مجله نخبگان علوم و مهندسی
Journal of Science and Engineering Elites
جلد ۸- شماره ۶ - سال ۱۴۰۲

طراحی مدل ریاضی مسئله مکانیابی استراتژیک و تخصیص شبکه هاب با رویکرد اقتصاد مقاومتی با در نظرگرفتن قابلیت اطمینان پیشگیرانه

یوسف آقائی پور[۱*]، داریوش شفیع زاده[۲]، حمیدرضا حسن پور[۳]، ابوالفضل قهرمانی[۴]

۱- دکترای مهندسی صنایع، کارشناس حوزه صنایع خودروسازی، مدرس دانشگاه و شرکت ایران خودرو، کنشگر حوزه خودروسازی سبز
۲-کارشناس ارشد MBA، کارشناس حوزه صنایع خودروسازی، کنشگر حوزه خودروسازی سبز
۳-کارشناس مهندسی فناوری کنترل و ابزار دقیق، کارشناس حوزه صنایع خودروسازی، کنشگر حوزه خودروسازی
۴-کارشناس مهندسی مکانیک، کارشناس حوزه صنایع خودروسازی، کنشگر حوزه خودروسازی سبز

*yousef.a1359@yahoo.com

ارسال: دی ماه ۱۴۰۲ پذیرش: بهمن ماه ۱۴۰۲

چکیده

مدیران راهبردی که تفکر استراتژیک دارند مکان یابی تسهیلات هاب را که ساختار آنها مبتنی بر افزایش جریان وکاهش هزینه از دست رفته است دارند امری مهم در تصمیمات راهبردی سازمان می دانند. زیرا حل این مسائل کاربردهای گسترده ایی در سیستمهای خدمت رسانی همچون توزیع، حمل و نقل، دفع زباله، خدمات درمانی، خدمات اضطراری و ارتباطات راه دور دارد. از این رو چالش می شود، تا مکان تسهیلات ارائه دهنده خدمت طوری تعیین گردند که در راستای کاهش هزینه ها و ایجاد شرایط مناسب در شبکه خدمت دهی گام برداشته شود، زیرا هزینه های درگیر با آن بسیار گسترده و متنوع بوده و تصمیم گیری های مدیران را دست خوش تغییرات فراوانی می نماید. بنابراین با مطالعه در این بخش دیده شد که کارهای گذشته تنها توجه به یک هدف داشته اند اما تحقیق حاضر یک مسئله جدید در حوزه مکانیابی هاب با رویکرد قابلیت اطمینان پیشگیرانه برای انتقال جریان قبل از خرابی هاب ها معرفی میکند که جریان با قابلیت اطمینان بالایی ارسال شود. همچنین از هاب پشتیبان برای عبور صحیح جریان برای بعد از خرابی هاب ها استفاده میشود تا از هدر رفتن جریان ناشی از خرابی هاب ها جلوگیری کنند. طراحی یک مدل ریاضی برای شبکه حمل و نقل کشور که از هدر رفتن جریان جلوگیری کند امری حیاتی است. به همین منظور یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط چند هدفه برای این مسئله پیشنهاد شده است و برای حل آن نیز از روش مجموع وزنی استفاده می شود.

واژگانکلیدی: مکانیابی هاب، قابلیت اطمینان، هاب پشتیبان، خرابی هاب، اقتصاد مقاومتی.

۱- مقدمه

اقتصاد مقاومتی به معنی تشخیص حوزه های فشار و متعاقباً چالش برای کنترل و بی اثر کردن آن ها تاثیرگذار می باشد و در شرایط آرمانی تبدیل چنین فشارهایی به فرصت است همچنین برای رسیدن به اقتصاد مقاومتی، باید وابستگی های خارجی کاهش یابد و بر تولید داخلی کشور و چالش برای خوداتکایی تأکید گردد. به همین منظور مسئله مکانیابی هاب چون یک تصمیم استراتژیک می

باشد می توانیم از جنبه اقتصاد مقاومتی به آن نگاه کنیم. زیرا خرابی هاب میتواند هزینه های زیادی را به سیستم حمل و نقل وارد کند. یکی از موضوعات جدید در حوزه مسائل مکانیابی، مسئله مکانیابی هاب است. هاب یک واژه عمومی است که به یک مکان یا یک نقطه اشاره دارد؛ محلی که کالا یا اطلاعات فراهم شده از چندین منبع در آنجا جمع شده و سپس به سوی دیگر هاب های شبکه یا مقصد نهایی انتقال داده میشود. مسائل مکانیابی هاب به تعیین محل هاب ها و تخصیص گرههای شبکه به این هاب ها می پردازد به نحویکه مجموع هزینه های مستقر ساختن هاب ها و هزینه های حمل و نقل کمینه شود. در مبحث مکانیابی هاب، خدمتی که انجام میگیرد شامل حرکت افراد، کالاها یا اطلاعات، بین یک مکان مبدأ و یک مکان مقصد است. استفاده از این تسهیلات درنهایت باعث سازماندهی بهینه حرکتها و جلوگیری از ترددهای اضافی میگردد که این امر فوایدی همچون کاهش مصرف سوخت، کاهش آلودگی هوا، کاهش استهلاک و افزایش عمر شبکه راهها و غیره را در پی خواهد داشت. تصمیم گیری در مورد مکانیابی تسهیلات عمدتاً از تصمیم گیری های بلندمدت و استراتژیک شرکتهای بزرگ خصوصی و دولتی است و هزینه های بالای آن، موجب شده قابلیت اطمینان سیستم در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. در مکانیابی تسهیلات، قابلیت اطمینان، امر مهمی است که در هنگام اخذ تصمیمات استراتژیک میبایست آن را مدنظر قرارداد تا در هنگام عدم کارکرد یا خرابی یکی از اجزاء، سیستم با کمترین زیانی به کارکرد خود ادامه دهد.

مسائل مکانیابی هاب به دنبال یافتن مکانی برای تسهیلات هاب است که کمترین هزینه را برای سیستم درگیر در پی داشته باشد. همچنین با توجه به دارا بودن گزینه تخصیص مسیر ارتباطی، هاب ها با حذف مسیرهای غیرضروری تلاش میکنند تا هزینه مسیریابی کل شبکه ارتباطی را به حداقل رسانند؛ اما از سوی دیگر در بسیاری از موارد این تسهیلات دچار اختلال میگردند و سیستم خدمت دهی مختل میگردد. این اختلالها دو ریشه اساسی دارند: ۱) مختل شدن تسهیل ارائه دهنده خدمت ۲) خارج از سرویس شدن مسیر ارتباطی موجود میباشد. بنابراین علاوه بر اینکه طراحی خود شبکه هاب از اهمیت بالایی برخوردار است، طراحی یک شبکه هاب باقابلیت اطمینان بالا نیز از اهمیت زیادی برخوردار است.به همین منظور، در این تحقیق قصد داریم یک مدل ریاضی با رویکرد قابلیت اطمینان پیشگیرانه قبل و بعد از وقوع خرابی برای مسئله p هاب میانه ارائه دهیم. به عبارت دیگر با طراحی این مدل قصد داریم قابلیت اطمینان شبکه هاب را در حالت پایدار نگهداریم و تا حد بالایی از هدر رفتن جریان در شبکه طراحی شده جلوگیری کنیم.

۲- ادبیات موضوع

مسئله مکانیابی هاب دارای قدمت کوتاهی است، در ابتدا، حکیمی(۱۹۶۴) [۱] اولین مقاله در زمینه ناحیه بهینه سازی گره منتشرکرد که بعدها مسبب مفهومی مشابه در مسائل مکانیابی هاب شد. توه و هیگینز(۱۹۸۵) [۲] کاربرد شبکه های مکانیابی هاب را برای حمل و نقل و صنعت هوایی مطرح کردند و این تحقیق به عنوان اولین پژوهش در زمینه مکانیابی هاب مطرح است. اولین مقاله که در آن مدل ریاضی و روش حل ارائه شده است با تلاش اوکلی(۱۹۸۶) [۳] انجام شد. در ادامه اوکلی(۱۹۸۷) [۴] اولین مدل درجه دوم مسئله تسهیلات هاب با شرط ارتباط تخصیص مراکز تقاضا به یک مرکز هاب را مطرح کرد، تابع هدف این مدل، کمینه کردن هزینه کل حمل و نقل جریانهای ارتباطی بود. وی به منظور کاهش هزینه های ارتباطی بین مراکز هاب، عامل تخفیفی که عددی بین صفر و ۱ است مطرح کرد. بعد ازآن تعداد مقالات در این زمینه با یک روند افزایشی روبرو شد. تمرکز این مقالات تا دهه ۱۹۸۰ بر روی مدلسازی بود، در دهه ۱۹۹۰ این تمرکز بیشتر بر روی ایجاد مدل و بهینه سازی بود و سرانجام در سالهای اخیر بر روی مدلهای پیشرفته و روشهای حل جدید کوشش شده است. کمپبل(۱۹۹۴) [۵] فرمول بندی ریاضی چندگانه را ارائه داد و در سال ۱۹۹۶ کمپبل(۱۹۹۶) [۶] بررسی بر روی شبکه های هاب p میانه که در آن هاب ها نقش نقاط انتقال را دارند انجام داد. کلینسیوکز(۱۹۹۸) [۷] به بررسی کاربرد مکانیابی هاب در زمینه ارتباطات پرداخت که شامل طراحی شبکه و مکانیابی گره های هاب بود. برایان و اوکلی(۱۹۹۹) [۸] کاربردهای مکانیابی هاب در ارتباطات، صنایع و حمل و نقل هوایی را بررسی کردند. آلومور و کارا(۲۰۰۸) [۶] مقاله های منتشرشده تا سال ۲۰۰۷ را بررسی و طبقه بندی کردند. تحقیقات در زمینه مکانیابی تسهیلات نامطمئن ابتدا توسط

درنژر(۱۹۸۷) [۱۰] با معرفی کردن احتمال خرابی یکسان در یک مسئله p میانه شروع شد. برمن(۲۰۱۱) [۱۱] مکانیابی تسهیلات نامطمئن وقتی که قابلیت اطمینان با افزایش فاصله کاهش می یابد مطالعه کرد. اسنایدر و داسکین(۲۰۰۵) [۱۲] چندین مدل قابلیت اطمینان را بر اساس سطح تخصیص جاییکه تسهیلات به صورت تصادفی احتمال خرابی یکسان دارند مطالعه کردند. همچنین یک مدل قابلیت اطمینان با خرابی متفاوت و تسهیلات متفاوت توسط برمن و همکاران(۲۰۰۷) [۱۳] مطالعه شد. برمن و همکاران (۲۰۱۱) [۱۴] مسئله مکانیابی تسهیلات نامطمئن را با فرض اینکه مشتریان هیچ اطلاعی از شرایط عملیات تسهیلات ندارند انجام دادند. همچنین در پژوهشی دیگر برمن و همکاران (۲۰۰۹) [۱۵] این مسئله را برای پیدا کردن مسیر بهینه با هدف حداقل کردن زمان سفر انجام دادند. آنالیز مسئله قابلیت اطمینان تسهیلات با توجه به مستقل بودن مکان خرابی ها توسط چوی و همکاران(۲۰۱۰) [۱۶] انجام شد. مسئله قابلیت اطمینان تسهیلات نیز توسط لیم و همکاران(۲۰۱۰) [۱۷] انجام شد. آنها دو نوع تسهیل مطمئن و نامطمئن را در کار خود لحاظ کردند. اکلی و همکاران (۲۰۰۹) [۱۸] اولین بار مسئله قابلیت اطمینان در شبکه های ارتباطی را مطرح کردند و قابلیت اطمینان مسیرها را به صورت سری محاسبه نمودند. یوآن و همکاران(۲۰۱۵) [۱۹] مدل اکلی رو توسعه دادند و دو روش حل ریاضی تجزیه بندرز و آزادسازی الگرانژ را برای حل مدل ارائه کردند. پرورش و همکاران دو مدل محافظتی برای بالا بردن قابلیت اطمینان سیستم در حین خرابی ارائه کردند. حمیدی و همکاران(۲۰۱۴) [۲۱] رویکرد قابلیت اطمینان پیشگیرانه با استفاده از هاب های مجازی را مطرح نمودند. عزیزی و همکاران(۲۰۱۴) [۲۲] از رویکرد هاب پشتیبان برای حداقل کردن هزینه ها استفاده کردند. هدف آنها این بود با در نظر گرفتن هاب پشتیبان هزینه های ناشی از جریان از دست رفته را حداقل کنند. آنها در تحقیق خود برای هرهاب که از دسترس خارج میشود یک هاب پشتیبان در نظرگرفتند تا دیگر از هزینه های اضافی ناشی از از دست رفتن جریان جلوگیری کنند. همانطور که در قسمت مرور ادبیات قابلیت اطمینان در مسائل مکانیابی هاب مشاهده می شود بیشتر مطالعات انجام شده بر روی کمینه کردن هزینه های حمل و نقل با توجه به قابلیت اطمینان مسیرهای ارتباطی بود. مطالعات اندکی در زمینه قابلیت اطمینان پیشگیرانه انجام شده است که این حوزه با توجه به اهمیت فراوان جای تحقیقات گسترده تری دارد. نوآوری این تحقیق، ارائه مدلی تعمیم یافته و جدید، با الهام گرفتن از کارهای انجام شده برای مسائل هاب است و فرمول بندی های جدید ارائه شده برای حالت پرکاربرد و واقعی سیستمهای ارائه دهنده خدمت با در نظر گرفتن شرایط قابلیت اطمینان مسیرهای ارتباطی بر اساس الگوی پایای و به کارگیری آن در مسائل هاب می باشد. در این تحقیق به دنبال این هستیم که در یک فضای گسسته، با ایجاد و افزودن گزینه های قابلیت اطمینان و اصلاح مدلهای پیشین مسئله مکانیابی هاب گرههای غیر هاب را به گرههای هاب طوری تخصیص دهیم که با اختلال پاسخگویی مواجه نگردیده و نیز مجموع جریانهای تقاضا در حال خدمت دهی بیشینه گردد و همچنین از رویکرد هاب پشتیبان برای بعد از وقوع خرابی استفاده کنیم که روند انتقال جریان در شبکه مختل نشود.

۳- پارامترها

P : تعداد هاب هایی که باید مکان یابی شوند

W_{ij} : میزان جریان ارسالی بین گره مبدأ و مقصد را نشان می دهد.

R_{ikmj} : میزان قابلیت اطمینان جریان عبوری از گره مبدأ تا مقصد را نشان می دهد.

Q : احتمال خرابی هر هاب را نشان می دهد.

α : فاکتور تخفیف بین دو گره هاب را نشان می دهد.

در یک مسئله p - هاب میانه، هر گره به یک یا چند هاب مشخص اختصاص داده می شود و تمام جریان های ورودی و خروجی توسط آن هاب مسیریابی می شوند مسیر از مبدأ i به مقصد j شامل سه قسمت است: جمع آوری از گره مبدأ به سمت هاب k، انتقال توسط هاب اول k به سمت هاب دوم m، توزیع از هاب m به سمت مقصد j قابلیت اطمینان مسیر $i \rightarrow k \rightarrow j$ از رابطه $R_{rikj} = R_{ik} * R_{km}^{(1-a)} * R_{mj}$ محاسبه می شود که از مقاله اکلی و همکاران[۱۸] اقتباس شده است .

۴- متغیرهای تصمیم

Z_{ik} مقدار یک می گیرد اگر گره غیر هاب i به هاب k تخصیص داده شود در غیر این صورت مقدار صفر می گیرد.

X_{ikmj} مقدار یک می گیرد اگر ارتباط بین مبدأ i به مقصد j از طریق هاب های k,m برقرار شود در غیر این صورت مقدار صفر می گیرد.

U_{kl} مقدار یک می گیرد اگر هاب k به هاب پشتیبان l تخصیص داده شود در غیر این صورت مقدار صفر می گیرد.

در مدل پیشنهادی، متغیر TRW_k برای محاسبه جریان عبوری توسط هاب k مبتنی بر قابلیت اطمینان استفاده می شود و متغیر TRR_m میزان جریان عبوری توسط هاب(k,m) مبتنی بر قابلیت اطمینان را محاسبه می کند به شرح روابط(۱و۲) :

$$TRW_k = \sum_i \sum_m \sum_j R_{ikmj} X_{ikmj} W_{ij} \quad (۱)$$

$$TRR_m = \sum_i \sum_{k\neq m} \sum_j R_{ikmj} X_{ikmj} W_{ij} \quad (۲)$$

همچنین بر مبنای قابلیت اطمینان R_{ikmj} ، میزان کل جریان عبوری به صورت رابطه ۳ محاسبه می شود:

$$TTW = \sum_i \sum_k \sum_m \sum_j R_{ikmj} X_{ikmj} W_{ij} \quad (۳)$$

حال بعد از اینکه مقادیر جریان را در حالتی که شبکه در حالت عادی خود قرار داشت محاسبه کردیم؛ میخواهیم مقدار جریان را وقتی که شبکه دارای خرابی هاب است حداکثر کنیم. به همین منظور وقتی که هاب k خراب شود و هاب l پشتیبان باشد، میزان جریان عبوری بر مبنای قابلیت اطمینان، از رابطه ۴ به دست میآید:

$$TRWB_{kl} = \sum_{i\neq k} \sum_{m\neq k} \sum_{j\neq k} R_{ilmj} W_{ij} X_{ikmj} + \sum_{i\neq k} \sum_{j\neq k} R_{ilmj} W_{ij} X_{ikkm} \quad (۴)$$

رابطه (۴) مسیریابی دوباره را در دو حالت نشان می دهد: در قسمت اول زمانی که دو هاب در مسیر است و در قسمت دوم زمانی که فقط یک هاب در مسیر است، نشان می دهد. در رابطه(۵) میزان جریان عبوری با توجه به مسیریابی دوباره را وقتی که هاب دوم از کار می افتد نشان می دهد:

$$TRWB_{ml} = \sum_i \sum_{k\neq m} \sum_{j\neq m} R_{iklj} W_{ij} X_{ikmj} \quad (۵)$$

۴-۱- فرمول بندی ریاضی مسئله

در این مقاله از دو تابع هدف استفاده شده است که به صورت زیر معرفی می شوند:

$$\max obj_1 = \sum_i \sum_k \sum_m \sum_j R_{ikmj} X_{ikmj} W_{ij} \quad (۶)$$

$$\max obj2 = \sum_i ((\sum_k TRW_k Z_{11}) + (TRW_i + TRR_i))q_1 + \sum_k \sum_i TRW_{kl} U_{kl} q_k + \sum_m \sum_l TRW_{ml} U_{ml} q_m \quad (۷)$$

مطابق رابطه(۶) مقدار کل جریان با توجه به سالم بودن هاب ها و در نظر گرفتن قابلیت اطمینان حداکثر می شود.

مطابق رابطه(۷) در قسمت اول میزان جریان عبوری وقتیکه هاب خراب است با میزان جریان عبوری زمانی که هاب سالم است جمع می کند تا میزان جریان عبوری حداکثر شود. در قسمت دوم میزان جریان را وقتی که هاب K خراب است محاسبه می کند و در قسمت سوم میزان جریان عبوری را وقتی که هاب m خراب است محاسبه می کند. محدودیت های مدل نیز به شرح زیر است:

$$\sum_{k} Z_{kk} = P \tag{۸}$$

$$\sum_{k}\sum_{m} X_{ikmj} = 1 \quad \forall j > i \tag{۹}$$

$$\sum_{m} X_{ikmj} - Z_{k} \leq 0 \quad \forall j > i, k \tag{۱۰}$$

$$\sum_{k} X_{ikmj} - Z_{m} \leq 0 \quad \forall j > i, m \tag{۱۱}$$

$$\sum_{i \neq k} U_{kl} = Z_{kk} \quad \forall k \tag{۱۲}$$

$$U_{kl} \leq Z_{kk} \quad \forall k, \neq k \neq l \tag{۱۳}$$

$$TRW_{k} = \sum_{i}\sum_{m}\sum_{j} R_{ikmj} X_{ikmj} W_{ij} \quad \forall k \tag{۱۴}$$

$$TRR_{m} = \sum_{i}\sum_{k \neq m}\sum_{j} R_{ikmj} X_{ikmj} W_{ij} \quad \forall m \tag{۱۵}$$

$$TRWB_{kl} = \sum_{i \neq k}\sum_{m \neq k}\sum_{j \neq k} R_{ikmj} W_{ij} X_{ikmj} + \sum_{i \neq k}\sum_{j \neq k} R_{illj} W_{ij} X_{ikkj} \tag{۱۶}$$

$$TRWB_{ml} = \sum_{i}\sum_{k \neq m}\sum_{j \neq m} R_{iklj} W_{ij} X_{ikmj} \tag{۱۷}$$

$$X_{ikmjl}, Z_{ik}, U_{kl} \in [0, 1] \quad \forall i, k, m, l, j \tag{۱۸}$$

$$TRW_{k}, TRR_{m}, TRWB_{kl}, TRWB_{ml} \geq 0 \quad \forall k, m, l \tag{۱۹}$$

محدودیت شماره (۸) محدودیت تعداد هاب ها را مشخص می کند.

محدودیت شماره (۹) بیان می کند تمام جریان عبوری باید از طریق هاب k,m عبور کند.

محدودیت های شماره (۱۰) و (۱۱) الزام می کند کل جریان عبوری باید از طریق هاب عبور کند و از ارسال جریان به گره های غیر هاب جلوگیری می کند.

محدودیت (۱۲) بیان می کند گره از دسترس خارج شده گره هاب است و تنها یک هاب پشتیبان دارد.

محدودیت (۱۳) بیان می کند گره پشتیبان، گره هاب است و با هاب از دسترس خارج شده فرق دارد. معادلات ۱۴ تا ۱۷ نیز قبلاً توضیح داده شد.

محدودیت های (۱۸) و (۱۹) جنس متغیرهای مسئله را نشان می دهند.

۴-۱-۱- خطی سازی مدل

از آنجا که در تابع هدف، متغیرهای صفر و یک و متغیرهای پیوسته در یکدیگر ضرب شده اند به همین دلیل برای حل مسئله با روش برنامه ریزی خطی باید مسئله را به یک مدل خطی تبدیل کنیم. در مسئله مورد بررسی، متغیرهای صفر و یک u,z متغیرهای پیوست TRWk , TRWBkl ,TRWBml وجود دارند. بر همین اساس سه متغیر پیوسته θkl , γkl , βml به شرح روابط ۲۰ تا ۲۲ در نظر می گیریم :

$$\theta_{kl} = TRW_{k} Z_{ll} \tag{۲۰}$$

$$\gamma_{kl} = TRW_{kl} U_{kl} \tag{۲۱}$$

$$\beta_{ml} = TRWB_{ml}\, U_{ml} \tag{۲۲}$$

در ادامه با اضافه کردن محدودیتهای زیر مسئله را خطی می کنیم.

$$\theta_{kl} \le V_l\, Z_{ll} \quad \forall k,l \tag{۲۳}$$

$$\theta_{k,l} \le TRW_k \quad \forall k,l \tag{۲۴}$$

$$\theta_{k,l} \ge TRW_k - V_l\,(L - Z_{ll}) \quad \forall k,l \tag{۲۵}$$

$$\gamma_{kl} \le V_2\, Z_{kl} \quad \forall k,l \tag{۲۶}$$

$$\gamma_{kl} \le TRWB_{kl}\, U_{kl} \quad \forall k,l \tag{۲۷}$$

$$\gamma_{k,l} \ge TRWB_{kl} - V_2(I - U_{kl}) \quad \forall k,l \tag{۲۸}$$

$$\beta_{ml} \le V_3\, U_{ml} \quad \forall m,l \tag{۲۹}$$

$$\beta_{ml} \le TRWB_{ml}\, U_{ml} \quad \forall m,l \tag{۳۰}$$

$$\beta_{ml} \ge TRWB_{ml} - U_3\,(1 - U_{ml}) \quad \forall m,l \tag{۳۱}$$

$$\beta_{ml}, \gamma_{kl}, \theta_{kl} \ge 0\ T \quad \forall m,l,k \tag{۳۲}$$

بنابراین توابع هدف به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$obj_1 = \sum_l \sum_k \sum_m \sum_j R_{ikmj}\, X_{ikmj}\, W_{ij} \tag{۳۳}$$

$$\max obj_2 = \sum_l \Big(\Big(\sum_k \theta_{kl}\, Z_{ll}\Big) + (TRW_l + TRR_l)q_1 + \sum_k \sum_l \gamma_{kl}\, q_k + \sum_m \sum_l \beta_{ml}\, q_m \tag{۳۴}$$

درنهایت، بیشینه سازی مجموع وزنی دو تابع هدف درنظرگرفته می شود (رابطه ۳۵):

$$\max obj_3 = t * obj_1 + (1 - t) * obj_2 \tag{۳۵}$$

در معادله شماره (۳۵) مقدار t عددی یکنواخت بین [1 , 0] است.

۵- نتایج محاسباتی

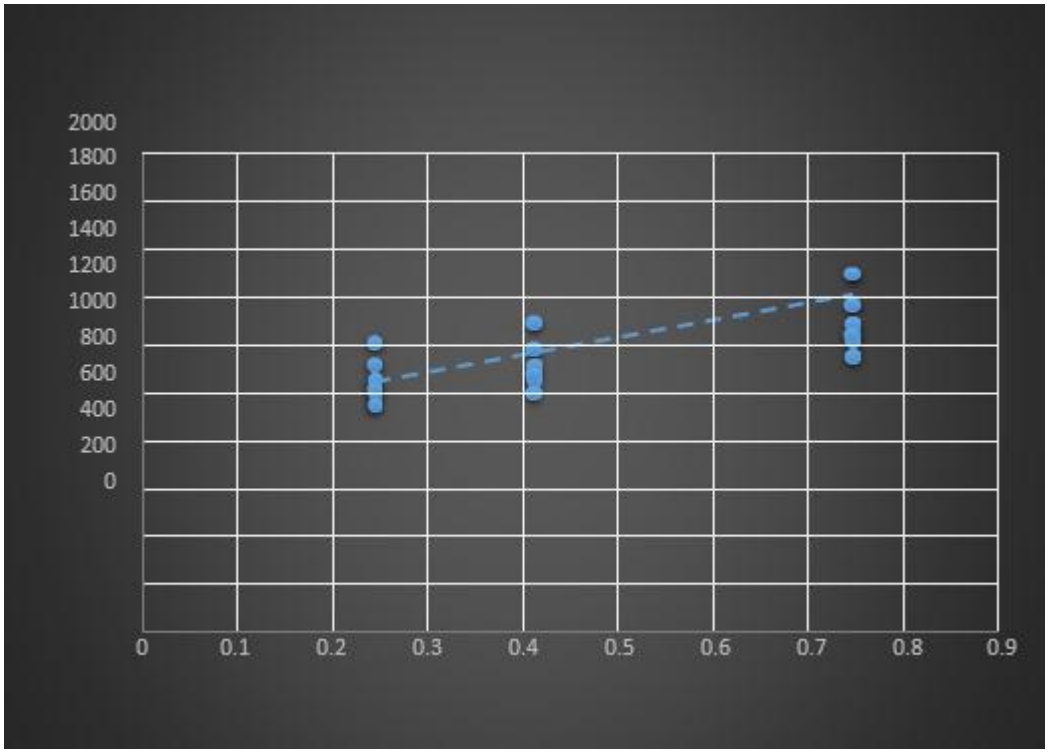
در این قسمت برای اعتبار سنجی مدل، از داده های CAB [۱۸] برای مسائل با ۱۰و۱۵و۲۵ گره استفاده نموده ایم. همچنین برای حل مدل از حل کننده CPLEX استفاده شده است. مدل این مسئله با نرم افزار GAMS کد گردیده و بر روی PC با مشخصات RAM16 گیگابایت پردازشگر هفت هسته ای اجراشده است. برای انجام محاسبات از چهار نوع ضریب تخفیف با مقادیر 0/2 0/8, 0/6, 0/4, استفاده شده ، همچنین تعداد هاب ها در مسئله را نیز 3,5 در نظر گرفته ایم و همچنین سه ضریب وزنی 0/5 0.7 0/3 , نیز برای روش مجموع وزنی درنظر گرفته شده است. احتمال خرابی هاب ها (q) نیز عددی یکنواخت بین [0/3 ، 0/1] است.

نتایج حل برای تعداد ۱۰ گره در جدول شماره (۱) آمده است. با توجه به مقادیر جدول (۱) به ازای هر هاب که از دسترس خارج می شود یک هاب پشتیبان وجود دارد و این هاب پشتیبان باعث میشود جریان بیشتری از شبکه نسبت به حالتی که هاب پشتیبان وجود ندارد عبور کند. همچنین با توجه به نمودار (۱) مشاهده میکنیم هرچه فاکتور تخفیف بیشتر میشود جریان بیشتری در شبکه ارسال میشود. دلیل این امر در این موضوع است که $Rikmj = Rik * Rkm^{(1-a)} * Rmj$ به توان (1-a) می رسد. بنابراین هر چقدر فاکتور تخفیف بیشتر باشد قابلیت اطمینان مسیر بالاتر می رود و درنتیجه میزان جریان بیشتری ارسال می شود.

نتایج محاسباتی ما نشان می دهد طراحی یک شبکه بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و هاب پشتیبان باعث از دست رفتن جریان در شبکه میشود. به طور مثال زمانی که هاب های شماره (2,3,8) در شبکه انتخاب می شوند هاب های شماره (3,2,3) نقش هاب های پشتیبان را اجرا می کنند و اگر بخواهیم میزان جریان ازدست رفته از این طریق را محاسبه کنیم کافی است میزان تابع هدف شماره (۲) در ردیف شماره یک جدول شماره (۱) را از مقدار تابع هدف اول کم کنیم تا میزان جریان ازدست رفته ای را زمانی که از هاب پشتیبان استفاده نمی کنیم به دست آوریم. در نمودار شماره (۲) به وضوح این تفاوت را مشاهده خواهیم کرد که تابع هدف شماره (۲) جریان بیشتری نسبت به تابع هدف شماره یک ارسال میکند. به همین منظور متوجه خواهیم شد تقریباً ٪۵۰ جریان ما در طی از دسترس خارج شدن هاب ها از بین می رود بنابراین مدل ریاضی پیشنهادی بخوبی قادر خواهد بود از حداکثر ظرفیت شبکه برای انتقال جریان استفاده کند. همچنین در این تحقیق از رویکرد تخصیص چندگانه استفاده کردیم که در آن گره های غیر هاب قادر خواهند بود به بیش از یک گره هاب وصل شوند به همین منظور تابع هدف ما در مقایسه با یک مسئله با تخصیص یگانه نیز مقدار جریان بیشتری ارسال می کند.

جدول ۱ – نتایج محاسباتی برای ۱۰ گره

حل زمان (ثانیه)	درصد بهبود تابع هدف دوم	تابع هدف کل	تابع هدف دوم	تابع هدف اول	هاب پشتیبان	هابهای انتخابی	ضریب وزنی	فاکتور تخفیف	تعداد هاب	تعداد گره
۰.۴	۰.۵۰۰۱۷۱۴۶۶	۱۰۳۱.۵۴۸	۱۱۴۶.۱۳۱	۷۶۴	۳،۲،۳	۲،۳،۸	۰.۳	۰.۲	۳	۰
۰.۴	۰.۴۹۷۲۰۹	۹۵۵.۳۹۴	۱۱۴۵.۳۶۵	۷۶۵	۳،۲،۳	۲،۳،۸	۰.۵	۰.۲	۳	۰
۰.۴	۰۴۹۳۹۴۶۴۷۵	۸۷۹.۵۴۸	۱۱۴۴.۳۶۳	۷۶۶	۳،۲،۳	۲،۳،۸	۰.۷	۰.۲	۳	۰
۰.۴	۰.۴۹۴۵۷۱۵۷۶	۱۱۲۹.۸۴۷	۱۲۵۴.۳۷۳	۸۳۹.۸۶	۳،۲،۳	۸،۳،۲	۰.۳	۰.۴	۳	۰
۰.۴	۰.۴۹۲۲۲۶۲۶۵	۱۰۴۶.۹۸۶	۱۲۵۳.۷۷۰	۸۴۰.۲۰۱	۳،۲،۳	۸،۳،۲	۰.۵	۰.۴	۳	۰
۰.۴	۰.۴۸۷۴۶۳۴۳۴	۹۶۴.۶۹۵	۱۲۵۱.۸۷۶	۸۴۱.۶۱۸	۳،۲،۳	۸،۳،۲	۰.۷	۰.۴	۳	۰
۰.۴	۰.۴۸۰۷۵۴۸۴۷	۱۳۹۱.۹۷۱	۱۵۴۲.۱۸۱	۱۰۴۱.۴۸۳	۳،۲،۳	۸،۳،۲	۰.۳	۰.۸	۳	۰
۰.۴	۰.۴۷۹۲۷۸۴۹۴	۱۲۹۱.۸۹۵	۱۵۴۱.۶۳۶	۱۰۴۲.۱۵۴	۳،۲،۳	۸،۳،۲	۰.۵	۰.۸	۳	۰
۰.۴	۰.۴۷۵۶۹۹۵۸۹	۱۱۹۲.۳۰۱	۱۵۳۹.۷۴۲	۱۰۴۳.۳۹۸	۳،۲،۳	۸،۳،۲	۰.۷	۰.۸	۳	۰
۰.۲	۰.۹۵۹۷۶۸	۱۲۷۸.۶۴۴	۱۴۹۸.۸۴۱	۷۶۴.۸۰۵	۳،۱۰،۱۰،۱۰۱۰	۲،۳،۷،۸،۱۰	۰.۳	۰.۲	۵	۰
۰.۲	۰.۹۵۷۴۲۳۲۳۹	۱۱۳۱.۹۳۶	۱۴۹۸.۳۸۴	۷۶۵.۴۸۸	۱۰۱۰،۱۰،۱۰،۳	۱۰،۸،۷،۳،۲	۰.۵	۰.۲	۵	۰
۰.۲	۰.۹۵۵۳۴۷۶۷۷	۹۸۵.۴۱	۱۴۹۷.۶۷۹	۷۶۵.۹۴۰	۱۰۱۰،۱۰،۱۰،۳	۱۰،۸،۷،۳،۲	۰.۷	۰.۲	۵	۰
۰.۲	۰۹۵۱۸۹۸۲۴۳	۱۳۹۸.۷۳۰	۱۶۳۸.۴۳۹	۸۳۹.۴۰۸	۱۰۱۰،۱۰،۱۰،۳	۱۰،۸،۷،۳،۲	۰.۳	۰.۴	۵	۰
۰.۲	۰.۹۴۷۵۶۱۶۰۵	۱۲۳۹.۰۹۳	۱۶۳۷.۴۲۸	۸۴۰.۷۵۸	۱۰۱۰،۱۰،۱۰،۳	۱۰،۸،۷،۳،۲	۰.۵	۰.۴	۵	۰
۰.۲	۰.۹۴۴۵۰۰۶۲۶	۱۰۷۹.۹۶۹	۱۶۳۶.۳۴۲	۸۴۱.۵۲۳	۱۰۱۰،۱۰،۱۰،۳	۱۰،۸،۷،۳،۲	۰.۷	۰.۴	۵	۰
۰.۲	۰.۹۲۹۱۸۵۴۹۱	۱۷۱۸.۰۳۰	۲۰۰۸.۲۰۳	۱۰۴۰.۹۵۹	۱۰۱۰،۱۰،۱۰،۳	۱۰،۸،۷،۳،۲	۰.۳	۰.۸	۵	۰
۰.۲	۰.۹۲۶۲۵۰۶۹	۱۵۲۴.۷۵۹	۲۰۰۷.۳۹۴	۱۰۴۲.۱۲۵	۱۰۱۰،۱۰،۱۰،۳	۱۰،۸،۷،۳،۲	۰.۵	۰.۸	۵	۰
۰.۲	۰.۹۲۱۷۲۴۴۱۵	۱۳۳۲.۰۸۶	۲۰۰۵.۳۷۹	۱۰۴۳.۵۳۱	۱۰۱۰،۱۰،۱۰،۳	۱۰،۸،۷،۳،۲	۰.۷	۰.۸	۵	۰



شکل ۱ – آنالیز حساسیت مقدار تابع هدف نسبت به فاکتور تخفیف

شکل ۲ –آنالیز حساسیت مقادیر تابع هدف اول و دوم

جدول ۲ – نتایج محاسباتی برای تعداد ۱۵ گره

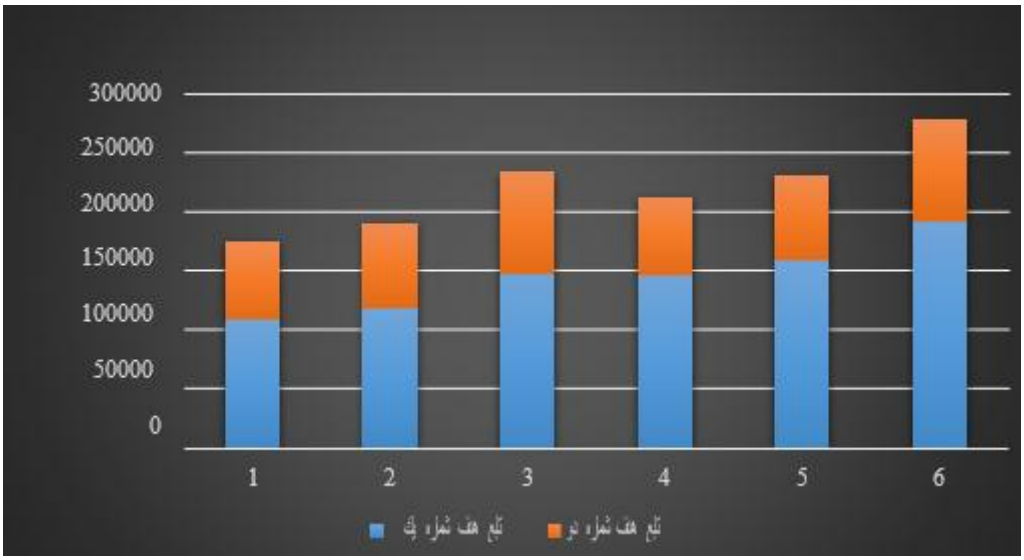
حل زمان (ثانیه)	درصد بهبود تابع هدف دوم	تابع هدف کل	تابع هدف دوم	تابع هدف اول	هاب پشتیبان	هابهای انتخابی	ضریب وزنی	فاکتور تخفیف	تعداد هاب	تعداد گره
۳۴	۰.۶۶۵۷۵۶	۸۱۷۹.۷۳۰	۹۲۹۴.۱۰۹	۵۵۷۹.۵۱۳	۱۱،۱۳،۱۱	۸،۱۱،۱۳	۰.۳	۰.۲	۳	۱۵
۳۴	۰.۶۶۴۳۲۶	۷۴۳۷.۳۹۱	۹۲۹۱.۸۳۸	۵۵۸۲.۹۴۴	۱۱،۱۳،۱۱	۱۳،۱۱،۸	۰.۵	۰.۲	۳	۱۵
۳۴	۰.۶۶۳۶۷۱	۶۶۹۵.۷۷	۹۲۸۹.۹۳۳	۵۵۸۳.۹۹۸	۱۱،۱۳،۱۱	۱۳،۱۱،۸	۰.۷	۰.۲	۳	۱۵
۳۴	۰.۶۶۷۹۳۵	۹۰۱۰.۶۶۰	۱۰۲۴۰.۹۷۹	۶۱۳۹.۹۱۵	۱۱،۱۳،۱۱	۱۳،۱۱،۸	۰.۳	۰.۴	۳	۱۵
۳۴	۰.۶۶۵۷۶۵	۸۱۹۱.۰۳۳	۱۰۲۳۶.۷۱۲	۶۱۴۵.۳۵۳	۱۱،۱۳،۱۱	۱۳،۱۱،۸	۰.۵	۰.۴	۳	۱۵
۳۴	۰.۶۶۳۱۵۳	۷۳۷۳.۲۷۵	۱۰۲۲۳.۸۹۳	۵۱۶۷.۲۹۶	۱۱،۱۳،۱۱	۱۳،۱۱،۸	۰.۷	۰.۴	۳	۱۵
۳۴	۰.۶۶۹۱۵۸	۱۱۵۲.۵۴۱	۱۲۶۷۷.۲۱	۷۵۹۴.۹۷۵	۱۱،۱۳،۱۱	۱۳،۱۱،۸	۰.۳	۰.۸	۳	۱۵
۳۴	۰.۶۶۷۳۶۳	۱۰۱۳۷.۱۰	۱۲۶۷۳.۴۲	۷۶۰۰.۹۰	۱۱،۱۳،۱۱	۱۳،۱۱،۸	۰.۵	۰.۸	۳	۱۵
۳۴	۰.۶۶۵۱۵۹	۹۱۲۳.۹۵۰	۱۲۶۶۵.۴۲	۷۶۰۶.۱۵۹	۱۱،۱۳،۱۱	۱۳،۱۱،۸	۰.۷	۰.۸	۳	۱۵
۲۰۰	۱.۲۵۰۳۵۵	۱۰۴۶۷.۴۵۷	۱۲۵۶۱.۲۶۶	۵۵۸۱.۹۵۰	۱۱،۱۳،۱۱	۱۳،۱۱،۸	۰.۳	۰.۲	۵	۱۵
۲۰۰	۱.۲۴۹۷۷۲	۹۰۷۱.۸۴۶	۱۲۵۶۰.۶۲۶	۵۵۸۳.۰۶۷	۱۱،۱۳،۱۱	۱۳،۱۱،۸	۰.۵	۰.۲	۵	۱۵
۲۰۰	۱.۲۴۹۲۶۹	۷۶۷۶.۵۰۴	۱۲۵۵۹.۴۷۴	۵۵۸۳.۸۲۰	۲،۲،۲،۱۱،۱۱	۲،۸،۱۱،۱۳،۴	۰.۷	۰.۲	۵	۱۵
۲۰۰	۱.۲۵۰۴۵۴	۱۱۵۲۰.۹۳۲	۱۳۸۲۵.۵۶۵	۶۱۴۳.۴۵۵	۱۱،۱۱،۲،۲،۲	۴،۱۳،۱۱،۸،۲	۰.۳	۰.۴	۵	۱۵
۲۰۰	۱.۲۴۲۵۱۱	۹۹۸۴.۹۹۸	۱۳۸۲۳.۸۵۶	۶۱۶۴.۴۵۵	۱۱،۱۱،۲،۲،۲	۴،۱۳،۱۱،۸،۲	۰.۵	۰.۴	۵	۱۵
۲۰۰	۱.۲۴۸۴۰۶	۸۴۴۹.۶۹۶	۱۳۸۲۱.۷۸۷	۶۱۴۷.۳۷۱	۱۱،۱۱،۲،۲،۲	۴،۱۳،۱۱،۸،۲	۰.۷	۰.۴	۵	۱۵
۲۰۰	۱.۲۴۹۷۷۷	۱۴۲۴۲.۲۸۵	۱۷۰۹۸.۰۳۱	۷۵۹۹.۸۷۷	۱۱،۱۱،۲،۲،۲	۴،۱۳،۱۱،۸،۲	۰.۳	۰.۸	۵	۱۵
۲۰۰	۱.۲۴۷۵۳۹	۱۲۳۴۴.۹۴۵	۱۷۰۸۷.۲۴۳	۶۰۲.۶۴۶۷	۱۱،۱۱،۲،۲،۲	۴،۱۳،۱۱،۸،۲	۰.۵	۰.۸	۵	۱۵
۲۰۰	۱.۲۴۵۳۷۲	۱۰۴۴۹.۱۰۶	۱۷۰۸۰.۶۱۴	۷۶۰۷.۰۳۱	۱۱،۱۱،۲،۲،۲	۴،۱۳،۱۱،۸،۲	۰.۷	۰.۸	۵	۱۵

جدول ۳ – نتایج محاسباتی برای تعداد ۲۵ گره

حل زمان (ثانیه)	تابع هدف کل	تابع هدف دوم	تابع هدف اول	هاب پشتیبان	هابهای انتخابی	فاکتور تخفیف	تعداد هاب	تعداد گره
۴۷۴	۹۶۰۱۲.۰۱۰	۱۰۸۷۴۹.۳۱۴	۶۶۲۹۱.۶۳۴	۲،۲،۱۳	۲،۱۱،۱۳	۰.۲	۳	۲۵
۴۷۴	۱۰۴۵۵۸.۹۸۶	۱۱۸۴۳۲.۱۵۰	۷۲۱۸۸.۲۶۹	۲،۲،۱۳	۲،۱۱،۱۳	۰.۴	۳	۲۵
۴۷۴	۱۲۹۶۶.۱۷۳	۱۴۶۷۴۰.۲۹۵	۸۶۹۸۰.۵۵۴	۲،۲،۱۳	۲،۱۱،۱۳	۰.۸	۳	۲۵
۲۱۲۰	۱۲۲۸۰.۰۶۱	۱۴۶۲۷۲.۳۴۵	۶۶۲۹۸.۰۶۷	۲،۲،۲،۲،۱۳	۲،۸،۱۱،۱۳،۱۴	۰.۲	۵	۲۵
۱۸۵۵	۱۳۳۱۴۱.۰۵۹	۱۵۹۲۵۹.۸۰۴	۷۲۱۹۷.۳۲۰	۲،۲،۲،۲،۱۳	۲،۸،۱۱،۱۳،۱۴	۰.۴	۵	۲۵
۱۸۰۰	۱۶۰۳۳۵.۴۷۶	۱۹۱۷۶۸.۴۱۲	۸۶۹۹۱.۹۶۱	۲،۲،۲،۲،۱۳	۲،۸،۱۱،۱۳،۱۴	۰.۸	۵	۲۵

در ادامه همانطور که از نتایج جدول شماره(۲) و نتایج جدول شماره(۳) قابل مشاهده است در تمامی حالتهای ممکن مسئله، تابع هدف دوم جریان بیشتری را نسبت به تابع هدف اول ارسال می کند که با توجه به ماهیت مدل نیز امری کاملا" منطقی است. به طور مثال در جدول شماره(۳) سطری که به صورت زرد رنگ مشخص شده است به این صورت است که در این مسئله هاب های شماره (۱۳و۱۱و۲) بعنوان هاب انتخاب شده اند و هاب ها شماره(۱۳و۲) بعنوان هاب پشتیبان انتخاب شده اند. همچنین در تابع هدف اول زمانی که هاب ها سالم هستند و جریان از گره هایی عبور می کند که قابلیت اطمینان بالاتری دارند میزان تابع هدف ۸۶۹۸.۵۵۴ می باشد اما زمانی که ما از هاب پشتیبان و قابلیت اطمینان به صورت همزمان استفاده می کنیم میزان جریان عبوری برای مسئله ۱۴۶۷۴.۲۹۵

می باشد که تقریباً نزدیک به دو برابر جریان بیشتری را توانسته است عبور دهد که این امر بصورت کلی در نمودار شماره (۳) به صورت کامل مشخص است.



شکل ۳ - مقایسه جریان ارسالی توسط توابع هدف

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل ریاضی دو هدفه برای حالت قبل و بعد از خرابی هاب ها برای مسئله - p هاب میانه با رویکرد تخصیص چندگانه طراحی کردیم. ابتدا سعی کردیم جریان را از طریق گره هایی که قابلیت اطمینان بالاتری دارند ارسال کنیم تا حداکثر جریان ممکن از مبدأ به مقصد توسط گره های هاب ارسال شود و ادامه سعی کردیم زمانی که هاب ها از دسترس خارج می شوند برای هر هاب، یک هاب پشتیبان طراحی کنیم که از هدر رفتن جریان در شبکه جلوگیری شود. ما ابتدا یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط غیر خطی طراحی کردیم که با استفاده از روشهای خطی سازی آن را به یک مدل برنامه ریزی مختلط عدد صحیح خطی تبدیل کرد که حجم زمان محاسبات را کاهش دهیم و همچنین برای اعتبار سنجی خود ما ۱۲ آزمایش برای ۱۰و۱۱و۲۱ گره داده های هواپیمایی آمریکا انجام دادیم که در نتایج مشاهده کردیم که مدل طراحی شده در تمامی حالات عملکرد منطقی را نشان داد زیرا در تمامی حالات تابع هدف شماره(۲) مقدار جریان بیشتری را نسبت به تابع هدف شماره یک که درآن هاب پشتیبان در نظرگرفته نشده است عبورداد. از این رو مدل استفاده شده در این تحقیق می تواند در فاز طراحی شبکه مورد استفاده قرارگیرد. از آنجا که ما در این تحقیق از نرم افزار حل دقیق استفاده کردیم و به دلیل ناتوانی نرم افزار برای حل ابعاد بالاتر پیشنهاد می شود از روشهای حل فراابتکاری برای تحقیقات آتی استفاده شود.

۷- مراجع

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

2. 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(6), 16-27.

3. O'kelly, M. E. (1986). The location of interacting hub facilities. Transportation science, 20(2), 92-106.

4. O'kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. European Journal of Operational Research, 32(3), 393-404.

5. Campbell, J. F. (1994). Integer programming formulations of discrete hub location problems. European Journal of Operational Research, 72(2), 387-405.

6. Campbell, J. F. (1996). Hub location and the p-hub median problem. Operations Research, 44(6), 923-935.

7. Klincewicz, J. G. (1998). Hub location in backbone/tributary network design: a review. Location Science, 6(1), 307-335.

8. Bryan, D. L., & O'Kelly, M. E. (1999). Hub-and-spoke networks in air transportation: an analytical review.

Journal of regional science, 39(2), 275-295.

9. Alumur, S., & Kara, B. Y. (2008). Network hub location problems: The state of the art. European journal of operational research, 190(1), 1-21.

10. Drezner, Z. (1987). Heuristic solution methods for two location problems with unreliable facilities. Journal of the Operational Research Society, 38(6), 509-514.

11. Berman, O., Krass, D., & Menezes, M. B. C. (2010). Location problems with two unreliable facilities on a line allowing correlated failures.Working Paper, Rotman School of Management University of Toronto.

12. Snyder, L. V., & Daskin, M. S. (2005). Reliability models for facility location: the expected failure cost case. Transportation Science, 39(3), 400-416.

13. Berman, O., Krass, D., & Menezes, M. B. (2007). Facility reliability issues in network p- median problems: strategic centralization and co-location effects .Operations Research, 55(2),332-350.

14. Berman, O., Ianovsky, E., & Krass, D. (2011). Optimal search path for service in the presence of disruptions. Computers & Operations Research, 38(11), 1562-1571.

15. Berman, O., Krass, D., & Menezes, M. B. (2009). Locating Facilities in the Presence of Disruptions and Incomplete Information Decision Sciences, 40(4), 845-868.

16. Cui, T., Ouyang, Y., & Shen, Z. J. M. (2010). Reliable facility location design under the risk of disruptions. Operations research, 58(4-part-1), 998-1011.

17. Lim, M., Daskin, M. S., Bassamboo, A., & Chopra, S. (2010). A facility reliability problem: formulation, properties, and algorithm. Naval Research Logistics,57(1), 58-70.

18. Kim, H., & O'Kelly, M. E. (2009). Reliable p-Hub Location Problems in Telecommunication Networks. Geographical Analysis, 41(3), 283-306.

19. An, Y., Zhang, Y., & Zeng, B. (2015). The reliable hub-and-spoke design problem: Models and algorithms. Transportation Research Part B: Methodological, 77, 103-122.

20. Parvaresh, F., Husseini, S. M., Golpayegany, S. H., & Karimi, B. (2014). Hub network design problem in the presence of disruptions. Journal of Intelligent Manufacturing, 25(4), 755-774.

21. Hamidi, M., Gholamian, M., & Shahanaghi, K. (2014). Developing prevention reliability in hub location models. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 228(4), 337-346

22. Azizi, N., Chauhan, S., Salhi, S., & Vidyarthi, N. (2016).The impact of hub failure in hub- and-spoke networks: Mathematical formulations and solution techniques. Computers & Operations Research, 65, 174-188.