مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۱-۳۰، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۳۱-۱۳۶، (یادداشت فنی)

Research Note

طراحی شبکه‌ی توزیع محصولات کارخانه با استفاده از مدل «مکان‌یابی هاب میانی» با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت مراکز توزیع و سطح سرویس‌دهی

جعفر رزمی * **(استاد)**
فهیمه رحمن‌نیا (کارشناس ارشد)
پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

توزیع به مراحلی اطلاق می‌شود که برای انتقال و انبار یک محصول از مرحله‌ی تأمین کننده تا مرحله‌ی مشتری در زنجیره‌ی تأمین انجام می‌گیرد. توزیع یکی از عوامل اصلی سودآوری در هر بنگاه است زیرا مستقیماً بر هزینه‌ی زنجیره‌ی تأمین و تجربه‌ی مشتری تأثیر می‌گذارد. از توزیع خوب می‌توان برای به دست‌آوردن اهداف مختلف زنجیره‌ی تأمین ــ از هزینه‌ی پایین گرفته تا پاسخ‌گویی بالا ــ بهره جست. برای طراحی شبکه‌ی توزیع می‌توان از ایجاد هاب[1] استفاده کرد؛ هاب‌ها تسهیلات ویژه‌یی هستند که نقش ایستگاه‌های واسطه‌یی را در سیستم‌های توزیع ایفا می‌کنند، به‌طوری که با تعیین مسیر و سازمان‌دهی ترافیک بین جفت نقاط مبدأ/مقصد (بسته به نوع مسئله) سبب کاهش زمان، هزینه، یا بهبود عوامل دیگر می‌شوند. در این نوشتار مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه‌ی توزیع محصولات کارخانه با استفاده از مکان‌یابی هاب و با در نظرگرفتن محدودیت‌های ظرفیت و سطح سرویس‌دهی ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین، شبکه‌ی توزیع، مکان‌یابی هاب، P میانه، سطح سرویس‌دهی.

jrazmi@ut.ac.ir
f_rahmanniya@yahoo.com

۱. مقدمه

مسئله‌ی مکان‌یابی هاب[2] دربرگیرنده‌ی مکان‌یابی تسهیلات واسطه و طراحی شبکه‌ی هاب[3] است. این مسئله چند تفاوت عمده با مسائل مکان‌یابی کلاسیک دارد. در مسئله‌ی مکان‌یابی کلاسیک، تقاضا برای خدمت در نقاط گسسته رخ می‌دهد، تسهیلات در نقاط گسسته مستقر می‌شود و تابع هدف عمدتاً مربوط به فاصله یا هزینه‌ی بین تسهیلات و نقاط تقاضاست؛ اما در مسائل مکان‌یابی هاب جریان‌های بین مقاصد و مبادی بیان‌گر تقاضا هستند، و تسهیلات واسطه‌یی به‌عنوان نقاط ارتباط یا یکپارچه‌سازی عمل می‌کنند.[1] این‌گونه سیستم‌ها می‌کوشند تا تقاضای سفر یا ارتباط بین نقاط مبدأ و مقصد را چنان محقق سازند که صرفه‌جویی مقیاسی برای این‌گونه سفرها و ارتباطات میسر باشد.[1] شبکه‌ی هاب به‌جای ارتباط مستقیم بین هر جفت مبدأ ـ مقصد با استفاده از تعداد کم‌تری از پیوندها بین مبدأها ـ مقصدها و هاب‌ها، و نیز بین خود هاب‌ها، اقدام به پاسخ‌گویی به تقاضاها می‌کند. چنین شبکه‌یی اجازه می‌دهد تا تعداد بیشتری از مبدأها و مقصدها با پیوندهای کم‌تری با یکدیگر در ارتباط باشند، از طرف دیگر استفاده از پیوندهای کم‌تر در شبکه باعث تمرکز جریان می‌شود و امکان بهره‌مندی از صرفه‌جویی مقیاسی را فراهم می‌آورد.

شبکه‌های هاب دو نوع اساسی دارند: تک‌تخصیصه[4] و چندتخصیصه[5]. این دو نوع در چگونگی تخصیص نقاط تقاضا به‌هاب با یکدیگر متفاوت‌اند. در شبکه‌های تک‌تخصیصه، ترافیک ورودی و خروجی هر مرکز تقاضا تماماً توسط یک هاب مسیریابی می‌شود. در چندتخصیصه، هر مرکز تقاضا می‌تواند جریان را از طریق بیش از یک هاب دریافت و ارسال کند. برخی مقالات تنها به جنبه‌ی تخصیص مسئله سروکار دارند، امّا چون تخصیص بهینه متأثر از مکان‌یابی هاب و مکان‌یابی بهینه‌ی هاب‌ها نیز متأثر از تصمیمات تخصیص است، لذا مسائل مکان‌یابی و تخصیص باید با هم در طراحی شبکه‌های مکان‌یابی هاب در نظرگرفته شوند. در ساختار کلی مسئله‌ی مکان‌یابی هاب تعدادی از گره‌ها به‌عنوان هاب در نظرگرفته می‌شوند. هاب‌ها دو وظیفه‌ی عمده دارند: ۱. جمع‌آوری تقاضا از نقاط غیر هاب و فرستادن آن به سایر هاب‌ها؛ ۲. دریافت تقاضا از سایر هاب‌ها و توزیع آن به نقاطی که آن‌ها را سرویس می‌دهند.

مسئله‌ی مکان‌یابی هاب برای اولین‌بار در صنعت ارتباطات و حمل‌ونقل مطرح شد که در آن چندین ایستگاه فرستنده و گیرنده وجود داشت. در این نوع صنایع که انواع محصولات ــ نظیر داده، مسافر، بسته‌های پستی، کالا و امثال آن ــ جابه‌جا می‌شوند، کارایی سیستم‌ها با استفاده از هاب که در آن محصولات از مبادی جمع و در مقاصد توزیع می‌شوند، افزایش می‌یابد. با توجه به کاربردهای وسیع شبکه‌های هاب

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۲/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۱/۲۱، پذیرش ۱۳۹۱/۱۲/۲۱.

در صنعت ارتباطات و حمل‌ونقل و رشد روزافزون این صنایع در جهان، همچنین مطرح بودن شاخص هزینه‌های محصول در بازار رقابتی امروز، مطالعه پیرامون مسئله‌ی مکان‌یابی هاب اهمیت چشم‌گیری دارد.

یکی از تصمیمات استراتژیک در زنجیره‌ی تأمین طراحی شبکه‌ی توزیع در زنجیره است، که تأثیر فراوانی بر هزینه‌ها و همچنین سطح رضایت‌مندی مشتریان دارد. طراحی شبکه‌ی توزیع شامل تعیین تعداد و مکان تسهیلات و همچنین چگونگی تخصیص این تسهیلات به نقاط تقاضا و تعیین میزان حمل کالاهای مختلف از مبادی گوناگون به مقاصد متفاوت در شبکه است، به‌گونه‌یی که تقاضای تمامی مشتریان با کم‌ترین هزینه و با توجه به محدودیت‌های موجود برآورده شود. طراحی شبکه‌ی توزیع بر هزینه‌ی نگه‌داری موجودی، هزینه‌ی حمل‌ونقل و هزینه‌ی ایجاد تسهیلات تأثیرگذار است. افزایش تعداد تسهیلات موجب افزایش هزینه‌های نگه‌داری موجودی، و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و زمان پاسخ‌گویی به نیاز مشتری است (Chopra)[۲]. بنابراین طراحی یک شبکه‌ی توزیع مناسب ــ به‌ویژه اگر در آن اهداف اقتصادی، شامل هزینه‌ی انتقال و هزینه‌ی احداث، و نیز سطح سرویس‌دهی در نظر گرفته شود، نقش مهمی در عملکرد زنجیره‌ی تأمین دارد.

با توجه به اهمیت موضوع، هدفِ این نوشتار عبارت است از: ارائه‌ی مدلی برای مکان‌یابی و تخصیص بهینه‌ی مراکز توزیع محصولات یک کارخانه (مراکز توزیع به‌عنوان هاب درنظر گرفته می‌شود) به مراکز مشتری با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی انتقال، جمع‌آوری و توزیع و همچنین هزینه‌ی احداث هاب‌ها با درنظرگرفتن محدودیت در ظرفیت مراکز توزیع و همچنین محدودیت در سطح سرویس‌دهی. «سطح سرویس‌دهی» در این مسئله با بیشینه فاصله‌ی مجاز اتصال دو نقطه‌ی غیرهاب از طریق هاب رابطه‌ی غیرمستقیم دارد، به‌گونه‌یی که هرچه سطح سرویس بالاتر باشد بیشینه فاصله‌ی مجاز باید کم‌تر شود، همچنین در این مسئله دو نوع هاب با ظرفیت و هزینه‌ی احداث متفاوت در نظر گرفته شده است.

۲. مرور ادبیات

مسئله‌ی مکان‌یابی هاب و روش‌های حل این‌گونه مسائل در مقالات متعددی مورد مطالعه قرارگرفته است. اما از آنجا که در این مطالعه هدف ارائه‌ی مدلی برای طراحی شبکه‌ی توزیع در زنجیره‌ی تأمین است، بر مقالات موجود در زمینه‌ی روش حل تمرکز نخواهد شد.

بسیاری از مؤلفان، مکان‌یابی هاب را به‌عنوان شبکه‌ی هاب ـ پره برای مسافران هوایی در نظر گرفته‌اند. گروهی از پژوهش‌گران در سال ۱۹۹۹ مروری در این زمینه انجام داده‌اند.[۳] برخی مؤلفان مواردی خاص را ــ شامل مواردی که در آنها خطوط هوایی فقط پروازهایی با یک توقف دارند ــ در نظر گرفتند.[۴] در این مورد فقط یک هاب می‌تواند در مسیرها قرارگیرد و مسئله تبدیل به مسئله‌ی ساده‌ترِ p میانه می‌شود. در مسئله‌ی p میانه دو توقف مجاز است.

در سال ۲۰۰۳ محققین تأثیر طراحی شبکه‌ی هاب را بر ازدحام موجود در فرودگاه‌های منتخب به‌عنوان هاب بررسی کردند.[۵] برای این منظور آنها هاب را به‌عنوان سیستم‌های صف M/D/C مدل‌سازی کردند. سپس مسئله‌ی مکان‌یابی هاب را با محدودیت‌هایی برای تضمین سطح خدمت مناسب در هاب حل کردند. به‌علاوه آنها بهینه‌سازی تعداد باندهای پرواز مورد نیاز در هر فرودگاه را نیز مطرح کردند.

در شبکه‌های خطوط هوایی تخفیف هزینه برای جریان‌های زیاد از استفاده‌ی هواپیماهای بزرگ ناشی می‌شود که در هر موقعیتی از شبکه ممکن است اتفاق افتد. در این زمینه مدل‌های متفاوتی توسط مؤلفان ارائه شد که در آنها هزینه‌ی ارتباطات بین هاب تخفیف می‌یابد.[۶]

در سال ۲۰۰۰ گروهی از محققین مسائل مکان‌یابی هاب در شبکه‌های حمل و نقل عمومی شهری را بررسی کردند.[۷] آنها فرمول‌بندی جدیدی براساس مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با تخصیص چندتایی بدون محدودیت را توسعه دادند، ولی با متغیر تصمیم‌گیری مجزا برای مکان هاب ـ یال (با ارائه‌ی جابه‌جایی کاهش‌یافته بین هاب‌ها). این نوع مدل انعطاف‌پذیری بیشتری در طراحی شبکه به وجود می‌آورد، اما حل آن به‌طور قابل ملاحظه‌یی سخت‌تر است.

کاربرد شبکه‌های پستی در سال ۱۹۹۶ و ۱۹۹۹ بررسی شد[۸و۹] که براساس سیستم تحویل مرسولات شهرهای بزرگ استرالیا بود. در این سیستم نقاط به‌عنوان نواحی کد پستی، جریان‌ها مربوط به حجم مرسولات، و هاب نه‌تنها مراکز تجمیع بلکه مراکز مرتب‌سازی است. برخی تفاوت‌ها با کاربردهای معمول خطوط هوایی شامل موارد زیر هستند: هزینه‌های تجمیع و توزیع که براساس رویکردها و طرز حمل و نقل کاملاً متفاوت‌اند، یکسان نیستند.

یکی از کاربردهای مرتبط با طراحی شبکه‌ی پستی، طراحی شبکه‌ی توزیع یک‌روزه یا اکسپرس است.[۱۰] در این شبکه‌ها معمولاً از هواپیماها برای حمل و نقل بین هاب، و از هواپیماها یا کامیون‌ها برای حمل و نقل بین مبدأ/ مقصدها و هاب مورد استفاده قرار دادند. از آنجا که کامیون‌ها غالباً برای تمام ارتباط‌ها کاربرد دارند، هزینه‌ی کاهش‌یافته روی کمان‌های داخلی هاب ممکن است بسیار اندک یا صفر باشد.

شبکه‌ی حمل و نقل کامیونی در مقیاس بزرگ، مشابه شبکه‌های پستی و خطوط هوایی است که حمل و نقل بین چندین مبدأ و مقصد را انجام می‌دهد. بسیاری از شبکه‌های بزرگ حمل و نقل کامیونی برای تمرکز و انتقال بار از هاب استفاده می‌کنند؛ اگرچه، بسیاری از مطالعات انجام‌شده روی شبکه‌های هاب در صنعت حمل کامیونی، عملکرد و طراحی چنین شبکه‌هایی را هدف قرار داده و بهینه‌سازی مکان هاب را در نظر نمی‌گیرند.

تعدادی از مطالعات، مکان‌یابی هاب را در مدل بار ظرفیت کامل کامیون[۶] و بار کم‌تر از ظرفیت کامیون[۷] بررسی کرده‌اند. در مدل بار ظرفیت کامل کامیون، از هاب می‌توان نه‌تنها برای تجمیع، بلکه برای کاهش سیستم چرخشی رانندگان با فراهم‌کردن نقاط ارسال که از طول سفر رانندگان می‌کاهد استفاده کرد. در سال ۱۹۹۸ عملکرد حمل و نقل کامیونی بررسی، و الگوریتم ابتکاری برای مکان‌یابی هاب ارائه شد.[۱۱] تعدادی از مطالعات شبیه‌سازی در مورد مکان‌یابی هاب و عملکرد شبکه‌هاب در صنعت حمل و نقل کامیونی انجام شده است. در سال ۲۰۱۱ محققین مدل M/M/C را برای حمل بار ارائه دادند. در این مدل مسئله‌ی هاب از نوع پوشش مجموعه است و ظرفیت هاب‌ها محدود است.[۱۲] در سال ۲۰۰۹ مدل هاب چندتخصیصه برای مسئله‌ی حمل و نقل با زمان قطعی ارائه شد.[۱۳] در این مسئله‌هاب‌ها محدودیتی در ظرفیت نداشتند، البته برای یک مسئله‌ی خاص مجموعه‌ی موجهی از لحاظ محدودیت فاصله بین نقاط از طریق هاب تعریف شده بود.

در سال ۲۰۰۵ مسئله‌ی مکان‌یابی هاب در شبکه‌ی توزیع درصورتی که علاوه بر حمل‌ونقل جاده‌یی از حمل‌ونقل دریایی نیز استفاده شود مورد مطالعه قرارگرفت.[۱۴] آنها مسئله را با استفاده از روش‌های هیوریستیک حل کردند و نتایج حاصل نشان داد که استفاده از حمل‌و نقل دریایی برای تقاضاهای ثابت و پایدار کم‌هزینه‌تر است.

در سال ۲۰۰۹ پژوهش‌گران مسئله‌ی مکان‌یابی ترمینال‌ها را درشبکه جاده‌یی ـ ریلی بررسی کردند.[۱۵] این مسئله تعداد هاب‌های بهینه را با استفاده از روش هیوریستیک تعیین می‌کرد. در این مسئله محدودیت زمان سرویس در نظر گرفته نشده بود.

در سال ۲۰۱۰ یک مدل P میانه چندتخصیصه برای شبکه‌ی چندوجهی لجستیک ارائه شد.[۱۶] در این مدل زمان پاسخ‌دهی به مشتری در نظر گرفته شده بود و نوع هاب (ریلی ـ جاده‌یی) به‌عنوان متغیر تصمیم در مدل آمده بود و هزینه‌ی ایجاد هاب نیز لحاظ شده بود.

تحقیقات شبکه‌های هاب در ارتباطات راه دور بیشتر بر هزینه‌های استقرار شبکه متمرکزند تا هزینه‌ی انتقال جریان بین جفت مبدأها ـ مقصدها. به‌عبارت دیگر، راه حل بهینه با کمینه‌کردن هزینه‌های استقرار شبکه حاصل می‌شود که شامل هزینه‌های هاب، خطوط ارتباطی هاب و دیگر ارتباطات است و هزینه‌های ارضای تقاضا را در نظر نمی‌گیرد. دلیل این امر آن است که در ارتباطات راه دور هزینه‌های عملکردی در مقایسه با هزینه‌های استقرار شبکه بسیار پایین است.

با توجه به ادبیات موضوع مکان‌یابی هاب، تاکنون مدلی برای طراحی شبکه‌ی توزیع با درنظرگرفتن محدودیت در ظرفیت هاب‌ها و سطح سرویس‌دهی ارائه نشده است. در مقالات هاب بیشتر بر جنبه‌ی اقتصادی مدل (کاهش هزینه‌ی انتقال و هزینه‌ی احداث) تمرکز شده و مدلی که علاوه بر مکان‌یابی هاب‌ها و کاهش هزینه‌ی انتقال و تأسیس هاب، محدودیت فاصله‌ی مرتبط با سطح سرویس‌دهی و محدودیت ظرفیت هاب را در نظر بگیرد، ارائه نشده است. در این مقاله مدل جدیدی ارائه شده است که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، سطح سرویس‌دهی را نیز در نظر می‌گیرد؛ همچنین هاب‌ها در این مدل چندظرفیتی هستند. در این مدل سطح سرویس‌دهی با بیشینه فاصله‌ی مجاز اتصال دو نقطه‌ی غیرهاب از طریق هاب رابطه‌ی غیرمستقیم دارد، به‌گونه‌یی که هرچه سطح سرویس بالاتر باشد فاصله‌ی مجاز بیشینه باید کم‌تر شود. همچنین برای هاب‌ها ظرفیت‌های متفاوت با هزینه‌ی احداث متفاوت در نظر گرفته شده است.

۳. ارائه‌ی مدل پیشنهادی

مدلی که در این نوشتار ارائه شده به طراحی شبکه‌ی توزیع با استفاده از مدل P میانه می‌پردازد با این فرض که شبکه‌ی هاب تک‌تخصیصه است و سطح سرویس‌دهی و محدودیت ظرفیت در هاب متناسب با نوع هاب است.

۱.۳. فرضیات

در این مسئله ارتباط مستقیم بین نقاط غیر هاب امکان‌پذیر نیست و دو نوع هاب با ظرفیت و هزینه‌ی احداث متفاوت درنظرگرفته شده است. تعداد هاب‌ها از قبل مشخص است و هر هاب از لحاظ میزان جریان انتقالی دارای محدودیت ظرفیت است. هرگره غیر هاب فقط به یک هاب متصل است. همچنین با توجه به اهمیت زمان سرویس‌دهی در شبکه‌های توزیع و اثرگذار بودن پارامتر فاصله در این مورد برای سطوح سرویس‌دهی (α) مختلف بیشینه فاصله‌ی مجاز برای ارتباط بین دو نقطه‌ی غیرهاب از طریق هاب متفاوت است. در این مسئله فاصله‌ی مستقیم بین دوگره را با $d(i,j)$ و بیشینه فاصله‌ی مجاز از طریق هاب را با $d_{\max}$ نشان می‌دهیم. با توجه به مقدار d وα، برای هر جفت مبدأ ـ مقصد $d_{\max}$ را مشخص می‌کنیم. به‌طور مثال اگر $d_{ij} <= ۳۰۰$ و $\alpha = ۰/۹$ باشد، $d_{\max}$ برایi,j را برابر با ۷۰۰ در نظر می‌گیریم. بر این اساس فاصله از طریق هاب k و l $(d_{ik}+d_{kl}+d_{lj})$ برای دو گره (i,j) در سطح $\alpha = ۰/۹$ حداکثر به‌اندازه‌ی ۷۰۰ است. تابع هدف در این مسئله کمینه‌سازی هزینه‌ی حمل‌ونقل و احداث هاب باتوجه به سطح سرویس‌دهی در نظرگرفته شده است.

۲.۳. متغیرهای تصمیم

X_{ijkl}: بخشی از جریان که از گره i به گره j از طریق هاب k و l منتقل می‌شود.

X^s_k: ۱ درصورتی که گرهk، هاب از نوع S باشد و ۰ درغیر این صورت.

X^m_k: ۱ درصورتی که گره k هاب از نوع m باشد و ۰ درغیر این صورت.

X_{ik}: ۱ درصورتی که گره i به‌هاب k متصل باشد و ۰ درغیر این صورت.

Y_k: ۱ در صورتی که گره‌هاب باشد و ۰ در غیر این صورت.

$Y۱_{ij}$: ۱ اگر d_{ij} کوچک‌تر از ۳۰۰ باشد.

$Y۲_{ij}$: ۱ اگر d_{ij} در بازه ۳۰۰ تا ۷۰۰ باشد.

$Y۳_{ij}$: ۱ اگر d_{ij} در بازه ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ باشد.

۱.۲.۳. پارامترها

W_{ij}: جریان بین دو گره i و j.

C_{ij}: هزینه‌ی حمل‌ونقل بین دو گره i و j.

C^s: هزینه‌ی احداث هاب از نوع S.

C^m: هزینه‌ی احداث هاب از نوع m.

Ca^s: ظرفیت هاب نوع S.

Ca^m: ظرفیت هاب نوع m.

D_{ij}: فاصله‌ی بین دو گره i و j.

α: سطح سرویس‌دهی.

$d۱_{\max}$: بیشینه فاصله‌ی مجاز برای بازه ۱.

$d۲_{\max}$: بیشینه فاصله‌ی مجاز برای بازه ۲.

$d۳_{\max}$: بیشینه فاصله‌ی مجاز برای بازه ۳.

δ: ضریب صرفه‌جویی هزینه در فاز انتقال.

β: ضریب صرفه‌جویی هزینه در فاز توزیع.

ρ: ضریب صرفه‌جویی هزینه در فاز جمع‌آوری.

$$\min \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l C_{ijkl} W_{ij} X_{ijkl} + C^s_K X^s_K + C^m_K X^m_K$$

$$\sum_{K=۱}^{n} Y_k = p$$

$$X_{lk} <= Y_k \qquad \forall (i,K)$$

$$\sum_K X_{iK} = ۱ \qquad \forall i$$

$$Y_K = X^S_K + X^m_K$$

$$\sum_K X_{ijkl} = X_{jl} \qquad \forall (i,j,l)$$

$$\sum_l X_{ijkl} = X_{ik} \qquad \forall (i,j,k)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_{l \neq k} W_{ij} X_{ijkl} \leq Ca^m_k X^m_k + Ca^s_k X^s_k \qquad \forall (k)$$

$$Y1_{ij} < d_{ij} < 300 * Y1_{ij}$$
$$300 * Y2_{ij} < d_{ij} < 700 * Y2_{ij}$$
$$700 * Y3_{ij} < d_{ij} < 1000 * Y3_{ij}$$
$$Y1_{ij} + Y2_{ij} + Y3_{ij} = 1$$
$$X_{ijkl}(d_{ik} + d_{kl} + d_{jl}) < d1_{\max} * Y1_{ij} + d2_{\max} * Y2_{ij} + d3_{\max} * Y3_{ij} \qquad \forall(i,j,k,l)$$
$$C_{ijkl} = \rho * C_{iK} + \beta * C_{jl} + \delta * C_{Kl}$$

در مدل فوق تابع هدف کمینه‌سازی هزینه جریان محصول (شامل فاز جمع‌آوری، انتقال و توزیع) و نیز هزینه‌ی احداث هاب‌ها با توجه به نوع هاب است. محدودیت ۲ نشان می‌دهد که تعداد هاب‌ها باید برابر با p باشد. محدودیت ۳ تضمین می‌کند که هیچ گره‌یی به گره غیرهاب متصل نمی‌شود. محدودیت ۴ نشان می‌دهد که هر گره غیرهاب حتماً باید به یک هاب متصل شود. محدودیت ۵ نشان‌گر آن است که هر هاب از نوع S یا m است. محدودیت ۶ و ۷ تضمین‌گر تک‌تخصیصه بودن مدل است. محدودیت ۸، محدودیت ظرفیت هر هاب است که مجموع مقادیر ورودی به هر هاب باید از ظرفیت هاب کم‌تر باشد. محدودیت‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مشخص می‌کنند که دو نقطه‌ی i و j در چه بازه فاصله‌یی قرار گرفته‌اند. محدودیت ۱۳ بیشینه فاصله‌ی مجاز غیرمستقیم برای ارتباط بین دو گره غیرهاب از طریق هاب را در هر بازه مشخص می‌کند. رابطه‌ی ۱۴ نیز هزینه‌ی جریان بین دو گره i و j را از طریق هاب k و l مشخص می‌کند. مدل فوق به‌وسیله‌ی GAMS رمزگذاری شده است.

۴. طراحی و نتایج آزمایش

نتایج برای شبکه‌یی با ۱۰ و ۱۵ گره درنظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای اصلی مسئله در جداول ۱ تا ۴ مشخص شده‌اند. بیشترین تعداد هاب‌ها برای سطح سرویس‌دهی ۰٫۹ برای شبکه‌یی با ۱۰ گره برابر با ۳ و برای شبکه‌یی با ۱۵ گره برابر با ۴ است. همچنین دو نوع هاب با ظرفیت و هزینه‌ی احداث مختلف در نظرگرفته شده است.

در سطح سرویس‌دهی ۰٫۹ و ۰٫۸ نتایج اجرای مدل برای شبکه‌یی با ۱۰ و

جدول ۱. بیشینه فاصله‌ی مجاز در بازه‌های مختلف برای $\alpha = 0{,}9$.

$d_{\max}$	d_{ij}
۷۰۰	$d_{ij} < 300$
۱۰۰۰	$300 < d_{ij} < 700$
۱۲۰۰	$700 < d_{ij} < 1000$

جدول ۲. بیشینه فاصله‌ی مجاز در بازه‌های مختلف برای $\alpha = 0{,}8$.

$d_{\max}$	d_{ij}
۹۰۰	$d_{ij} < 300$
۱۱۰۰	$300 < d_{ij} < 700$
۱۳۰۰	$700 < d_{ij} < 1000$

جدول ۳. هزینه‌ی احداث و ظرفیت هر نوع هاب.

هاب	ظرفیت	هزینه احداث
۱	۱۵۰۰	۵۰۰۰۰
۲	۳۰۰۰	۶۰۰۰۰

جدول ۴. ضریب صرفه‌جویی هزینه.

ضریب صرفه‌جویی هزینه	مقدار
فاز انتقال	۰٫۵
فاز توزیع	۰٫۷
فاز جمع آوری	۰٫۷

جدول ۵. نتایج اجرای مدل به ازای α مختلف در شبکه‌یی با ۱۰ گره.

سطح سرویس‌دهی	تعداد هاب	هزینه احداث	هزینه انتقال	هزینه کل	هاب نوع ۱	هاب نوع ۲
$\alpha = 0{,}9$	۳	۱۷۰۰۰۰	۴۴۰۸۰۰	۶۱۰۸۰۰	n_5	n_2, n_7
$\alpha = 0{,}8$	۲	۱۲۰۰۰۰	۴۸۴۶۰۰	۶۰۴۶۰۰		n_2, n_7

جدول ۶. نتایج اجرای مدل به ازای α مختلف در شبکه‌یی با ۱۵ گره.

سطح سرویس‌دهی	تعداد هاب	هزینه احداث	هزینه انتقال	هزینه کل	هاب نوع ۱	هاب نوع ۲
$\alpha = 0{,}9$	۴	۲۱۰۰۰۰	۱۰۴۷۶۰۰	۱۲۵۷۶۰۰	n_{13}, n_{14}	n_1, n_{12}
$\alpha = 0{,}8$	۳	۱۷۰۰۰۰	۱۰۷۵۸۰۰	۱۲۴۵۸۰۰	n_9, n_{12}	n_1

۱۵ گره با هم مقایسه شده است. لازم به ذکر است که در سطح سرویس‌دهی ۰٫۹ کم‌ترین تعداد هاب‌ها برای شبکه‌یی با ۱۰ گره باید برابر ۳ باشد ــ چرا که اگر تعداد هاب‌ها کم‌تر باشد این سطح سرویس‌دهی ارضا نمی‌شود (فاصله‌ی غیرمستقیم بین دو گره بیش از حد مجاز می‌شود) ــ اما در سطح سرویس‌دهی ۰٫۸ کم‌ترین تعداد هاب برابر ۲ است. همچنین برای شبکه‌یی با ۱۵ گره در سطح سرویس‌دهی ۰٫۹ کم‌ترین تعداد هاب برابر با ۴ و در سطح سرویس‌دهی ۰٫۸ کم‌ترین تعداد هاب برابر ۳ است.

همان‌طور که در جدول ۵ و ۶ مشاهده می‌شود برای هر مسئله‌ی حل شده در سطح سرویس‌دهی ۰٫۹ هزینه‌ی جریان انتقال نسبت به ۰٫۸ کم‌تر است. به‌همین دلیل است که در سطح ۰٫۸ مسافت بیشتری برای انتقال جریان باید طی شود اما هزینه‌ی احداث در سطح ۰٫۹ نسبت به ۰٫۸ بیشتر است به این دلیل که در سطح سرویس‌دهی بالاتر به‌دلیل تعداد هاب بیشتر هزینه‌ی انتقال کاهش می‌یابد اما هزینه‌ی احداث افزایش می‌یابد. در سطح سرویس‌دهی بالاتر هزینه‌ی کل توزیع افزایش می‌یابد. همچنین با بزرگ‌تر شدن شبکه (افزایش تعداد گره‌ها) تابع هدف از جنس هزینه افزایش می‌یابد زیرا با افزایش شبکه، تعداد هاب‌های مورد نیاز برای ارضای سطح سرویس‌دهی مورد نظر افزایش می‌یابد و درنتیجه هزینه‌ی احداث زیاد می‌شود. همچنین به‌دلیل افزایش حجم جریان در شبکه‌ی بزرگ‌تر هزینه انتقال هم که تابعی از حجم جریان است افزایش می‌یابد.

با کاهش جریان انتقال بین دو گره در سطح سرویس $\alpha = 0{,}9$ هزینه‌ی جریان

جدول ۷. نتایج اجرای مدل با کاهش حجم جریان.

سطح سرویس‌دهی	تعداد هاب	هزینه احداث	هزینه انتقال	هزینه کل	هاب نوع ۱	هاب نوع ۲
$\alpha = ۰/۹$	۳	۱۵۰۰۰۰	۲۳۰۱۰۰	۳۸۰۱۰۰	$n_۲, n_۵, n_۷$	

جدول ۸. نتایج اجرای مدل به ازای ضرایب δ متفاوت با ضریب $\beta = ۰/۷$.

سطح سرویس‌دهی	ضریب تخفیف	تعداد هاب‌ها	هزینه جریان	هاب نوع ۱	هاب نوع ۲
$\alpha = ۰/۹$	$\delta = ۰/۸$	۳	۴۶۹۴۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$
$\alpha = ۰/۹$	$\delta = ۰/۷$	۳	۴۵۰۸۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$
$\alpha = ۰/۹$	$\delta = ۰/۶$	۳	۴۳۲۲۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$
$\alpha = ۰/۹$	$\delta = ۰/۵$	۳	۴۱۳۶۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$
$\alpha = ۰/۹$	$\delta = ۰/۴$	۳	۳۹۵۰۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$
$\alpha = ۰/۹$	$\delta = ۰/۳$	۳	۳۷۶۴۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$

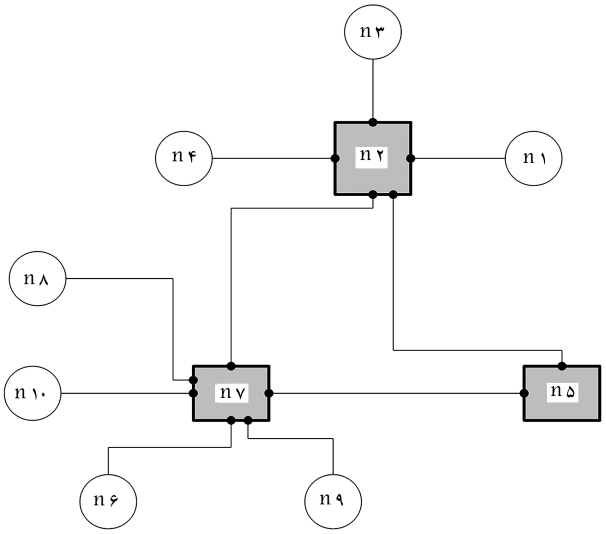
جدول ۹. نتایج اجرای مدل به ازای ضرایب β متفاوت با ضریب $\delta = ۰/۵$.

سطح سرویس‌دهی	ضریب تخفیف	تعداد هاب‌ها	هزینه جریان	هاب نوع ۱	هاب نوع ۲
$\alpha = ۰/۹$	$\beta = ۰/۸$	۳	۴۵۹۴۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$
$\alpha = ۰/۹$	$\beta = ۰/۷$	۳	۴۱۳۶۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$
$\alpha = ۰/۹$	$\beta = ۰/۶$	۳	۳۶۷۷۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$
$\alpha = ۰/۹$	$\beta = ۰/۵$	۳	۳۲۲۰۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$
$\alpha = ۰/۹$	$\beta = ۰/۴$	۳	۲۷۶۲۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$
$\alpha = ۰/۹$	$\beta = ۰/۳$	۳	۲۳۴۰۰	$n_۵$	$n_۲, n_۷$

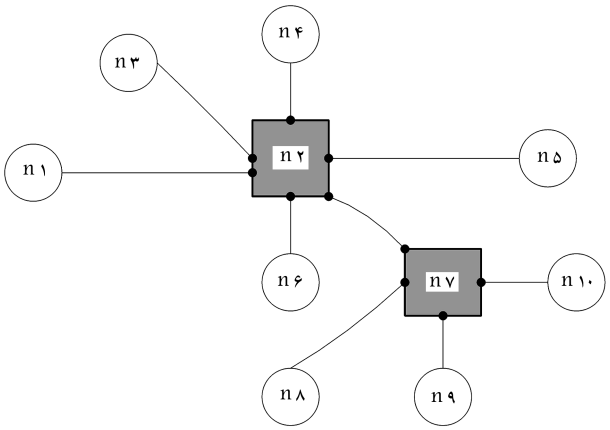
و هزینه‌ی احداث کاهش پیدا کرد، زیرا به‌دلیل کاهش حجم انتقال هر سه‌هاب از نوع ۱ است. نتایج اجرای مدل در جدول ۷ نشان داده شده است.

به‌ازای δهای متفاوت (ضریب صرفه‌جویی هزینه در فاز انتقال) و همچنین βهای متفاوت (ضریب صرفه‌جویی هزینه در فاز توزیع) مسئله حل می‌شود و مشاهده می‌شود که کاهش مقدار β نسبت به کاهش مقدار δ تأثیر بیشتری بر کاهش هزینه‌ی کل جریان و درنتیجه هزینه‌ی کل تابع هدف دارد، کاهش مقدار β نسبت به کاهش مقدارδ با شیب بیشتری تابع هزینه جریان انتقال را کاهش می‌دهد، زیرا ضریب β بر حجم جریان عبوری از هاب‌ها به گره‌ها و همچنین گره‌ها به‌هاب‌ها مؤثر است اما ضریب β فقط بر جریانات عبوری از هاب‌ها مؤثر است؛ در نتیجه ضریب β تأثیر بیشتری بر تابع هدف دارد. نتایج اجرای مدل به‌ازای δ و β متفاوت برای مسئله‌یی با ۱۰ گره در سطح سرویس‌دهی ۰/۹ در جدول ۸ و ۹ نمایش داده شده است که دلیلی بر صحت موارد گفته شده است.

شکل‌های ۱ و ۲ نحوه‌ی تخصیص نقاط غیرهاب به‌هاب را در شبکه‌یی با ۱۰ گره و در سطح سرویس‌دهی ۰/۹ و ۰/۸ نمایش می‌دهد.



شکل ۱. شبکه‌ی توزیع در سطح $\alpha = ۰/۹$.



شکل ۲. شبکه‌ی توزیع در سطح $\alpha = ۰/۸$.

۵. نتیجه‌گیری

شبکه‌ی توزیع مناسب یکی از عوامل اصلی سودآوری بنگاه اقتصادی است و در کاهش هزینه‌ها و افزایش سطح رضایت‌مندی مشتری بسیار مؤثر است و باتوجه به زمان سرویس‌دهی در شبکه‌های توزیع و تأثیر آن بر رضایت‌مندی مشتری و اثرگذار بودن پارامتر فاصله در این مورد ارائه مدلی که بتواند این ویژگی‌ها را اعمال کند ضرورت دارد. باتوجه به مدل ارائه شده و اولویت‌بندی معیارها برای طراحی شبکه اعم از هزینه‌ی انتقال، هزینه‌ی احداث و سطح سرویس‌دهی مدیریت زنجیره‌ی عرضه می‌تواند تصمیم مناسب را جهت طراحی شبکه اتخاذ کند. با استفاده از مدل پیشنهادی می‌توان در سطح سرویس‌دهی‌های متفاوت کم‌ترین تعداد مجاز هاب را مشخص کرد، همچنین نوع هر هاب برحسب ظرفیت نیز با حل این مدل به دست می‌آید. درنتیجه مدل ارائه شده یک مدل تعاملی است که به مدیریت در تصمیم‌گیری مناسب کمک می‌کند. همان‌طور که در بخش نتایج عددی مشاهده شد با کاهش سطح سرویس‌دهی هزینه‌ی احداث کاهش و هزینه‌ی انتقال افزایش می‌یابد. همچنین کاهش δ (ضریب صرفه‌جویی هزینه در فاز انتقال) نسبت به کاهش β (ضریب صرفه‌جویی هزینه در فاز توزیع) تأثیر بیشتری برکاهش مقدار تابع هدف دارد، چون حجم جریان در فاز انتقال بیشتر از حجم جریان در فاز

توزیع است. لازم به ذکر است که می‌توان از پارامتر زمان به‌جای پارامتر فاصله برای تعریف سطح سرویس‌دهی استفاده کرد، به این صورت که زمان رسیدن ازگره i به j به‌صورت غیرمستقیم در سطح α از مقدار مشخصی بیشتر نباشد. این محدودیت برای شبکه‌یی که زمان در آن نقش مهمی دارد مناسب است.

۱.۵. پیشنهاد برای تحقیقات آتی

در تحقیقات آتی می‌توان از پارامترهایی که دارای عدم قطعیت هستند استفاده کرد؛ به‌طور مثال می‌توان جریان انتقالی بین دو گره، هزینه‌ی احداث هاب‌ها، هزینه‌ی انتقال بین دو گره فازی را در نظر گرفت. این مدل برای مسئله‌ی تک‌تخصیصه حل شده است، با توسعه‌ی مدل می‌توان آن را برای مسائل هاب چندتخصیصه حل کرد. همچنین می‌توان مدل را برای مسئله‌ی مکان‌یابی محورها با هزینه‌ی ثابت حل کرد، به‌گونه‌یی که تعداد هاب بهینه از حل مدل به دست آید. با توسعه‌ی این مدل هزینه‌ی نگه‌داری موجودی را هم می‌توان در تابع هدف اعمال کرد.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از پشتیبانی مالی دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی به شماره پرونده ۸۱۰۸۰۲۳/۱/۱۶ در انجام مطالعه فوق تشکر و قدردانی می‌نمایند.

پانوشت‌ها

1. Hub
2. Hub location problem
3. Hub network problem
4. single allocation
5. multi allocation
6. truck load
7. less than truck load

منابع (References)

1. Campbell, J.F. "Hub location and the p-hub median problem", *Operations Research*, **44**(6), pp. 1-13 (1996).
2. Chopra, "Third edition supply chain management, strategy, planning and operation", (in Persian) (2001).
3. O'Kelly, B. "Hub-and-spoke networks in air transportation: An analytical review", *Journal of Regional Science*, **39**, pp. 275-295 (1999).
4. Sasaki, M., Suzuki, A. and Drezner, Z. "On the selection of hub airports for the airline hub-and-spoke system", *Computers & OR*, **26**, pp. 1411-1422 (1997).
5. Marianova, V. and Serra, D. "Location models for airline hubs behaving as M/D/c queues", *Computers & Operations Research*, **30**, pp. 983-1003 (2003).
6. Campbell, Y.F .and et al., *Hub Location Problems*, In-Facility Location Applications and Theory, Springer (2002).
7. Nickel, S.and et al. "Extensions of the uncapacitated hubLocation problem for applications in intermodal public transportation", *the 13th Mini-EURO Conference Handling Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems* (2000).
8. Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. "Effcient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem", *Location Science*, **4**(3), pp. 139-154 (1996).
9. Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. "Solution algorithms for the capacitated single allocation hub location problem", *Annals of Operations Research*, **86**, pp. 141-159 (1999).
10. Crainic, "Planning models for freight transportation", *European Journal of Operational Research*, **97**, pp. 409-438 (1999).
11. Hunt, P.Y. and et al. "Off-equilibrium linearisation and design of gain-scheduled control with application to vehicle speed control", Control Engineering Practice, pp. 167-180 (1998),
12. Mohammadi, M. and et al. "An M/M/c queue model for hub covering location problem", *Mathematical and Computer Modelling*, **54** pp. 2623-2638 (2011)
13. Campell, J.F. "Hub location for time definite transportation", *Computers & Operations Research,* **36**, pp. 3107-3116 (2009)
14. Groothedde, B. and et al.,"Towards collaborative, intermodal hub networks: A case study in the fast moving consumer goods market", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **41**(6), pp. 567-583 (2005).
15. Limbourg, S. and Jourquin, B. "Optimal rail–road container terminal locations on the European network", *Transportation Research (E),* **45**(4), pp. 551-563 (2009).
16. Rafay, I. and Soxb, C.R. "Hub location–allocation in intermodal logistic networks", *European Journal of Operational Research,* **21**, pp.213-230 (2010).