2005.
- [13] O. Berman, T. Drezner, Z. Drezner, and G. O. Wesolowsky, "A defensive maximal covering problem on a network," *ITOR*, vol. 16, no. 1, pp. 69–86, January 2009.
- [14] T. Cui, Y. Ouyang, and Z. J. Shen, "Reliable facility location design under the risk of disruptions," *Operations Research*, vol. 58, no. 4, pp. 998–1011, April 2010.
- [15] P. Peng, L. V. Snyder, A. Lim, and Z. Liu, "Reliable logistics networks design with facility disruptions," *Transportation Research B*, vol. 45, no. 8, pp. 1190–1211, September 2011.
- [16] F. Liberatore, M. P. Scaparra, and M. S. Daskin, "Analysis of facility protection strategies against an uncertain number of attacks: The stochastic R–

- interdiction median problem with fortification," *Computers and Operations Research*, vol. 38, no. 1, pp. 357–366, January 2011.
- [17] A. Jabbarzadeh, S. G. Jalali Naini, H. Davoudpour, and N. Azad, "Designing a supply Chain network under the risk of disruptions," *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1–23. doi.org: 10.1155/2012/234324.
- [18] N. Azad, G. K. D. Saharidis, H. Davoudpour, H. Malekly, and S. A. Yektamaram, "Strategies for protecting supply chain networks against facility and transportation disruptions: An improved Benders decomposition approach," *Annals of operations research*, vol. 210, no. 1, pp. 125–163, November 2013.
- [19] F. Parvaresh, S. M. Moattar Hussein, S. A. Hashemi Golpayegany, and B. Karimi, "Hub network design problem in the presence of disruptions," *J Intell Manuf*, vol. 27, no. 4, pp. 755–774, August 2014.
- [20] N. Azizi, S. Chauhan, S. Salhi, and N. Vidyarthi, "The impact of hub failure in hub-and-spoke networks: Mathematical formulations and solution techniques," *Computers & Operations Research*, vol. 65, pp.174–188, January 2016.
- [21] M. Mohammadi, R. Tavakkoli–Moghaddam, A. Siadat, J. Y. Dantan, "Design of a reliable logistics network with hub disruptions under uncertainty," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 40, no. 9–10, pp. 5621–5642, May 2016.
- [22] M. Yahyaei, and M. Bashiri, "Scenario–based modeling for multiple allocation hub location problem under disruption risk: multiple cuts Benders decomposition approach," *J Ind Eng Int*, vol. 13, no. 4, pp. 445–453, December 2017.
- [23] M. Zhalechian, S. A. Torabi, and M. Mohammadi, "Hub and spoke network design under operational and disruption Risks," *Transportation Research Part E*, vol. 109, pp. 20–43, January 2018.
- [24] J. E. Beasley, "OR–Library: distributing test problems by electronic mail," June 1990. [Online]. Available: <http://people.brunel.ac.uk/~mastjib/jeb/info.html>.

- [25] Sh. Gelareh, R. Neamatian Monemi and S. Nickel, "Multi-Period hub location problems in transportation," *Transportation Research Part E*, vol. 75, pp. 67–94, March 2015.