

# ارائه الگوریتم ترکیبی برای مسئله مکان‌یابی هاب در شبکه حمل و نقل

## چندوجهی

جواد بهنامیان (مسئول مکاتبات)، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

امیرحسین صفرقلی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

E-mail: behnamian@basu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۰۹ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲

### چکیده

در پژوهش حاضر مسئله طراحی شبکه هاب سلسله‌مراتبی با در نظر گرفتن تأخیرات در هاب‌های مرکزی در نظر گرفته شده است. در این نوع شبکه‌ها می‌توان از شیوه‌های مختلف حمل و نقل جاده‌ای، ریلی، هوایی و دریایی استفاده نمود. به این منظور در این مقاله شبکه حمل و نقل چندوجهی در نظر گرفته شده که در آن بدلیل عدم تناسب میان نرخ ورود جریان به هاب‌ها با نرخ پردازش منابع هاب و همچنین تنوع زمانی در حمل و نقل شیوه‌های مختلف انتقال کالا، صف در هاب‌ها ایجاد می‌شود. بدین منظور در این تحقیق ابتدا با استفاده از مدل صف  $GI/G/1$  به بررسی اثر محدودیت منابع و همچنین تنوع در زمان حمل و نقل مسیرهای مختلف تحت الزامات زمان سرویس‌دهی پرداخته سپس الگوریتم ترکیبی جستجوی همسایگی متغیر-شبه‌سازی تبرید برای حل مسئله در پیشنهاد شده است. در نهایت پس از حل مثال‌های عددی، تحلیل حساسیتی جهت اعتبارسنجی عملکرد الگوریتم پیشنهادی انجام شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر دارای کارایی مناسبی است.

واژه‌های کلیدی: هاب سلسله‌مراتبی، شبکه حمل و نقل چندوجهی، مدل صف  $GI/G/1$ ، الگوریتم ترکیبی

## ۱. مقدمه

شبکه‌های حمل و نقل تأثیرگذار است. از طرفی اگر نرخ ورود جریان به هاب‌ها با نرخ پردازش منابع هاب متناسب نباشد ممکن است باعث ایجاد صف در هاب‌ها شود و اگر این وضعیت به خوبی مدیریت نشود اثرات نامطلوبی بر عملکرد سیستم خواهد گذاشت. دلیل دیگر تأخیرات در شبکه‌های حمل و نقل چندوجهی، تنوع زمانی در شیوه‌های مختلف انتقال کالا است. این تغییرات باعث افزایش عدم قطعیت در تعداد محموله‌هایی می‌شود که قرار است در یک دوره زمانی خاص در هاب‌ها واریسی شوند. این عدم اطمینان باعث ایجاد صف و در نتیجه تأخیر در حمل و نقل می‌شود. تأخیرات حمل و نقل در هاب‌ها یکی از نگرانی‌های ارائه دهندگان خدمات لجستیک است.

این تحقیق با استفاده از مدل صف  $GI/G/1$  به بررسی اثر محدودیت منابع و همچنین تنوع در زمان حمل و نقل مسیرهای مختلف بر روی طراحی شبکه‌های حمل و نقل تحت الزامات زمان سرویس دهی می‌پردازد. به این منظور مدل  $p$ -هاب میانه با تخصیص تکی برای مسئله مکان‌یابی سلسله‌مراتبی مراکز هاب با مدل صف عملیات هاب ادغام شده است. مدل اول به مکان-یابی سلسله‌مراتبی مراکز هاب و تخصیص گره‌ها به این مکانها در یک شبکه حمل و نقل چندوجهی می‌پردازد و مدل دوم که بر اساس شبکه صف برای یک شبکه‌هاب چندوجهی است، ارزش انتظاری زمان انتظار برای محموله‌ها را تخمین می‌زند. با توجه به مسیریابی محموله‌ها، زمانهای انتظار می‌تواند به نوع محموله‌ها و همچنین شیوه حمل و نقل آنها بستگی داشته باشد. با ترکیب مفاهیم و جنبه‌های ذکر شده فوق، تبادل بین هزینه‌های لجستیکی، جریانهای هاب، استفاده از خدمات چندوجهی بین هاب‌ها، کل زمان حمل و نقل و زمان مورد نیاز سرویس‌دهی مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل مسئله در اندازه کوچک از نرم افزار گمز استفاده شده است. از آنجایی که این مسئله NP-Hard است [Alumur and Kara, 2008]. بنابراین با افزایش اندازه مسئله نمونه نرم افزار گمز قادر به حل مسئله نبوده از اینرو الگوریتم فراابتکاری ترکیبی به منظور حل در اندازه‌های بزرگ پیشنهاد شده است.

در ادامه در بخش دوم، مبانی نظری و پیشینه پژوهش ارائه شده است. در بخش سوم، مسئله بیان شده و سیستم صف برای عملیات هاب معرفی شده است و بخش چهارم به ارائه توضیحات مرتبط با الگوریتم فراابتکاری اختصاص یافته است.

در یک شبکه حمل و نقل عملاً ممکن است جریان بین دو گره از بیش از دو هاب عبور کند. به عنوان مثال در شبکه‌های پستی، کالاها معمولاً از هاب‌های مختلفی به منظور رسیدن به مقصد عبور می‌کنند. به منظور مدلسازی چنین شبکه‌هایی، مکانیابی هاب سلسله‌مراتبی توسعه داده شده است. در طراحی یک شبکه هاب چندسطحی، یکی از رویکردها استفاده از روش سلسله‌مراتبی است که در آن بالاترین سطح، یک شبکه ارتباط کامل با نام هاب‌های مرکزی وجود داشته و سطوح بعدی از یک شبکه ستاره‌ای تشکیل شده است. این شبکه‌ها به ترتیب از تخصیص هاب‌های سطح دوم به هاب‌های مرکزی و تخصیص نقاط تقاضا به نقاط هاب تشکیل می‌شوند. هدف از این مسئله تعیین مکان هاب‌های مرکزی و هاب‌های سطح دوم و تخصیص گره‌ها به این هاب‌ها است، به نحوی که هزینه کل انتقالات در شبکه کمینه گردد.

بدیهی است که در یک محیط رقابتی، اخذ تصمیمات راهبردی در طراحی شبکه‌های حمل و نقل کارآمد و موثر، امری ضروری است. هدف این استراتژی، برآورده کردن تقاضا در مدت زمانی معقول با هزینه‌ای رقابتی است. به منظور دست‌یابی به این هدف، شبکه‌های حمل و نقل هاب چندوجهی پیشنهاد شده‌اند. در چنین شبکه‌ای، جریان در طول سفر خود از مبدأ به مقصد، از انواع حالت‌های حمل و نقل مانند مسیر جاده‌ای، ریلی، هوایی و دریایی استفاده می‌کند. با این وجود، طراحی چنین شبکه‌هایی به دلایل زیر با محدودیت‌هایی روبرو است [Ishfaq and Sox, 2009]:

- ✓ زیرساخت‌های حمل و نقل موجود
  - ✓ تعیین مکانیابی با قابلیت سرویس‌دهی انواع حالت‌های حمل و نقل
  - ✓ ساختار هزینه‌های حمل و نقل
- مزیت شبکه‌های حمل و نقل هاب چندوجهی نسبت به شبکه‌های جاده‌ای، نه تنها به علت هزینه‌های کمتر آنها، بلکه به دلیل قابلیت حمل و نقل بالای این نوع شبکه‌ها است. این قابلیت با وزن، حجم، دسترسی و عملکرد زمان انتقال مشخص می‌شود [Ishfaq and Sox, 2009].
- در طراحی یک شبکه، تصمیم‌گیری در مورد مکان هاب‌ها و تخصیص جریان به این مراکز به طور مستقیم بر عملکرد عملیاتی

## ارائه الگوریتم ترکیبی برای مسئله مکان‌یابی هاب در شبکه حمل و نقل چندوجهی

در بخش پنجم نتایج عددی ارائه و در بخش پایانی به نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی پرداخته شده است.

### ۲. مرور ادبیات

یکی از اولین تحقیقات در زمینه استفاده از صف در مسایل هاب، پژوهش ماریانو و سرا [Marianov and Serra, 2003] است که در آن هاب‌های فرودگاه به عنوان یک سیستم صف تک مرحله‌ای M/D/C در یک مسئله مکان‌یابی هاب، مدل شده است. یک محدودیت احتمالی تحمیل شد که احتمال زمانهای انتظار بالا در هاب‌ها را محدود به یک مقدار کم (از پیش تعیین شده) می‌کند. در این تحقیق روش حل جستجوی ممنوعه ارائه شد و در این روش هر هاب یک سیستم صف M/D/C فرض شده است. در این روش قسمتی از فضای حل را در نظر گرفته و با تکرارهای پیاپی گره‌های همسایه هاب مورد نظر، بهترین همسایه به عنوان هاب جدید انتخاب می‌شود، حتی اگر تابع هدف بدتر شود. با کمک این روش حداکثر می‌توان شبکه‌ای با ۵۰ گره و استقرار ۴ یا ۵ هاب را ایجاد کرد که در صورت افزایش تعداد گره‌ها کارایی روش پایین آمده و تضمینی برای رسیدن به حل قابل قبول نخواهد داشت. الهدلی و هو [Elhedhli and Hu, 2005] اثر تجمع جریان در هاب‌ها را در تخصیص تکی مسئله مکان‌یابی p-هاب با اضافه کردن یک تابع هزینه محذب (قدرت) به تابع هدف مدل کردند. اگر جریان بیشتری به یک هاب اختصاص داده شود مقدار تابع هزینه به طور غیرخطی افزایش می‌یابد.

یکی از مطالعات دیگر، مطالعه وارسینگ، سوزا و گریس [Warsing, Souza and Greis, 2001] است که متوسط زمان انتظار حمل و نقل در یک هاب از تقریب حالت پایدار یک سیستم صف GI/G/C محاسبه می‌شود. رودریگز و سالزر [Rodriguez and Salazar, 2008] یک هاب به عنوان سیستم صفی مدل در نظر گرفته‌اند که در آن کامیون‌ها وارد شده و اگر منابع تخلیه مشغول باشند، در صف منتظر می‌مانند. نرخ ورود بستگی به تعداد کامیون‌های واگذار شده به هاب دارد. جایگزینی بین تعداد کامیون اختصاص داده شده و زمانهای انتظار، تحت حداکثر زمان حمل و نقل مورد نیاز بررسی شده است. در این مقاله همچنین حوزه سیستم‌های صف با کلاس‌های کار متعدد و مسیر یابی‌ها ترسیم شده است. روش حل

با استفاده از شبیه‌سازی تبرید که محققین برای حل مسئله مکان-یابی p-هاب با ظرفیت محدود ارائه کرده‌اند و در آن هر هاب یک سیستم صف M/M/1 فرض شده است. این مسئله برای شبکه‌ای با ۵۲ گره حل گردید. الگوریتم شاخه و کران در سال ۲۰۰۴ توسط لاب [Labbe 2004] و همکارانش برای حل مسائل هاب با ظرفیت نامحدود و تخصیص ساده (p-UHLP) (S) به کار گرفته شد. در این روش شبکه‌ای که هاب‌ها را به هم وصل می‌کند شبکه ستونی و شبکه‌ای که گره‌های غیر هاب را به گره‌های هاب وصل می‌کند، شبکه دسترسی نامیده شده است. در مطالعه الدلی و وو [Elhedhli and Wu 2010] تفاوت نسبی بین جریان هاب و ظرفیت هاب برای توسعه تابع هزینه‌ایکه اثر زمانهای انتظار را از بین می‌برد مورد استفاده قرار گرفت. بتازگی با توجه به کاربردهای مهم شبکه‌های هاب در حمل و نقل کالا، چراغی و همکاران [Cheraghi et al., 2017] مسئله مکان‌یابی هاب میانه چند هدفه چند محصولی را در ایران بررسی کردند. در این تحقیق در مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی هاب چند محصولی با استفاده از حمل و نقل زمینی کالا، هزینه تأسیس هاب‌های ترکیبی (جاده‌ای-ریلی) و هزینه حمل و نقل بین هاب‌ها و هاب به غیر هاب در تابع هدف کمینه شده است و با توجه به اهمیت مسایل زیست محیطی و آلاینده‌گی شبکه‌های حمل و نقل کالا، یکی از توابع هدف در نظر گرفته شده برای مدل ارایه شده، کمینه سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از رویکرد توری صف است. داده‌های مورد استفاده این تحقیق با استفاده از آمار ارائه شده حمل و نقل جاده‌ای کشور در سال ۱۳۹۲ بوده و برای حل مسئله از دو الگوریتم فراابتکاری بر پایه شبیه‌سازی تبرید و رقابت استعماری ارائه شده است.

اولین مدل ارائه شده در زمینه هاب سلسله‌مراتبی برای شبکه خطوط هوایی آمریکا معرفی شد. این مدل که توسط چو و [Chou, 1990] ارائه شد، دارای تخصیص چندگانه بود و تعداد هاب‌ها بصورت درونی و توسط خود مدل مشخص می‌شدند. لین و چن [Lin and Chen, 2004] یک مسئله مکان‌یابی سلسله‌مراتبی با در نظر گرفتن محدودیت زمانی توسعه دادند. مسئله به صورت کمینه سازی هزینه‌های عملیاتی و تأمین سطح سرویس مورد نظر مدل شده است. آنها مدل باینری خود را به صورت شبکه مستقیم مسیر-فضا توسعه دادند

در نظر گرفتن محدودیت زمان جابجایی. مدل ارائه شده سه سطحی بود و دو نوع حمل و نقل زمینی و هوایی در مدل گنجانده شده بود. مدل به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی فرمول‌بندی شده و از داده‌های شبکه ترکیه برای ارزیابی مدل استفاده شده بود. پیش از این مدل‌های ارائه شده در ادبیات موضوع مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی همگی دارای پارامترهای قطعی بودند. داوری و زرندی [Davari and Fazel Zarandi, 2012] مسئله هاب سلسله‌مراتبی را با در نظر گرفتن تقاضاهای فازی مدل‌سازی کردند. مدل آنها از نوع مکان‌یابی p-هاب میانه سلسله‌مراتبی با تخصیص تکی بود که ساختار آن مشابه مدل یامان [Yaman, 2009] بود. همچنین آنها از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر برای حل مدل استفاده کردند. در جدیدترین پژوهش در زمینه مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی، کریمی، عید و کورانی [Karimi, Eydi and Korani, 2014] یک مدل مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی ظرفیت‌دار و با تخصیص تکی توسعه دادند. مدل ارائه شده به صورت مکان‌یابی p-هاب میانه معرفی شده بود که برای تسهیلات هابی در همه سطوح محدودیت ظرفیت را در نظر گرفته بود. در انتها نیز از داده‌های شبکه هوایی ایران برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده بود. ارشادی خمسه و دوست‌محمدی [Arshadi Khamseh and Doost Mohamadi, 2014] یک مدل مکان‌یابی p-هاب مرکز سه سطحی ارائه دادند. در مدل اول ارتباط بین هاب‌های مرکزی از نوع گراف کامل بود ولی در مدل دوم هاب‌های مرکزی به طور کامل به هم وصل نبودند. همچنین ارتباطات هاب‌ها در سطح دو به صورت ستاره‌ای بودند. آنها مدل پیشنهادی خود را به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه کردند و از مجموعه داده CAB جهت اعتبارسنجی استفاده کردند. ایشفاق و کارلس [Ishfaq and Sox, 2009] یک شبکه حمل و نقل چندوجهی با در نظر گرفتن زمان تأخیرات در هاب را طراحی کردند. مدل ارائه شده به صورت تخصیص چندگانه بود و زمان تأخیرات کالا در هاب با استفاده از مدل صف GI/G/1 و طبقه‌بندی کالاهای محاسبه و در نهایت مدل مکان‌یابی/تخصیص هاب با مدل صف مذکور ادغام شده بود. رحیمی و همکاران [Rahimi et al., 2016] مدل مکان‌یابی هاب چندهدفه‌ای را در شبکه چندوجهی در نظر گرفته و یک

و با استفاده از روش شمارش ضمنی مدل را حل کردند. نتایج ناشی از تحلیل حساسیت مدل روی داده‌های دومین شرکت بزرگ حمل و نقل تایوان نشان‌دهنده این بود که هزینه‌ها با افزایش سطح سرویس به طور یکنواخت افزایش نمی‌یابند. بلکه به شکل غیر کاهشی با تابع پلکانی افزایش می‌یابند. علاوه بر این نتیجه گرفتند که زمان مرتب‌سازی و تخلیه به صورت ضمنی روی هزینه‌ها تأثیرگذار است.

یامان [Yaman, 2009] یک مدل مکان‌یابی p-هاب میانه سلسله‌مراتبی سه سطحی با تخصیص تکی ارائه داد. مدل ارائه شده در جهت تعیین تعداد هاب‌ها و هاب‌های مرکزی و نیز تخصیص گره‌های تقاضا به آنها در جهت کمینه کردن هزینه کل شبکه توسعه داده شد. همچنین وی مدل خود را با در نظر گرفتن محدودیت زمان تحویل گسترش داد. مدل پیشنهادی وی به شکل برنامه‌ریزی غیرخطی صفر و یک و برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شده بود. در انتها نیز مدل ارائه شده با استفاده از مجموعه داده CAB<sup>1</sup> و مجموعه داده شبکه ترکیه ارزیابی شده است. در پژوهش دیگری لین [Lin, 2010] یک مسئله هاب سلسله‌مراتبی با هدف طراحی شبکه و زمان‌بندی همزمان معرفی کرد. همچنین در این مدل چندین نوع وسیله حمل و نقل در نظر گرفته شده بود و هدف در آن تعیین تعداد این حامل‌ها در جهت کمینه کردن هزینه عملیاتی سیستم بود. در این تحقیق با توجه به پیچیدگی مسئله، از الگوریتم جستجوی ممنوعه جهت حل مدل استفاده شده است. در انتها نیز برای ارزیابی مدل از داده‌های مورد استفاده در تحقیق لین و چن [Lin and Chen, 2004] استفاده شده است. صحرائیان و کرانی [Sahraeian and Korani, 2010] مسئله هاب سلسله‌مراتبی حداکثر پوشش<sup>2</sup> را معرفی کردند. در این مسئله با توجه به اندازه شعاع پوشش، با هدف کمینه سازی هزینه شبکه، نقاط تقاضا به تسهیلات هابی (هاب‌ها و هاب‌های مرکزی) تخصیص داده شدند. مدل ارائه شده در این پژوهش به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط بود و همچنین آنها از یک روش ابتکاری جهت تعیین شعاع پوشش استفاده کردند. در ادامه آلومور و کارا و کاراسان [Alumur, Kara and Karasan, 2012] یک مسئله هاب سلسله‌مراتبی با در نظر گرفتن محدودیت زمان جابجایی ارائه کردند. تابع هدف عبارت بود از کمینه کردن هزینه‌های حمل و نقل شبکه با

## ارائه الگوریتم ترکیبی برای مسئله مکان‌یابی هاب در شبکه حمل و نقل چندوجهی

- ارائه مدل مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی در شبکه‌های چندوجهی تحت الزامات سرویس‌دهی
- تأثیر زمانهای انتظار در هاب‌های مرکزی بر روی مسیرهای بهینه انتقال کالا
- ارائه الگوریتم ترکیبی جستجوی همسایگی متغیر (VNS)-شبیه‌سازی تبرید (SA) در اندازه‌های بزرگ.

### ۳. بیان مسئله

این مقاله به ایجاد یک شبکه مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی در شبکه‌های چندوجهی با در نظر گرفتن تأخیرات در هاب‌های مرکزی می‌پردازد. مدل‌های هاب سلسله‌مراتبی موجب افزایش زمانهای حمل‌ونقل و در نتیجه کاهش سطح خدمت‌دهی به مشتریان خواهند شد، لذا از مدل صف  $G/GI/1$  به منظور تخمین زمانهای انتظار کالا در هاب‌ها استفاده و مدل حاصل با مدل مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی ادغام شده است. استفاده از این مدل باعث کنترل بیشتر زمانهای حمل و نقل و افزایش سطح خدمت‌دهی می‌شود. شکل ۱ شمای کلی شبکه چندوجهی هاب سلسله‌مراتبی را نشان می‌دهد.

الگوریتم فراابتکاری با نام تکاملی تفاضلی برای آن توسعه دادند. در این مقاله محققین سطوح چند ظرفیتی برای گره‌های شبکه را در نظر گرفته و مدل صفی بصورت مدل  $M/M/c/K$  توسعه دادند. در ادامه در جدول ۱ محدوده مورد بررسی در این پژوهش و تمایز آن با نزدیکترین تحقیقات را نشان می‌دهد. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که به منظور ارائه خدمت بهتر به مشتریان و تحویل کالاها با کمترین زمان ممکن، یکی از مسائل مهم در طراحی شبکه‌های حمل و نقل است. از این‌رو توسعه شبکه‌های چندوجهی ضروری به نظر می‌رسد. همچنین یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در تأخیرات حمل و نقل محدودیت منابع در هاب‌ها است که منجر به ایجاد صف و در نهایت افزایش زمانهای جابجایی کالا می‌شود. از طرف دیگر در شبکه‌های هاب سلسله‌مراتبی بدلیل افزایش زمانهای حمل و نقل مسئله صف در هاب‌ها و ارتقا سطح خدمت‌دهی اهمیت بیشتری می‌یابد که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. وجود چنین خلأهایی در مطالعات پیشین انگیزه اصلی پژوهش حاضر و ارائه مدلی جدید در این زمینه است. بطور خلاصه نوآوری‌های مطالعه حاضر در مقایسه با ادبیات موضوع به شرح زیر است:

جدول ۱. مقایسه حوزه مکان‌یابی هاب مورد بررسی در این پژوهش با تحقیقات مرتبط پیشین

| پژوهش‌ها                                   | نوع تخصیص    | محدودت ظرفیت | هدف حداقل- حداکثر | هدف حداقل مجموع | سلسله‌مراتبی | حمل و نقل چندوجهی | بکارگیری مدل صف |
|--|--------------|--------------|-------------------|-----------------|--------------|-------------------|-----------------|
| [Kara and Tansel, 2000]                    | تکی          | -            | *                 | -               | -            | -                 | -               |
| [Campbell, Lowe and Zhang 2007]            | تکی، چندگانه | *            | *                 | -               | -            | -                 | -               |
| [Ernst et al., 2009]                       | تکی، چندگانه | -            | *                 | -               | -            | -                 | -               |
| [Yaman, 2009]                              | تکی          | -            | -                 | *               | *            | -                 | -               |
| [Ishfaq and Sox, 2012]                     | چندگانه      | -            | -                 | *               | -            | *                 | *               |
| [Davari and Fazel Zarandi, 2012]           | تکی          | -            | -                 | *               | *            | -                 | -               |
| [Alumur, Kara and Karasan, 2012]           | تکی          | -            | -                 | *               | *            | *                 | -               |
| [Arshadi Khamseh and Doost Mohamadi, 2014] | تکی          | -            | *                 | -               | *            | *                 | -               |
| [Karimi, Eydi and Korani, 2014]            | تکی          | *            | -                 | *               | *            | *                 | -               |
| تحقیق حاضر                                 | تکی          | -            | -                 | *               | *            | *                 | *               |

۲- کالاهای واردشونده<sup>۴</sup>: شامل محموله‌هایی است که از هاب مرکزی دیگری دریافت شده اند.

۳- کالاهای محلی<sup>۵</sup>: شامل محموله‌هایی است که مبدا و مقصد آنها بوسیله یک هاب مرکزی سرویس دهی می شوند. هرکدام از دسته های فوق در هاب مرکزی دارای مسیر مخصوص و قطعی هستند که با استفاده از عملیات هاب توصیف می شود.

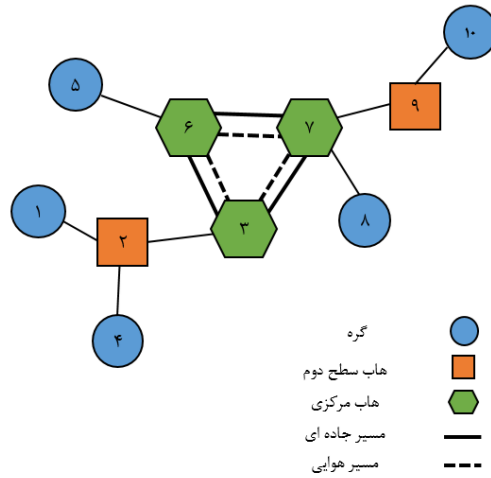
در یک هاب مرکزی چهار نوع عملیات انجام می شود که شامل موارد ذیل است:

- ۱- تخلیه: تریلرها و کانتینرها تخلیه می شوند.
- ۲- بسته بندی<sup>۶</sup>: در این عملیات کالاهای خارج شونده باید بسته بندی شوند.
- ۳- جداسازی<sup>۷</sup>: در این عملیات کالاهای واردشونده تحت عملیات جداسازی قرار می گیرند.
- ۴- بارگذاری<sup>۸</sup>: محموله ها بر روی تریلرها و کانتینرها بارگذاری می شوند.

کل زمان حمل و نقل ترکیبی از زمان حمل و نقل بین مبدا و مقصد، و زمان صرف شده در هاب مرکزی است. زمان صرف شده در هاب مرکزی (زمان توقف) ترکیبی است از زمان پردازش هر یک از عملیات بر روی کالا و زمانی که کالا در صف انتظار هر یک از عملیات منتظر می ماند. اگر نرخ ورود کالاها به نرخ پردازش نزدیک شود، منابع محدود در هاب های مرکزی ممکن است موجب ایجاد تأخیرات حمل و نقل شوند. این تأخیرات با جذب بیشتر جریانها به هاب به علت استفاده از اقتصاد انبوهی، بیشتر می شوند.

### ۳-۱ فرضیات تحقیق

- فرضیات اصلی این تحقیق به شرح زیر است:
- شبکه حمل و نقل حاصل یک شبکه سلسله مراتبی سه سطحی است.
  - شبکه حاصل از هاب های مرکزی دارای ساختار ارتباط کامل است.
  - شبکه حاصل از تخصیص هاب های سطح دوم به هاب های مرکزی دارای ساختار ستاره ای است.
  - شبکه حاصل از تخصیص گره ها به هاب ها دارای ساختار ستاره ای است.



شکل ۱. شبکه پیشنهادی چندوجهی هاب سلسله مراتبی

هدف از این مدل، طراحی شبکه چندوجهی هاب سلسله مراتبی با در نظر گرفتن تأخیرات در هاب های مرکزی است. در اینجا شبکه سلسله مراتبی سه سطحی است. سطح اول شامل شبکه تشکیل دهنده هاب های مرکزی است. سطح دوم شبکه حاصل از تخصیص تکی هاب ها به هاب های مرکزی و در نهایت سطح سوم شبکه حاصل از تخصیص تکی گره ها به هاب است. برای جابجایی کالا بین دو هاب مرکزی از شیوه های مختلف حمل و نقل استفاده می شود. این شیوه ها می تواند شامل مسیرهای جاده ای، ریلی، هوایی و دریایی باشد. از طرفی تأخیرات زمانی به دلیل عملیات انجام شده بر روی کالا در هاب های مرکزی رخ می دهد. بنابراین سیستم صف فقط در هاب های مرکزی پیاده شده است و در نهایت با مدل مکانیابی/تخصیص ادغام می شود. با توجه به توضیحات فوق، جریان بین گره مبدا  $i$  و گره مقصد  $m$  می تواند از طرق ذیل انجام شود:

- ✓ با استفاده از جفت هاب مرکزی  $(k, l)$  و جفت هاب  $(j, j')$
- ✓ با استفاده از هاب مرکزی  $k$  و جفت هاب  $(j, j')$
- ✓ با استفاده از جفت هاب مرکزی  $(k, l)$
- ✓ با استفاده از جفت هاب  $(j, j')$
- ✓ با استفاده از هاب مرکزی  $k$
- ✓ با استفاده از هاب  $j$

کالاهای رسیده به هاب مرکزی به سه دسته تقسیم بندی می شوند:

- ۱- کالاهای خارج شونده<sup>۹</sup>: شامل محموله‌هایی است که از گره مبدا رسیده اند و به هاب مرکزی دیگری ارسال خواهند شد.

## ارائه الگوریتم ترکیبی برای مسئله مکان‌یابی هاب در شبکه حمل و نقل چندوجهی

|   |   |  |
|---|---|--|
| فاصله میان تمام گره‌ها مشخص و از نامساوی مثلثی پیروی می‌کند.  | $pa^t$  | اندازه بسته های حمل و نقل بین هاب‌های مرکزی به شیوه حمل و نقل $t$  |
| تأخیرات زمانی فقط در هاب‌های مرکزی رخ می‌دهد. بنابراین مدل صف تنها در این مراکز پیاده شده است.  | متغیرهای صف   |  |
| تنوع شیوه‌های حمل و نقل فقط بین هاب‌های مرکزی است و انتقال کالا در مسیرهای دیگر زمینی است.  | $\lambda_k^o$   | نرخ ورود کالا به ایستگاه $o$ از هاب مرکزی $k$  |
|   | $o\lambda_{kl}^t$   | نرخ ورود کالای خارج شونده از هاب مرکزی $k$ که از شیوه حمل و نقل $t$ به هاب مرکزی $l$ منتقل می‌شود.   |
|   | $l\lambda_k^t$  | نرخ ورود کالای وارد شونده از هاب‌های مرکزی دیگر به هاب مرکزی $k$ از طریق شیوه حمل و نقل $t$ ام   |
|   | $L\lambda_k$  | نرخ ورود کالاهای محلی به هاب مرکزی $k$   |
|   | $Ca_k^o$  | مربع ضریب تغییرات زمانهای ورود به ایستگاه $o$ در هاب مرکزی $k$   |
|   | $Ca_k^{bit}$  | مربع ضریب تغییرات زمانهای ورود به ایستگاه بسته‌بندی در هاب مرکزی $k$ که از طریق شیوه حمل و نقل $t$ به هاب مرکزی $l$ می‌روند.   |
|   | $Ca_k^{bbt}$  | مربع ضریب تغییرات زمانهای جابه‌جایی کالا از ایستگاه جداسازی به ایستگاه $o$ (بارگذاری) در هاب مرکزی $k$ که از شیوه حمل و نقل $t$ به این هاب رسیده اند.                      |
|   | $Cd_k^o$  | مربع ضریب تغییرات زمانهای خروج از ایستگاه $o$ در هاب مرکزی $k$   |
|   | $\rho_k^o$  | ضریب تراکم ایستگاه $o$ در هاب مرکزی $k$ ( $\rho_k^o < 1$ )   |
|   | $wa_k^o$  | متوسط زمان انتظار کالا در ایستگاه $o$ در هاب مرکزی $k$   |
|   | $wa_k^{bit}$  | متوسط زمان انتظار کالا در ایستگاه بسته‌بندی $bit$ از هاب مرکزی $k$ که از شیوه حمل و نقل $t$ به هاب مرکزی $l$ منتقل می‌شود.   |
|   | $wa_k^{bbt}$  | متوسط زمان انتظار کالا در ایستگاه جداسازی $bbt$ از هاب مرکزی $k$ که از شیوه حمل و نقل $t$ به این هاب منتقل شده است (این متغیر برابر مقدار ثابت $\xi$ در نظر گرفته می‌شود). |
|   | $\vartheta_k^o$   | متغیر کمکی جهت ساده سازی مدل   |
|   | $wq_k^o$  | متغیر کمکی جهت ساده سازی مدل   |
|   | $g(\rho_k^o, Ca_k^o, Cs_k^o, \theta)$   | متغیر وابسته به $\rho_k^o, Ca_k^o, Cs_k^o$   |
| • فاصله میان تمام گره‌ها مشخص و از نامساوی مثلثی پیروی می‌کند.  |   |  |
| • تأخیرات زمانی فقط در هاب‌های مرکزی رخ می‌دهد. بنابراین مدل صف تنها در این مراکز پیاده شده است.  |   |  |
| • تنوع شیوه‌های حمل و نقل فقط بین هاب‌های مرکزی است و انتقال کالا در مسیرهای دیگر زمینی است.  |   |  |
| <b>۳-۲ سیستم صف برای عملیات هاب</b>   |   |  |
| سیستم های صف GI/G/1 متشکل از کالاها و ایستگاه‌های کاری، برای عملیات هاب توسعه داده شده‌اند. فرآیند ورود به ایستگاه‌های کاری شامل کالاهایی است که طبق یک توزیع عمومی وارد هاب می‌شوند. ایستگاه‌ها در این صف، سرورهای تکی هستند که دارای صف‌های نامتناهی‌اند. صف‌ها بر اساس اولین ورود/اولین خروج مورد پردازش قرار می‌گیرند. در مواردی که کالاها در سیستم صف دارای ویژگی‌های متمایزی هستند، از سیستم‌های صف با طبقه‌بندی کالاها استفاده می‌شود. در یک شبکه حمل و نقل محموله‌های رسیده به هاب با یک طبقه‌بندی خاص و با توجه به مقصد، نوع حمل و نقل بین هابی و هاب مقصد تفکیک می‌شوند. هرکدام از این کالاها دارای یک مسیریابی متناظر قطعی هستند که جریان آنها را در سیستم صف توصیف می‌کند. قانون اولین ورود/اولین سرورس و همچنین سرورهای تکی نشان دهنده این واقعیت است که ترتیب کالاهای خروجی با ترتیب کالاهای ورودی برابر است. |   |  |
| <b>مجموعه:</b>  |   |  |
| $O$   | مجموعه ایستگاه‌ها (عملیات) در هاب مرکزی {بارگذاری (۴)، جداسازی (۳)، بسته‌بندی (۲)}، تخلیه (۱) |  |
| <b>پارامترهای صف</b>  |   |  |
| $\mu_k^o$   | نرخ پردازش کالا در ایستگاه $o$ از هاب مرکزی   |  |
| $Cs_k^o$  | مربع ضریب تغییرات زمانی پردازش کالا در ایستگاه $o$ از هاب مرکزی $k$                           |  |
| $ch_t$  | تغییرات زمانی حمل و نقل کالا به شیوه حمل و نقل $t$  |  |
| $st_k^o$  | متوسط زمان پردازش عملیات $o$ در هاب مرکزی $k$   |  |
| $\theta$  | ضریب ثابت   |  |

۲- مسیر عبور کالاهای وارد شونده از ایستگاه‌های کاری:

{بارگذاری} «جداسازی» «تخلیه»

۳- مسیر عبور کالاهای محلی از ایستگاه‌های کاری: {بارگذاری

{تخلیه}

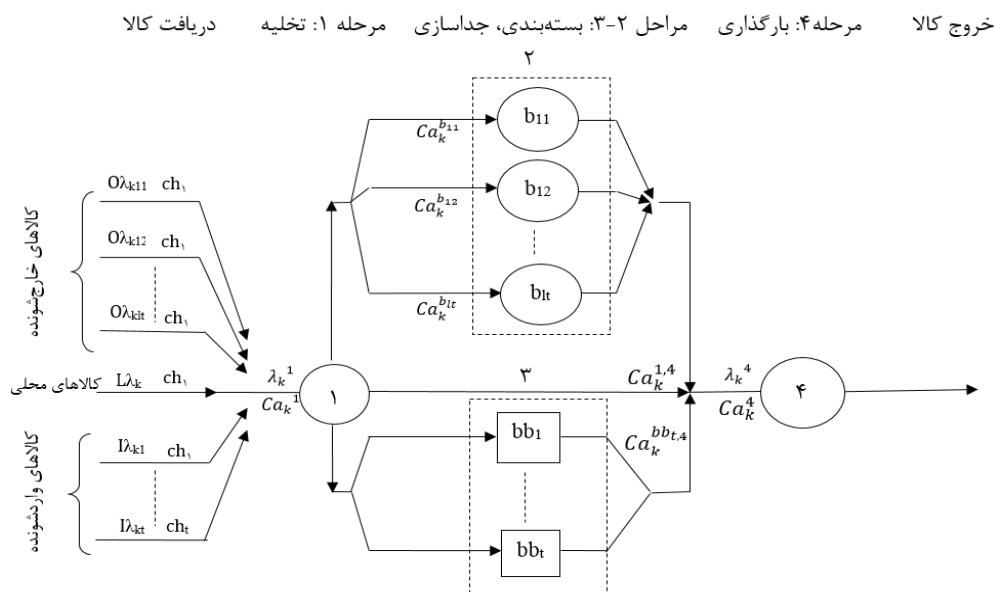
نرخ ورود کالاهای مختلف به هر هاب مرکزی از طریق فرمول‌های (۱) تا (۳) قابل محاسبه است. در این فرمول‌ها  $D$  تعداد روزهای کاری در سال و  $W_{im}$  جریان سالانه کالا از گره  $i$  به گره  $m$  است. در روابط ((۴)) تا ((۸)) نیز فرمول‌های محاسبه پارامترهای مدل صف در ایستگاه‌های مختلف ارائه شده است. در ایستگاه دوم (بسته‌بندی) بعد از تخلیه، کالاهای خارج شونده به ایستگاه بسته‌بندی فرستاده می‌شوند. در هر قسمت این ایستگاه کالاهای با ویژگی‌های مشابه در بسته‌های  $pa^t$  تایی قرار می‌گیرند و به ایستگاه بارگذاری فرستاده می‌شوند. بنابراین هر کالا که به ایستگاه بسته‌بندی ارسال می‌شود، منتظر می‌ماند تا کالاهای با ویژگی‌های مشابه برسند و بسته  $pa^t$  تایی تکمیل شود. کل زمان انتظار برای تکمیل یک بسته  $pa^t$  تایی با رابطه (۹) و متوسط زمان انتظار برای یک کالا در یک ایستگاه  $b_{it}$   $pa^t$  تایی با رابطه (۱۰) محاسبه می‌شوند.

فرض می‌شود که زمان پردازش و تغییرات زمان پردازش  $CS_k^0$  ایستگاه  $o$  در هاب  $k$  مستقل از نوع کالا است. هر کدام از کالاهای خارج شونده با سه تایی  $(k, l, t)$  مشخص می‌شوند. سه تایی مذکور مشخص می‌کند کالای مورد نظر به هاب مرکزی  $k$  رسیده و از طریق شیوع حمل و نقل  $t$  به هاب  $l$  ارسال می‌شود. کالاهای وارد شونده نیز از طریق دوتایی  $(k, t)$  طبقه بندی شده‌اند که نشان می‌دهد کالای مورد نظر از طریق شیوع حمل و نقل  $t$  به هاب مرکزی  $k$  رسیده است. همچنین تمام کالاهای محلی در یک طبقه قرار گرفته و با یک تایی  $(k)$  نشان داده می‌شوند.

شکل ۲ ایستگاه‌های کاری و عملیات انجام شده بر روی کالاهای مختلف را در هاب مرکزی نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۲ مشخص است هر هاب مرکزی دارای یک ایستگاه تخلیه و یک ایستگاه بارگذاری است. همچنین هر هاب مرکزی دارای یک ایستگاه بسته‌بندی و جداسازی نیز است که در این ایستگاه‌ها قسمت‌های مختلف بسته‌بندی و جداسازی برای کالاهای مخصوص در نظر گرفته شده است. با این توجیه می‌توان مدل صف را تک سرور در نظر گرفت و از مدل  $GI/G/1$  برای فرموله کردن آن استفاده کرد [Ishfaq and Sox, 2009].

۱- مسیر عبور کالاهای خارج شونده از ایستگاه‌های کاری:

{بارگذاری} «بسته‌بندی» «تخلیه»



شکل ۲. سیستم صف عملیات هاب مرکزی



## ارائه الگوریتم ترکیبی برای مسئله مکان‌یابی هاب در شبکه حمل و نقل چندوجهی

است. تغییرپذیری بین ورود به ایستگاه بعدی (بارگذاری) از فرمول‌های (۱۲) تا (۱۸) به دست می‌آید. پس از این محاسبات بایستی مدت زمان انتظار در ایستگاه‌های مختلف محاسبه شود. در این قسمت متوسط زمان انتظار هر کالا در ایستگاه‌های مختلف با استفاده از روابط (۱۹) تا (۲۱) محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که هر کدام از کالاها مسیر مشخصی را در داخل هاب طی می‌کنند.

در ایستگاه بسته‌بندی فقط زمان انتظار داریم و زمان پردازش صفر است زیرا بسته به محض تکمیل شدن به ایستگاه بعد فرستاده می‌شود. تغییرپذیری ورود به هر ایستگاه  $b_{lt}$  از فرمول (۱۱) به دست می‌آید. در ایستگاه سوم (جداسازی) کالاهای خارج شونده بعد از تخلیه به ایستگاه جداسازی ارسال و سپس به ایستگاه بارگذاری منتقل می‌گردند. هر کالا که از ایستگاه جداسازی عبور می‌کند دارای یک زمان تأخیر ثابت

$$O\lambda_{klt} = \frac{1}{D} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{m \in N \\ m \neq i}} W_{im} y_{imkl}^t \quad \forall k, l \in C (k \neq l), t \in T \quad (1)$$

$$I\lambda_{kt} = \frac{1}{D} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{m \in N \\ m \neq i}} \sum_{l \in C} W_{im} y_{imlk}^t \quad \forall k \in C, t \in T \quad (2)$$

$$L\lambda_k = \frac{1}{D} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{m \in N \\ m \neq i}} W_{im} y_{imkk}^1 \quad \forall k \in C \quad (3)$$

$$\lambda_k^1 = \sum_{l \in C} \sum_{t \in T} O\lambda_{klt} + L\lambda_k + \sum_{t \in T} I\lambda_{kt} \quad \forall k \in C \quad (4)$$

$$Ca_k^1 = wq_k^1 \left[ \sum_{l \in C} \sum_{t \in T} \frac{O\lambda_{klt}}{\lambda_k^1} ch_t + \frac{L\lambda_k}{\lambda_k^1} ch_t + \sum_{t \in T} \frac{I\lambda_{kt}}{\lambda_k^1} ch_t \right] + 1 - wq_k^1 \quad \forall k \in C \quad (5)$$

$$wq_k^1 = [1 + 4(1 - \rho_k^1)^2 (v_k^1 - 1)]^{-1} \quad \forall k \in C \quad (6)$$

$$v_k^1 = \left[ \sum_{l \in C} \sum_{t \in T} \left( \frac{O\lambda_{klt}}{\lambda_k^1} \right)^2 + \left( \frac{L\lambda_k}{\lambda_k^1} \right)^2 + \sum_{t \in T} \left( \frac{I\lambda_{kt}}{\lambda_k^1} \right)^2 \right]^{-1} \quad \forall k \in C \quad (7)$$

$$\rho_k^1 = \frac{\lambda_k^1}{\mu_k^1}, \quad cd_k^1 = (\rho_k^1)^2 Cs_k^1 + (1 - (\rho_k^1)^2) Ca_k^1 \quad \forall k \in C \quad (8)$$

$$[(pa^t - 1) + (pa^t - 2) + \dots + 1] \frac{1}{O\lambda_{klt}} = \frac{(pa^t - 1)pa^t}{2 O\lambda_{klt}} \quad \forall k, l \in C, t \in T \quad (9)$$

$$wa_k^{b_{lt}} = \frac{pa^t - 1}{2 O\lambda_{klt}} \quad \forall k, l \in C, t \in T \quad (10)$$

$$Ca_k^{b_{lt}} = \frac{O\lambda_{klt}}{\lambda_k^1} cd_k^1 + \left( 1 - \frac{O\lambda_{klt}}{\lambda_k^1} \right) \left( \frac{O\lambda_{klt}}{\lambda_k^1} \right) + \left( 1 - \frac{O\lambda_{klt}}{\lambda_k^1} \right) ch_t \quad \forall k, l \in C (k \neq l), t \in T \quad (11)$$

$$Ca_k^{bb_{t,4}} = \frac{I\lambda_{kt}}{\lambda_k^1} cd_k^1 + \left( 1 - \frac{I\lambda_{kt}}{\lambda_k^1} \right) \left( \frac{I\lambda_{kt}}{\lambda_k^1} \right) + \left( 1 - \frac{I\lambda_{kt}}{\lambda_k^1} \right) ch_t \quad \forall k \in C, t \in T \quad (12)$$

$$\lambda_k^4 = \sum_{l \in C} \sum_{t \in T} O\lambda_{klt} + L\lambda_k + \sum_{t \in T} I\lambda_{kt} \quad \forall k \in C \quad (13)$$

$$Ca_k^4 = wq_k^4 \left[ \sum_{l \in C} \sum_{t \in T} \left( \frac{O\lambda_{klt}}{\lambda_k^4 pa^t} Ca_k^{b_{lt}} \right) + \left( \frac{L\lambda_k}{\lambda_k^4} Ca_k^{1,4} \right) + \sum_{t \in T} \left( \frac{I\lambda_{kt}}{\lambda_k^4} Ca_k^{bb_{t,4}} \right) \right] + 1 - wq_k^4 \quad \forall k \in C \quad (14)$$

$$wq_k^4 = [1 + 4(1 - \rho_k^4)^2 (v_k^4 - 1)]^{-1} \quad \forall k \in C \quad (15)$$

$$v_k^4 = \left[ \sum_{l \in C} \sum_{t \in T} \left( \frac{O\lambda_{klt}}{\lambda_k^4} \right)^2 + \left( \frac{L\lambda_k}{\lambda_k^4} \right)^2 + \sum_{t \in T} \left( \frac{I\lambda_{kt}}{\lambda_k^4} \right)^2 \right]^{-1} \quad \forall k \in C \quad (16)$$

$$\rho_k^4 = \frac{\lambda_k^4}{\mu_k^4} \quad \forall k \in \mathcal{C} \quad (17)$$

$$Ca_k^{1,4} = \frac{L\lambda_k}{\lambda_k^1} cd_k^1 + \left(1 - \frac{L\lambda_k}{\lambda_k^1}\right) \left(\frac{L\lambda_k}{\lambda_k^1}\right) + \left(1 - \frac{L\lambda_k}{\lambda_k^1}\right) ch_1 \quad \forall k \in \mathcal{C} \quad (18)$$

$$wa_k^1 = \left(\frac{Ca_k^1 + Cs_k^1}{2}\right) \left(\frac{\lambda_k^1}{\mu_k^1(\mu_k^1 - \lambda_k^1)}\right) g(\rho_k^1, Ca_k^1, Cs_k^1) \quad \forall k \in \mathcal{C}$$

$$\begin{aligned} \text{if } Ca_k^1 < 1 &\rightarrow g(\rho_k^1, Ca_k^1, Cs_k^1) = e^{\frac{-2(1-\rho_k^1)(1-ca_k^1)^2}{3\rho_k^1(Ca_k^1+Cs_k^1)}} \\ \text{if } Ca_k^1 \geq 1 &\rightarrow g(\rho_k^1, Ca_k^1, Cs_k^1) = 1 \end{aligned} \quad (19)$$

$$wa_k^{bbt} = \xi \quad \forall k \in \mathcal{C} \quad (20)$$

$$wa_k^4 = \left(\frac{Ca_k^4 + Cs_k^4}{2}\right) \left(\frac{\lambda_k^4}{\mu_k^4(\mu_k^4 - \lambda_k^4)}\right) g(\rho_k^4, Ca_k^4, Cs_k^4) \quad \forall k \in \mathcal{C}$$

$$\begin{aligned} \text{if } Ca_k^4 < 1 &\rightarrow g(\rho_k^4, Ca_k^4, Cs_k^4) = e^{\frac{-2(1-\rho_k^4)(1-ca_k^4)^2}{3\rho_k^4(Ca_k^4+Cs_k^4)}} \\ \text{if } Ca_k^4 \geq 1 &\rightarrow g(\rho_k^4, Ca_k^4, Cs_k^4) = 1 \end{aligned} \quad (21)$$

#### ۴. روش حل پیشنهادی

به جواب همسایه  $S'$  حرکت می‌کند. حال در فاز جستجوی همسایگی به روی جواب همسایه  $S'$  جستجوی همسایگی صورت می‌گیرد تا بهینه محلی  $S^{*}$  به دست آید. جستجوی همسایگی در الگوریتم پیشنهادی براساس روش شبیه‌سازی تبرید و با استفاده از ساختار همسایگی  $\lambda_m$  به عنوان عملگر حرکتی برای حرکت به نقاط همسایه صورت می‌گیرد. در اینجا طول زنجیره مارکوف برای جستجوی همسایگی در الگوریتم پیشنهادی با یک ساختار همسایگی مشخص برابر تعداد  $N$  تکرار متوالی بدون بهبود در تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. فرآیند بهینه‌سازی در شبیه‌سازی تبرید، جستجو برای یک جواب (نزدیک به) کمینه سراسری است. الگوریتم از یک جواب تصادفی به عنوان جواب اولیه حرکت خود را آغاز می‌کند و دمای سیستم برابر دمای اولیه قرار می‌گیرد ( $T=T_0$ ). در هر تکرار یک جواب همسایه جواب فعلی به دست می‌آید. مقدار تابع هدف جواب جدید با جواب فعلی مقایسه می‌شود. اگر جواب بدتر بود با یک احتمال که از تابع بالتزمن به دست می‌آید، جایگزین جواب فعلی می‌شود. این مکانیزم منجر می‌شود که الگوریتم در بهینه محلی گیر نیافتد. در این رابطه  $\Delta$  برابر میزان اختلاف مقدار تابع هدف جواب فعلی با جواب جدید است،  $K$  ضریب بالتزمن است که از قبل تعیین می‌شود و  $T$  نیز دمای فعلی

در این بخش و با توجه به پیچیدگی مسئله مورد بررسی برای اولین بار در این تحقیق یک الگوریتم ترکیبی پیشنهاد شده است. رویکرد پیشنهادی برای حل مدل ارائه شده، روشی بر مبنای الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر است. این الگوریتم برای حل مدل مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی، اولین بار توسط داوری و زرندی [Davari and Fazel Zarandi, 2012] ارائه گردید. در این الگوریتم ابتدا به صورت تصادفی جواب اولیه برای شروع الگوریتم پیشنهادی به دست می‌آید و سپس جواب اولیه ( $S_0$ ) به عنوان جواب فعلی الگوریتم قرار می‌گیرد. حال الگوریتم اصلی که بر مبنای الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر است، آغاز می‌شود. در چارچوب الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر، برای جستجوی بهتر فضای جواب از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده می‌کنیم. در ابتدا الگوریتم کار خود را با بدست آوردن جواب اولیه ( $S_0$ ) آغاز می‌کند. جواب اولیه به عنوان جواب فعلی سیستم قرار می‌گیرد ( $S=S_0$ ). برای حل مسئله از سه ساختار همسایگی استفاده می‌شود. شروع الگوریتم با ساختار همسایگی اول، یعنی  $l=1$  است. ابتدا در فاز پرش بر اساس ساختار همسایگی  $\lambda_m$  الگوریتم از جواب فعلی  $S$

## ارائه الگوریتم ترکیبی برای مسئله مکان‌یابی هاب در شبکه حمل و نقل چندوجهی

است. فرآیند جستجوی همسایگی ادامه می‌یابد تا زمانیکه تعداد تکرارها به مقداری از پیش تعیین شده برسد. پس از آن دمای سیستم کاهش می‌یابد. این فرآیند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که الگوریتم به معیار خاتمه برسد.

### ۴-۱ نمایش جواب اولیه

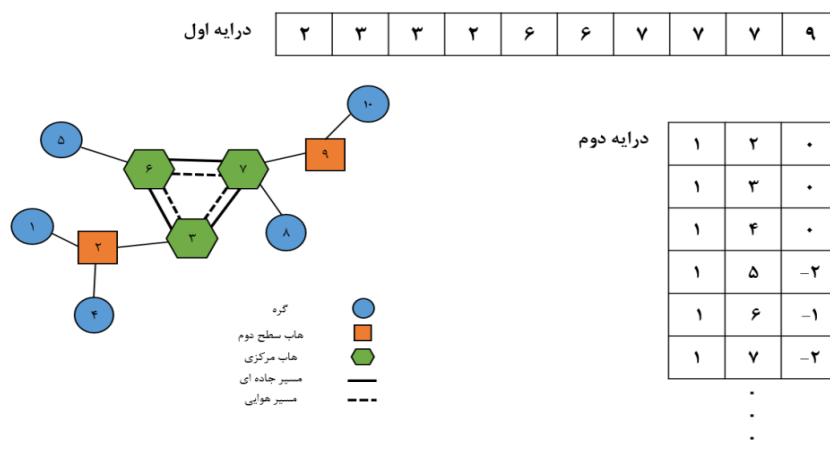
در ابتدای طراحی هر الگوریتم بایستی نحوه کد کردن جواب در فضای روش حل الگوریتم مشخص گردد. در الگوریتم پیشنهادی در این مقاله نیز این موضوع به دلیل ساختار مسئله مورد بررسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین در این بخش به نحوه نمایش جواب اولیه مسئله می‌پردازیم. همانطور که از شکل ۳ مشخص است هر جواب از دو آرایه تشکیل شده است. آرایه اول شامل مکان‌یابی هاب‌ها و تخصیص گره‌ها به این هاب‌ها است. آرایه دوم نیز نوع حمل و نقل بین هاب‌های مرکزی به ازای هر جفت گره مبدأ/ مقصد را نشان می‌دهد.

آرایه اول یک ماتریس  $1 \times n$  است که  $n$  تعداد کل گره‌های شبکه حمل و نقل را نشان می‌دهد. هر درآیه از ماتریس نمایانگر گره مربوط به آن درآیه است. به عنوان مثال درآیه اول نشان‌دهنده گره اول، درآیه دوم نمایانگر گره دوم و به همین ترتیب تا گره دهم ادامه پیدا می‌کند. عددی که در هر درآیه قرار می‌گیرد بدین معنی است که درآیه (گره) مورد نظر به آن هاب تخصیص داده شده است. همانطور که از شکل ۳ مشخص است عدد ۲ در درآیه اول بدین معنی است که گره اول به هاب ۲ تخصیص داده شده است، عدد ۳ در درآیه دوم نشان‌دهنده تخصیص هاب ۲ به هاب مرکزی ۳ است، و به همین ترتیب می‌توان سایر تخصیص‌ها را در شبکه مورد نظر تعیین کرد. اگر عددی که در هر درآیه قرار می‌گیرد با شماره آن درآیه برابر باشد، گره مورد نظر یک هاب مرکزی است. با توجه به آرایه اول اعداد ۳، ۶، ۷ در درآیه‌های هم شماره خود قرار گرفته‌اند، بنابراین گره‌های مورد نظر هاب مرکزی هستند. همچنین به دلیل اینکه هیچ دو هاب سطح دویی مستقیماً به هم متصل نیستند، لذا هاب‌های سطح دو بایستی به یکی از هاب‌های مرکزی تخصیص داده شوند. با توجه به آرایه دوم می‌توان دریافت که به منظور جابجایی کالا بین هر جفت گره مبدأ/ مقصد از چه مسیری بین هاب‌های مرکزی استفاده می‌شود. بنابراین این آرایه بایستی شامل تمامی جفت گره‌ها باشد که در ستون اول و دوم آورده شده‌اند. در یک شبکه با  $n$  گره، به تعداد  $n(n-1)$

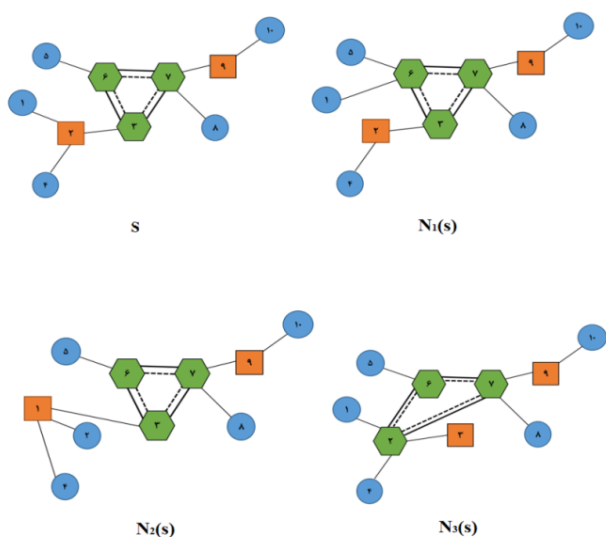
جفت گره متمایز خواهیم داشت. بنابراین آرایه دوم یک ماتریس  $3 \times (n-1) \times n$  است که ستون اول گره‌های مبدأ، ستون دوم گره‌های مقصد و ستون سوم نوع مسیر حمل و نقل بین هاب‌های مرکزی به ازای هر جفت گره مبدأ/ مقصد را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات فوق ذکر نکات ذیل ضروری است:

- ✓ اگر در مسیر بین گره مبدأ و مقصد، هاب مرکزی وجود نداشته باشد، درآیه سوم از سطر مورد نظر صفر است.
- ✓ اگر در مسیر بین گره مبدأ و مقصد، یک هاب مرکزی مستقر باشد، درآیه سوم از سطر مورد نظر ۱- است.
- ✓ اگر در مسیر بین گره مبدأ و مقصد، دو هاب مرکزی وجود داشته باشد، درآیه سوم از سطر مورد نظر می‌تواند ۱- و یا ۲- باشد.

همچنین ذکر این نکته لازم است که اگر مسیر بین دو هاب مرکزی جاده‌ای باشد  $t=1$ ، و اگر هوایی  $t=2$  خواهد بود. حال این سؤال پیش می‌آید که چگونه مسیر بین هر جفت گره و به تبع آن شیوه حمل و نقل بین هاب‌های مرکزی تعیین می‌شود؟ برای پاسخ به این سؤال یکی از سطرهای آرایه دوم، به عنوان مثال سطر چهارم را در نظر می‌گیریم. درآیه اول و دوم این سطر به ترتیب نشانگر گره‌های مبدأ و مقصد هستند. بنابراین می‌خواهیم به این سؤال پاسخ دهیم که به منظور جابجایی از گره ۱ به گره ۵ از چه شیوه حمل و نقلی بین هاب‌های مرکزی مربوطه استفاده می‌کنیم؟ بدین منظور ابتدا باید بدانیم گره‌های فوق به طور مستقیم یا غیر مستقیم، به چه هاب‌های مرکزی تخصیص داده شده‌اند. لذا درآیه‌های ۱ و ۵ از آرایه اول را بررسی می‌کنیم. همانطور که مشخص است گره ۵ به هاب مرکزی ۶ و گره ۱ به هاب سطح دوم ۲ تخصیص داده شده است. همچنین هاب ۲ نیز به هاب مرکزی ۳ تخصیص داده شده است. بنابراین گره ۵ به طور مستقیم و گره ۱ به طور غیر مستقیم و از طریق هاب سطح دو ۲ به هاب مرکزی ۳ تخصیص داده شده‌اند. با توجه به توضیحات فوق به این نتیجه می‌رسیم که مسیر بین گره‌های ۱ و ۵ شامل دو هاب مرکزی است، لذا در درآیه سوم باید یکی از دو عدد ۲- و ۱- که نشانگر مسیر هوایی و جاده‌ای است، قرار گیرد. این تصمیم‌گیری با در نظر گرفتن هزینه‌ها و زمان انتقال کالا توسط مدل اتخاذ می‌گردد. می‌توان برای سایر جفت گره‌ها نیز به همین روش، مسیر بین هاب‌های مرکزی را نشان داد.



شکل ۳. نحوه نمایش جواب اولیه مدل پیشنهادی



شکل ۴. سه ساختار همسایگی مسئله روی یک جواب نمونه

[Zarandi, 2012] حداکثر مقدار برای  $\pi$  برابر ۳ در نظر گرفته شده است. ساختار همسایگی دوم ( $N_2$ ) حاصل تغییر نقش گره  $i \in N/H$  و هاب  $j \in H$  و در نهایت ساختار همسایگی سوم ( $N_3$ ) حاصل تغییر نقش هاب سطح دوم  $i \in H/C$  و هاب مرکزی  $j \in C$  است. همچنین ساختار همسایگی اول در فاز جستجوی محلی و دو ساختار بعدی در فاز پرش به کار می‌روند. در هر ساختار بعد از تعیین مکان هاب‌ها و تخصیص گره‌ها به این مراکز، مسیرهای بین هاب‌های مرکزی به ازای هر جفت گره مبدأ/مقصد بروز خواهد شد. در هر جواب در صورتی که مسیر بین جفت گره مبدأ/مقصد شامل دو هاب مرکزی باشد، آنگاه با

#### ۴-۲ ساختارهای همسایگی

در بخش "جستجوی محلی بر روی 'S' در الگوریتم پیشنهادی از سه ساختار همسایگی استفاده می‌شود.

شکل ۴ ساختارهای همسایگی را نشان می‌دهد. همانطور از شکل ۴ مشخص است سه ساختار همسایگی برای هر جواب در نظر گرفته شده است. ساختار اول ( $N_1$ ) حاصل تغییر تخصیص گره‌های  $i \in N/H$  از هاب  $j \in H$  به هاب  $k \in H$  است. هر جواب جدید حاصل از این ساختار همسایگی، شامل تغییر تخصیص  $\pi$  گره است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته توسط داوری و زرنندی [Davari and Fazel

## ارائه الگوریتم ترکیبی برای مسئله مکان‌یابی هاب در شبکه حمل و نقل چندوجهی

صحت مدل‌های ارائه شده را بررسی کرد، حل آن در مثال‌های کوچک و با استفاده از نرم افزار بهینه‌سازی گمز است. بر همین اساس در این پژوهش سعی شده با به کارگیری مثال‌های مختلف، صحت مدل ارائه شده از طریق بررسی رفتار منطقی مدل، ارزیابی شود. از طرفی پس از بررسی صحت مدل لازم است کارایی مدل‌های پیشنهادی با مقایسه نتایج بدست آمده از آن و مدل‌های پیشین برای داده‌های مشابه مورد ارزیابی قرار گیرد و در نهایت با انجام تحلیل حساسیت مختلف به کمک تغییر هدفمند برخی از پارامترها در مثال‌های گوناگون درک بهتری از عملکرد مدل پیشنهادی ارائه شود. از همین رو، این بخش شامل دو قسمت برای مدل پیشنهادی است که به ترتیب صحت و کارایی آن را مورد بررسی قرار می‌دهد. ابتدا با استفاده از داده‌های تصادفی، مثال‌هایی در اندازه کوچک تولید و در نرم‌افزار گمز حل شده است. پس از اطمینان از صحت مدل و به دلیل آن‌که نرم‌افزار گمز قادر به حل این مسئله در اندازه‌های بزرگ نیست، مقایسات در اندازه‌های بزرگ با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری صورت گرفته است. در این بخش جهت اطمینان از کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج طی چند مرحله مورد تحلیل و با الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر که توسط داوری و زرنندی [Davari and Fazel Zarandi, 2012] برای حل مسئله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی ارائه گردیده، مقایسه شده است.

### ۵-۱. تنظیم پارامترهای الگوریتم با روش تاگوچی

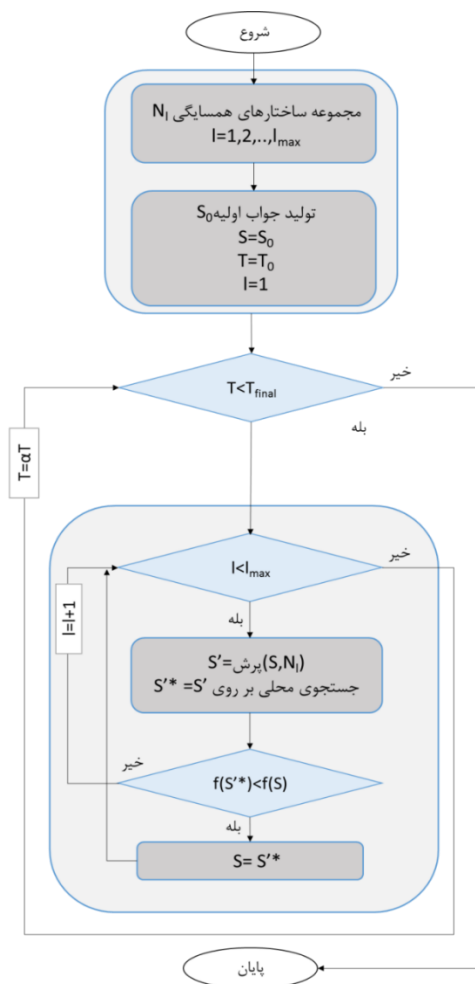
تنظیم مناسب پارامترها و انتخاب درست عملگرها در الگوریتم-های فراابتکاری تأثیر بسزایی بر عملکرد آنها دارد که می‌بایست با توجه به شرایط مسأله مورد بررسی، تعیین گردد. با این وجود بیشتر محققین این تنظیمات را با استفاده از مقادیر مرجع که در مقالات مشابه پیشنهاد شده انجام می‌دهند. از آنجایی که روش فاکتوریل برای تنظیم پارامتر نیاز به زمان و هزینه بیشتری دارد؛ در این تحقیق از روش تاگوچی جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم مورد بررسی، استفاده شده است.

در روش تاگوچی توابع هدف به سه نوع مقدار کوچکتر بهتر، مقدار بزرگتر بهتر و مقدار اسمی بهتر تقسیم می‌شوند. در اینجا میانگین درصد انحراف نسبی<sup>۹</sup> (RPD) به‌عنوان معیار عملکرد در نظر گرفته شده است که با توجه به آن نوع هدف مقدار

توجه به هزینه‌ها و محدودیت‌های زمانی، یکی از این مسیرها انتخاب خواهد شد.

### ۴-۲. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵. فلوچارت الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

### ۵. نتایج محاسباتی

در این بخش نتایج محاسباتی مسئله در اندازه‌های مختلف ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش اندازه مسئله نرم-افزارهای بهینه‌سازی قادر به حل مدل نبوده و الگوریتم‌های فراابتکاری برای اندازه‌های مختلف توسط نرم افزار MATLAB 14.a کد شده و بر روی کامپیوتر با پردازشگر 2.66 GHz و 8 G حافظه اجراء شده است.

پس از معرفی مدل پیشنهادی، لازم است ابتدا صحت آن مورد ارزیابی قرار گیرد. یکی از روش‌هایی که به کمک آن می‌توان

|   |               |               |
|---|---------------|---------------|
| ۴ | {۲۰۵,۷,۱۰}    | زنجیره مارکوف |
| ۴ | {۰,۱۰,۲۰,۵,۱} | ضریب بالتزمن  |

به منظور تعیین سطوح مطلوب و اقتصادی پارامترهای الگوریتم ترکیبی پیشنهادی با توجه به سطوح تعریف شده فوق در حالت معمول لازم است تعداد (۱۰۲۴=۴×۴×۴×۴×۴) آزمایش انجام شود که نیازمند صرف هزینه و زمان بالایی است. به همین منظور از طرح تاگوچی  $L_{16}$  برای انتخاب سطوح بهینه و اقتصادی پارامترها استفاده شده است. برای هر ترکیب متفاوت از سطوح پارامترها؛ مثال مورد نظر پنج بار توسط الگوریتم اجرا شده است. در این قسمت با توجه به تحلیل‌های مربوط به روش تاگوچی به بررسی عوامل مختلف تأثیرگذار بر هزینه‌های سیستم مورد انتظار پرداخته می‌شود. در روش تاگوچی با استفاده از نسبت سیگنال- نویز به بررسی پراکندگی عوامل مختلف در سطوح مختلف پرداخته می‌شود. شکل ۶ متوسط مربوط به سیگنال- نویز را نشان می‌دهد.

#### ۲-۵ شاخصهای مقایسه

جدول ۳. سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم ترکیبی

| پارامتر       | مقدار بهینه |
|---------------|-------------|
| دمای اولیه    | ۵۰          |
| ضریب کاهش دما | ۰/۹۹        |
| دمای پایانی   | ۰/۱         |
| زنجیره مارکوف | ۵           |
| ضریب بالتزمن  | ۰/۱         |

طبق رابطه (۲۲) مقادیر بالاتر متغیر پاسخ سیگنال- نویز یک سطح؛ نشان دهنده مطلوبیت بیشتر آن سطح نسبت به سایر سطوح است بنابراین سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم ترکیبی مطابق جدول ۳ خواهد بود.

در اینجا مبنای مقایسات بر اساس معیارهای استاندارد موجود در ابتدای در اعتبار سنجی الگوریتم‌ها است. شاخص‌های مقدار انحراف از بهترین جواب و میانگین تابع هدف و بازه حداقل اختلاف معنادار بصورت زیر تعریف می‌شود

بزرگتر- بهتر در روش تاگوچی برای آن مناسب است. مقادیر نرخ S/N در این حالت از رابطه زیر به دست می‌آیند.

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (22)$$

این نسبت برای هر سطح از فاکتورها محاسبه می‌شود که  $n$  تعداد آزمایشات با یک سطح از یک فاکتور مشخص، و  $y_i$  مقدار معیار عملکرد است. انتخاب پارامترهای مربوط به الگوریتم، کیفیت نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در الگوریتم شبیه‌سازی تیرید چهار پارامتر مهم ضریب کاهش دما در هر مرحله، دمای اولیه، جمعیت اولیه و تعداد تکرار وجود دارد. پارامتر ضریب کاهش دما در واقع نحوه کاهش در فضای جستجو را تعیین می‌کند. هرچه این مقدار کمتر باشد الگوریتم جواب‌های بیشتری را بررسی می‌کند. دمای اولیه هم مانند پارامتر ضریب کاهش دما هرچه بیشتر باشد، الگوریتم جواب‌های بیشتری را مورد بررسی قرار داده ولی بالا بودن دما باعث می‌شود که الگوریتم در زمان قابل قبولی جواب نزدیک به جواب بهینه را به ما ندهد.

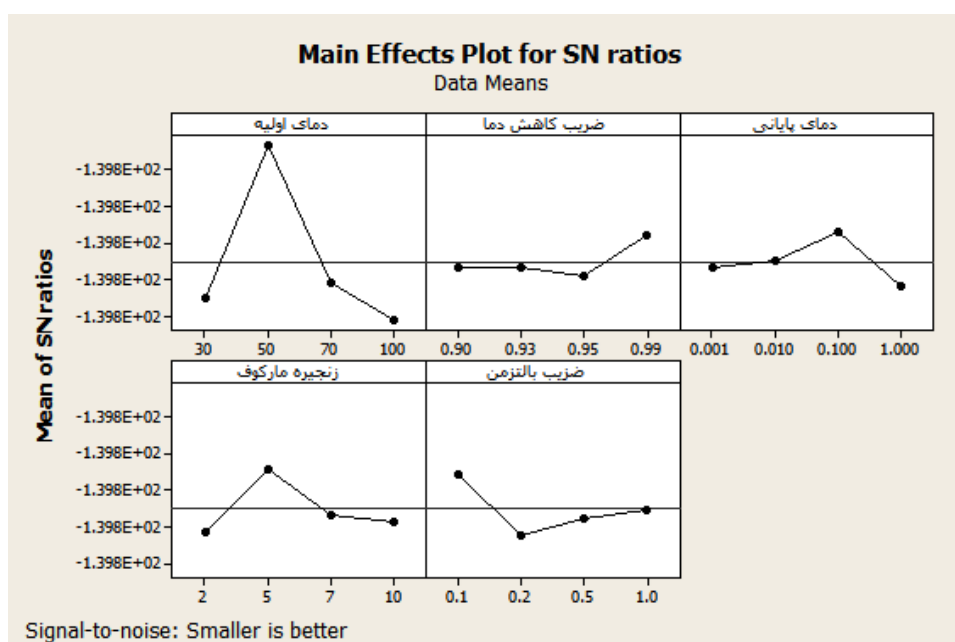
برای تنظیم پارامترهای الگوریتم که موجب افزایش کارایی آن می‌شود، برای عوامل آورده شده در فوق سطوحی در نظر گرفته می‌شود. سپس به ازای هر سطح از پارامترها برنامه ۵ بار اجرا و متوسط جواب‌ها محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از نتایج بدست آمده در نرم افزار Minitab به تجزیه و تحلیل و محاسبات لازم پرداخته می‌شود. بنابراین برای یک مثال تصادفی مقادیر مختلف فاکتورهای نام برده مورد آزمایش قرار می‌گیرد که در اینجا سومین مثال با اندازه بزرگ برای تنظیم پارامتر انتخاب شده است.

عوامل مؤثر بر عملکرد الگوریتم ترکیبی جستجوی همسایگی متغیر- شبیه‌سازی تیرید و سطوح آنها بر اساس مقالات انجام گرفته در این زمینه در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. عوامل مؤثر بر عملکرد الگوریتم ترکیبی و سطوح آنها

| فاکتور        | سطح‌ها                | تعداد سطوح |
|---------------|-----------------------|------------|
| دمای اولیه    | {۳۰,۵۰,۷۰,۱۰۰}        | ۴          |
| ضریب کاهش دما | {۰,۹۰,۰,۹۳,۰,۹۵,۰,۹۹} | ۴          |
| دمای پایانی   | {۰,۰۰۱,۰,۰۰۱,۰,۰۱,۱}  | ۴          |

ارائه الگوریتم ترکیبی برای مسئله مکان‌یابی هاب در شبکه حمل و نقل چندوجهی



شکل ۶. متوسط مربوط به سیگنال- نویز برای الگوریتم ترکیبی

$$GAP_A = \frac{\text{بهترین مقدار کشف شده توسط الگوریتم A} - \text{بهترین مقدار کشف شده مسئله}}{\text{بهترین مقدار کشف شده مسئله}} \times 100$$

$$RPD_A = \frac{\text{بهترین مقدار کشف شده توسط الگوریتم A} - \text{بهترین مقدار کشف شده توسط الگوریتم‌ها}}{\text{بهترین مقدار کشف شده مسئله}} \times 100$$

مطابق ایشفاق و کارلس [Ishfaq and Sox, 2009] به شرح جدول ۴ تولید و نتایج در جدول ۵ شامل مقدار تابع هدف، زمان حل مدل، هاب‌های مرکزی و هاب‌های سطح دوم است، ارائه شده است.

### ۳-۵ نتایج عددی در ابعاد کوچک مسئله

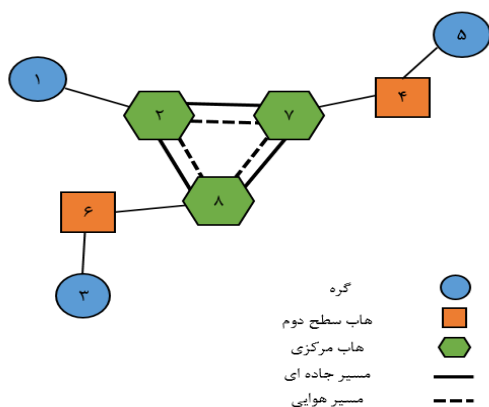
در این قسمت به منظور حل مدل در اندازه‌های کوچک از نرم‌افزار گمز استفاده شده است. چندین مثال عددی با داده‌های

جدول ۴. مثال‌های عددی تولید شده در اندازه کوچک

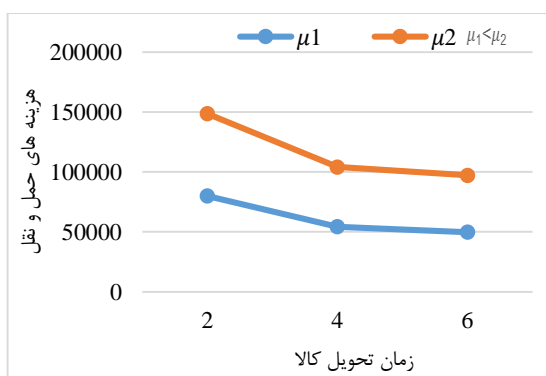
| $Tm_{im}^2$<br>(uniform) | $Tm_{im}^1$<br>(uniform) | $Co_{im}^2$<br>(uniform) | $Co_{im}^1$<br>(uniform) | $W_{im}$<br>(uniform) | $pc$ | $p$ | $n$ | مثال |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|------|-----|-----|------|
| (۱,۴)                    | (۱,۸)                    | (۱,۱۰)                   | (۱,۵)                    | (۱,۵۰)                | ۱    | ۱   | ۶   | ۱    |
| (۱,۸)                    | (۱,۱۶)                   | (۱,۱۵)                   | (۱,۱۰)                   | (۱,۵۰)                | ۱    | ۲   | ۶   | ۲    |
| (۱,۱۲)                   | (۱,۲۴)                   | (۱,۲۵)                   | (۱,۱۵)                   | (۱,۱۰۰)               | ۲    | ۲   | ۷   | ۳    |
| (۱,۱۲)                   | (۱,۳۶)                   | (۱,۳۰)                   | (۱,۲۰)                   | (۱,۱۰۰)               | ۱    | ۲   | ۷   | ۴    |
| (۱,۸)                    | (۱,۱۲)                   | (۱,۱۵)                   | (۱,۵)                    | (۱,۱۵۰)               | ۲    | ۲   | ۸   | ۵    |
| (۱,۴)                    | (۱,۱۲)                   | (۱,۲۰)                   | (۱,۱۰)                   | (۱,۱۵۰)               | ۲    | ۳   | ۸   | ۶    |
| (۱,۸)                    | (۱,۱۶)                   | (۱,۱۰)                   | (۱,۵)                    | (۱,۱۵۰)               | ۱    | ۲   | ۱۰  | ۷    |
| (۱,۱۶)                   | (۱,۲۴)                   | (۱,۲۰)                   | (۱,۱۰)                   | (۱,۲۰۰)               | ۲    | ۳   | ۱۰  | ۸    |
| (۱,۱۶)                   | (۱,۳۶)                   | (۱,۲۵)                   | (۱,۱۵)                   | (۱,۱۵۰)               | ۱    | ۳   | ۱۵  | ۹    |
| (۱,۱۲)                   | (۱,۲۴)                   | (۱,۳۰)                   | (۱,۲۰)                   | (۱,۲۰۰)               | ۳    | ۴   | ۲۵  | ۱۰   |

جدول ۵. نتایج حاصل از مثال‌های عددی تولید شده

| مثال | هاب‌های سطح دوم  | هاب‌های مرکزی | مقدار تابع هدف | زمان حل (ثانیه) |
|------|--|---------------|----------------|-----------------|
| ۱    | ۲  | ۵             | ۲۱۰۴۸/۳        | ۳۷              |
| ۲    | ۳،۴  | ۲             | ۲۴۵۷۴/۷۴       | ۴۹              |
| ۳    | ۱،۲  | ۶،۷           | ۳۳۰۹۷/۰۰       | ۸۳              |
| ۴    | ۱،۲  | ۵             | ۳۴۵۳۵/۷۵۳      | ۲۱۵             |
| ۵    | ۱،۲  | ۵،۷           | ۳۷۷۲۸/۵۷۴      | ۲۸۵             |
| ۶    | ۲،۷،۸  | ۴،۶           | ۴۵۲۵۴/۰۶       | ۳۱۰             |
| ۷    | ۴،۱۰   | ۸             | ۴۸۲۹۰/۹۶       | ۳۵۷             |
| ۸    | ۲،۷،۹  | ۸،۱۰          | ۶۹۰۸۴/۶۸       | ۶۴۹             |
| ۹    | ۳،۵،۱۴   | ۱۰            | ۷۲۴۴۰/۱۶       | ۷۱۲             |
| ۱۰   | به دلیل افزایش اندازه مسئله نرم‌افزار گمز قادر به حل نیست. |               |                |                 |



شکل ۷. نمایش شبکه پیشنهادی مثال ۶ جدول ۴



شکل ۸. تحلیل مدل با تغییر پارامترهای مهم صف

در ادامه نیز شکل ۷ شبکه چند وجهی هاب سلسله مراتبی حاصل مثال ۶ جدول ۴ را نمایش می‌دهد همانطور که از شکل ۸ مشخص است با کاهش حداکثر زمان تحویل کالا، هزینه‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان، نحوه انتخاب شیوه‌های حمل و نقل بین هاب‌های مرکزی دانست. به عبارت دیگر، با کاهش  $TW_{i,m}$  از مسیرهای هوایی به منظور تحویل سریعتر کالا استفاده می‌شود و از آنجایی که استفاده از مسیرهای هوایی هزینه بیشتری را به همراه خواهد داشت، موجب افزایش کل هزینه‌های حمل و نقل خواهد شد. همچنین با افزایش نرخ پردازش کالا در ایستگاه‌های عملیاتی، زمانهای انتظار کالا در هاب مرکزی کاهش می‌یابد که نتیجه آن کاهش کل زمان حمل و نقل است. این امر موجب می‌شود که در جابجایی کالاها در صورت امکان از مسیرهای جاده‌ای با هزینه کمتری استفاده شود. اما با کاهش نرخ پردازش کالا به دلیل افزایش زمانهای انتظار، ممکن است با توجه به محدودیت زمانهای تحویل از مسیرهای هوایی با تقبل هزینه بیشتر استفاده شود.

جدول ۶ نتایج محاسباتی (میانگین اعداد تابع هدف بدست آمده برای ۵ بار اجرا) را برای الگوریتم پیشنهادی نمایش می‌دهد.



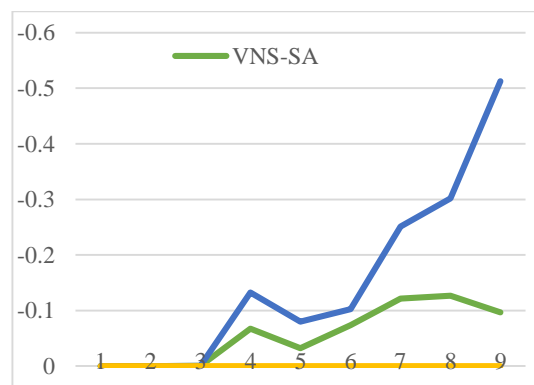
## ارائه الگوریتم ترکیبی برای مسئله مکان‌یابی هاب در شبکه حمل و نقل چندوجهی

جدول ۶. نتایج از روش‌های حل مختلف برای مسائل با اندازه کوچک

| الگوریتم | مسئله نمونه |           |            |            |           |          |          |          |          |
|----------|-------------|-----------|------------|------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
|          | ۱           | ۲         | ۳          | ۴          | ۵         | ۶        | ۷        | ۸        | ۹        |
| VNS      | ۲۱۰۴۸,۳     | ۲۴۵۷۴,۷۴  | ۳۳۰۹۷,۲    | ۳۴۵۸,۹۴    | ۳۷۷۵۸,۷۳  | ۴۵۳۰۰,۴۲ | ۴۸۴۱۲,۱  | ۶۹۲۹۳,۰۷ | ۷۳۱۱۱,۶۳ |
| VNS-SA   | ۲۱۰۴۸,۳     | ۲۴۵۷۴,۷۴  | ۳۳۰۹۷,۱۲   | ۳۴۵۵۸,۴    | ۳۷۷۴۰,۶۷۴ | ۴۵۲۸۷,۳۳ | ۴۸۳۴۹,۶۱ | ۶۹۱۷۲,۱۱ | ۷۲۵۱۰,۲  |
| VNS      | ۳           | ۴         | ۶          | ۹          | ۱۱        | ۱۱       | ۱۲       | ۱۵       | ۱۷       |
| VNS-SA   | ۴           | ۴         | ۷          | ۱۰         | ۱۲        | ۱۳       | ۱۴       | ۱۶       | ۱۷       |
| VNS      | ۰           | -۰.۰۰۰۰۱۲ | -۰.۰۰۰۰۶۰۴ | -۰.۱۳۲۳۶۰۴ | -۰.۰۷۹۹۲۸ | -۰.۱۰۲۴۴ | -۰.۲۵۹۸۵ | -۰.۳۰۱۶۴ | -۰.۵۱۲۷۹ |
| VNS-SA   | ۰           | ۰         | -۰.۰۰۰۰۳۶  | -۰.۰۶۷۰۹۳۸ | -۰.۰۳۲۰۷۱ | -۰.۰۷۳۵۲ | -۰.۱۲۱۴۵ | -۰.۱۲۶۵۵ | -۰.۰۹۶۶۸ |
| VNS      | ۰           | ۰.۰۰۰۰۱۲  | ۰.۰۰۰۰۲۴   | ۰.۰۶۵۲۲۲   | ۰.۰۴۷۸۴   | ۰.۰۲۸۹۰  | ۰.۱۲۹۲۴  | ۰.۱۷۴۸۶  | ۰.۸۲۹۴۴  |
| VNS-SA   | ۰           | ۰         | ۰          | ۰          | ۰         | ۰        | ۰        | ۰        | ۰        |

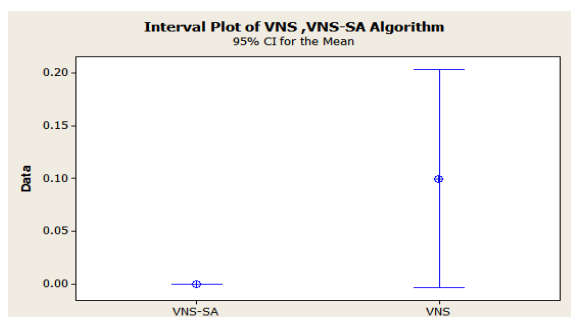
### ۵-۴ تحلیل نتایج در ابعاد کوچک مسئله

شکل ۹ مقدار شاخص انحراف از بهترین جواب یافت شده را برای نمونه آزمایشی با اندازه کوچک نمایش می‌دهد.

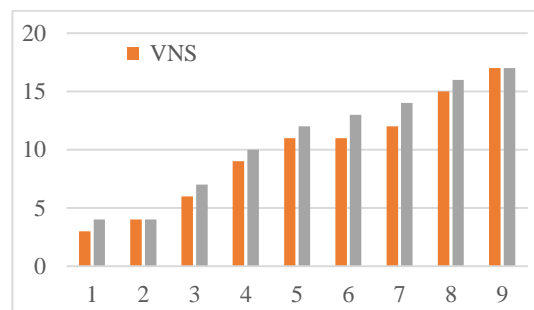


شکل ۹. مقدار شاخص انحراف از بهترین جواب در مسائل با اندازه کوچک

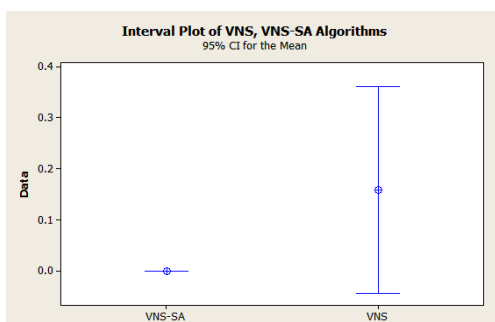
از این شکل می‌توان دریافت الگوریتم ترکیبی جستجوی همسایگی متغیر- شبیه‌سازی تبرید در مقایسه با الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر از وضعیت بهتری برخوردار بوده است. شکل ۱۰ زمان بکار برده شده برای حل مسائل با اندازه کوچک را در الگوریتم‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل ۱۰ مشخص است کمترین زمان مورد استفاده برای حل مسائل را الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر و بیشترین زمان حل را الگوریتم ترکیبی به خود اختصاص داده‌اند. به منظور بررسی کارایی الگوریتم‌ها در حل مسائل با ابعاد کوچک نمودار میانگین تابع هدف و بازه حداقل اختلاف معنی دار (با اطمینان ۹۵٪) در پنج مرتبه اجراء، برای الگوریتم‌ها در شکل ۱۱ آورده شده است که نشان می‌دهد الگوریتم ترکیبی در کل به نتایج بهتری نسبت به الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر دست یافته است.



شکل ۱۱. نمودار میانگین RPD با بازه اطمینان ۹۵٪ برای الگوریتم‌ها در مسائل با اندازه کوچک

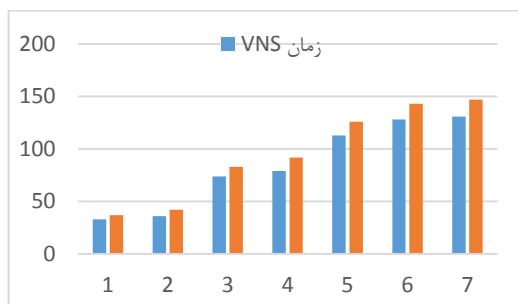


شکل ۱۰. مقایسه زمان حل الگوریتم‌ها در مسائل با اندازه کوچک



شکل ۱۰. نمودار میانگین RPD با بازه اطمینان ۹۵٪ برای الگوریتم‌ها در مسائل با اندازه‌های بزرگ

شکل ۱۱ زمان بکار برده شده برای حل مسائل با اندازه بزرگ را در الگوریتم‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل مشخص است کمترین زمان مورد استفاده برای حل مسائل را الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر و بیشترین زمان مورد استفاده برای حل مسائل را الگوریتم ترکیبی به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۱۱. مقایسه زمان حل الگوریتم‌ها در مسائل با اندازه‌های بزرگ

جدول ۷. نتایج محاسباتی الگوریتم‌های پیشنهادی برای مسائل با اندازه‌های بزرگ

| ۷        | ۶        | ۵           | ۴          | ۳       | ۲         | ۱          | مسئله نمونه |                |
|----------|----------|-------------|------------|---------|-----------|------------|-------------|----------------|
|          |          |             |            |         |           |            | الگوریتم    | مقدار تابع هدف |
| ۹۸۹۷۰۸۷۴ | ۹۳۸۸۲۰۳۳ | ۸۹۲۷۹۸۳۱.۷۴ | ۹۹۶۸۸۳۰.۷۲ | ۹۷۸۷۳۶۲ | ۷۸۴۲۹۵.۴  | ۶۹۲۷۴۶.۶۱  | VNS         | مقدار تابع هدف |
| ۹۸۹۶۰۲۷۳ | ۹۳۸۷۱۷۲۱ | ۸۹۲۷۰۲۷۲.۰۱ | ۹۹۶۰۲۸۳.۷  | ۹۷۸۰۰۲۷ | ۷۷۹۸۱۶۱.۷ | ۶۹۰۲۹۳.۰۴۸ | VNS-SA      |                |
| ۱۳۱      | ۱۲۸      | ۱۱۳         | ۷۹         | ۷۴      | ۳۶        | ۳۳         | VNS         | زمان حل        |
| ۱۴۷      | ۱۴۳      | ۱۲۶         | ۹۲         | ۸۳      | ۴۲        | ۳۷         | VNS-SA      |                |
| ۰.۰۱۰۷   | ۰.۰۱۰۹   | ۰.۰۱۰۷      | ۰.۰۸۵۸     | ۰.۰۷۴۹۹ | ۰.۵۶۸۵۲   | ۰.۳۵۵۴۳    | VNS         | RPD            |
| ۰        | ۰        | ۰           | ۰          | ۰       | ۰         | ۰          | VNS-SA      |                |

## ۵-۵ نتایج عددی در ابعاد بزرگ مسئله

همانطور که در نتایج جدول ۷ مشاهده شد، نرم افزار بهینه‌سازی قادر به حل مثال ۱۰ که اندازه بزرگی از مسئله است، نبود. بنابراین در ادامه الگوریتم پیشنهادی، جهت حل مسئله در اندازه‌های بزرگ ارائه می‌شود که ابتدا تنظیم پارامترها با استفاده از روش تاگوچی آورده شده است، سپس به تحلیل مثال‌های متعددی از مسئله و مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم VNS پرداخته می‌شود. جدول ۷ نتایج محاسباتی (میانگین اعداد تابع هدف بدست آمده برای ۵ بار اجرا) را برای الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در اندازه‌های بزرگ برای ۷ مثال عددی مختلف نمایش می‌دهد.

## ۵-۶ تحلیل نتایج در ابعاد کوچک مسئله

به منظور بررسی کارایی الگوریتم‌ها در حل مسائل با ابعاد بزرگ نمودار میانگین تابع هدف و بازه حداقل اختلاف معنی دار (با اطمینان ۹۵٪) در پنج مرتبه اجراء برای الگوریتم‌ها در شکل ۱۰ آورده شده است که نشان می‌دهد الگوریتم ترکیبی در کل به نتایج بهتری نسبت به الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر دست یافته است.

## ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

- در مدل پیشنهادی نظام صف بر اساس اولین ورود/اولین خروج بود. در حالی که در عمل ممکن است خدمت‌رسانی به برخی کالاها مانند کالاهای فاسد شدنی در اولویت باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود مدل صف ارائه شده در حالت نظام اولویت مورد بررسی قرار گیرد.
- در اینجا ظرفیت هاب‌ها نامحدود در نظر گرفته شده است. محدودیت ظرفیت در هاب‌ها تأثیر مستقیمی بر مدل صف و همچنین تأخیرات زمانی خواهد داشت. از این رو پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات بعدی این فرض در نظر گرفته شود.

## ۷. پی‌نوشتها

- 1- Civil Aeronautics Board
- 2- Hierarchical Maximal Hub Covering
- 3- Outbound
- 4- Inbound
- 5- Local
- 6- Batch
- 7- Break-bulk
- 8- Load
- 9- The relative percentage deviation

## ۸. مراجع

- چراغی، اسماعیل، حیدری، جعفر، رحیمی، یاسر، رزمی، جعفر. (۱۳۹۵) "مکان‌یابی هاب چند محصوله در شبکه حمل و نقل کالای ایران با در نظر گرفتن روش‌های تامین مالی و رویکرد زیست محیطی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۸، شماره ۲، صفحات ۱۹۵-۲۱۳.

- Alumur, S. A., Kara, B. Y. and Karasan, O. E. (2012) "Multimodal hub location and hub network design", Omega, Vol. 40, No. 6, pp. 927-939.

- Alumur, S. and Kara, B. Y. (2008) "Network hub location problems: The state of the art". European journal of operational research, Vol. 190, No. 1, pp. 1-21.

- Arshadi Khamseh, A. and DoostMohamadi, M. (2014) "Complete/incomplete hierarchical hub center single assignment network

طراحی شبکه‌هاب جزء مسائل مهم مطالعاتی و کاربردی در حوزه مکان‌یابی تسهیلات است. در این تحقیق، به دنبال طراحی شبکه‌هایی بودیم که کل هزینه‌ها را کمینه و ترافیک موجود را کاهش دهد. همچنین پاسخگوی مناسبی برای سوالات زیر باشد: ۱- آیا استفاده از مدل صف در هاب‌ها باعث کنترل بیشتر زمانهای تحویل کالا می‌شود؟

با توجه به مدل ارائه شده و همچنین تحلیل نتایج همانطور که گفته شد محدودیت منابع عملیاتی در هاب‌ها ممکن است باعث ایجاد صف در این مراکز شود. تخمین زمانهای انتظار کالا در هاب موجب افزایش سطح اطمینان از زمانهای حمل و نقل خواهد شد و بدین ترتیب می‌توان با درصد اطمینان بیشتری حداکثر زمان مجاز برای تحویل کالا را ارائه داد. همچنین با توجه به تأخیرات کالا در مراکز هاب تصمیم‌گیری راجع به انتخاب نوع مسیر حمل و نقل بین هاب‌های مرکزی و تقبل هزینه‌های متناظر با این تصمیم، با اطمینان بیشتری صورت خواهد گرفت. ۲- آیا طراحی شبکه هاب سلسله‌مراتبی چندوجهی، کارایی مسئله را افزایش می‌دهد؟

همانطور که قبلاً نیز ذکر شد در شبکه‌های هاب سلسله‌مراتبی به دلیل اینکه کالاها ممکن است از چهار هاب در طول مسیر خود عبور کنند، بنابراین زمان حمل و نقل کالا به مراتب بیش‌تر از شبکه‌هاب سنتی است. از این رو به منظور کاهش زمانهای حمل و نقل و افزایش سطح خدمت‌دهی شبکه‌های چندوجهی با تنوع شیوه‌های حمل و نقل قطعاً موجب انعطاف بیش‌تر این نوع شبکه‌ها و همچنین کاهش زمانهای تحویل خواهد شد. نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی گواهی بر این ادعا است.

پژوهش انجام شده با نواقصی همراه بود، بنابراین در ادامه پیشنهاداتی برای مطالعات آتی ارائه می‌شود:

- برای سادگی در اینجا فرض شده است که یک نوع کالا بین نقاط جابجا می‌شود. حال آنکه در عمل ممکن است هاب‌ها به طور همزمان به چندین نوع کالا خدمت‌رسانی نمایند. بنابراین ارائه مدلی تحت عنوان مکان‌یابی هاب‌سلسله‌مراتبی در شبکه‌های چندوجهی با در نظر گرفتن زمانهای تأخیر و تنوع کالا، مفید به نظر می‌رسد.

- Kirkpatrick, S., Gelatti, C. D. and Vecchi, M. P. (1983) "Optimization by simulated annealing. Science", Vol. 220, pp. 671-680.
- Lin, C. C. (2010) "The integrated secondary route network design model in the hierarchical hub-and-spoke network for dual express services", International Journal of Production Economics, Vol. 123, No. 1, pp. 20-30.
- Lin, C. C. and Chen, S. H. (2004). "The hierarchical network design problem for time-definite express common carriers". Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 38, No. 3, pp. 271-283.
- Marianov, V. and Serra, D. (2003) "Location models for airline hubs behaving as M/D/c queues", Computers and Operations Research, Vol. 30, No. 7, pp. 983-1003.
- Mladenović, N. and Hansen, P. (1997) "Variable neighborhood search", Computers and Operations Research, Vol. 24, No. 11, pp. 1097-1100.
- Rahimi, Y., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mohammadi, M. and Sadeghi, M. (2016) Multi-objective hub network design under uncertainty considering congestion: An M/M/c/K queue system", Applied Mathematical Modelling, Vol. 40, No. 5-6, pp. 4179-4198.
- Rodriguez-Martin, I. and Salazar-Gonzalez, J. J. (2008) "Solving a capacitated hub location problem", European Journal of Operational Research, Vol.184, No. 2, pp. 468-479.
- Sahraeian, R. and Korani, E. (2010) "The hierarchical hub maximal covering problem with determinate cover radiuses", 2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), pp. 1329-1333.
- Warsing, D. P., Souza, G. C. and Greis, N. P. (2001) "Determining the value of dedicated multimodal cargo facilities in a multi-region distribution network", European Journal of Operational Research, Vol.133, No. 1, pp. 81-93.
- Yaman, H. (2009) "The hierarchical hub median problem with single assignment", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 43, No. 6, pp. 643-658.
- problem", Journal of Optimization in Industrial Engineering, Vol. 7, No. 14, pp. 1-12.
- Campbell, A. M., Lowe, T. J. and Zhang, L. (2007) "The p-hub center allocation problem", European Journal of Operational Research, Vol. 176, No. 2, pp. 819-835.
- Chou, Y. H. (1990) "The hierarchical-hub model for airline networks". Transportation Planning and Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 243-258.
- Davari, S. and Fazel Zarandi, M. H. (2012) "The single-allocation hierarchical hub median location problem with fuzzy demands", African Journal of Business Management, Vol. 6, No. 1, pp. 347-360.
- Elhedhli, S. and Hu, F. X. (2005) "Hub-and-spoke network design with congestion", Computers and Operations Research, Vol. 32, No. 6, pp. 1615-1632.
- Elhedhli, S. and Wu, H. (2010). A Lagrangean heuristic for hub-and-spoke system design with capacity selection and congestion. INFORMS Journal on Computing, Vol. 22, No. 2, pp. 282-296.
- Ernst, A. T., Hamacher, H., Jiang, H., Krishnamoorthy, M. and Woeginger, G. (2009) "Uncapacitated single and multiple allocation p-hub center problems", Computers and Operations Research, Vol. 36, No. 7, pp. 2230-2241.
- Ishfaq, R. and Sox, C. R. (2012) "Hub location-allocation in intermodal logistic networks", European Journal of Operational Research, Vol. 210, No. 2, pp. 213-230.
- Kara, B. Y. and Tansel, B. C. (2000) "On the single-assignment p-hub center problem. European Journal of Operational Research, Vol. 125, No. 3, pp. 648-655.
- Karimi, M., Eydi, A. R. and Korani, E. (2014) "Modeling of the capacitated single allocation hub location problem with a hierarchical approach", International Journal of Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 573-586.
-

## ارائه الگوریتم ترکیبی برای مسئله مکان‌یابی هاب در شبکه حمل و نقل چندوجهی

جواد بهنامیان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۱ با گرایش برنامه‌ریزی و تحلیل سیستم‌ها و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نمود. در سال ۱۳۹۱ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه صنعتی امیرکبیر گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی و حل مسائل بهینه‌سازی با معیارهای چندگانه و در شرایط عدم قطعیت بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه بوعلی سینا همدان است.



امیرحسین صفرقلی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمود. در سال ۱۳۹۴ موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه بوعلی سینا همدان گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مکان‌یابی هاب بوده و در حال حاضر دبیر گروه مطالعات و برنامه‌ریزی راهبردی در ستاد توسعه فناوری و صنایع دانش بنیان دریایی است.

