توسعه الگوریتم ابتکاری مبتنی بر شمارش کامل به منظور بهینه‌سازی دوسطحی مساله طراحی شبکه هاب لجستیکی در زنجیره تأمین امداد و بلایا (مستخرج از رساله دکتری با همین عنوان)

انسیه تاکی: دانشجوی دکتری، مدیریت صنعتی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
سید حبیب اله میرغفوری *: دانشیار، مدیریت صنعتی ، دانشگاه یزد، یزد، صفاییه، دانشگاه یزد، یزد، ایران
علی مروتی شریف آبادی: دانشیار، مدیریت صنعتی، دانشگاه یزد، یزد، صفاییه، دانشگاه یزد، یزد، ایران
سید حیدر میرفخرالدینی: دانشیار، مدیریت صنعتی، دانشگاه یزد، یزد، صفاییه، دانشگاه یزد، یزد، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

چکیده:
در این تحقیق یک مدل ریاضی دوسطحی جدید به‌منظور طراحی شبکه هاب لجستیکی در زنجیره تأمین امداد و بلایا ارائه شده است. مدل سطح رهبر به مکان‌یابی هاب‌ها و تعیین وسایل نقلیه مورد استفاده می‌پردازد. تابع هدف این مدل به کمینه‌سازی هزینه‌های احداث هاب‌ها، هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های مربوط به ایجاد زیرساخت جهت توسعه شبکه هاب لجستیکی می‌پردازد. در مدل سطح پیرو اقدام به تعیین مسیرهای بهینه برای ارسال محصولات به متقاضیان با هدف کمینه‌سازی زمان ارائه خدمت می‌کند. با توجه به اینکه حل مدل‌های دوسطحی در حالتی که مدل سطح پیرو دارای ساختار MIP باشد، به‌عنوان یک مسئله دشوار در تحقیق در عملیات شناخته شده و همواره برای آن روش حل مشخصی وجود ندارد، در این پژوهش یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر شمارش کامل جهت حصول پاسخ‌ها با کیفیت بالا ارائه شده است. مطابق با نتایج محاسباتی می‌توان مشاهده کرد که الگوریتم توسعه‌یافته قادر به تولید پاسخ‌هایی موجه بوده و البته از نظر کیفیت پاسخ‌ها هم سطح قابل قبولی دارد. استفاده از نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مدیریتی مورد استفاده سازمان‌های متولی مدیریت بحران قرار گیرد.

کلمات کلیدی: *برنامه ریزی دوسطحی، مکان‌یابی هاب، شبکه لجستیکی، الگوریتم ابتکاری مبتنی بر شمارش کامل، زنجیره تأمین امداد و بلایا*

Development of an Innovative Algorithm Based on Complete Counting for Bilateral Optimization Problem Design of Hub Logistics Network in Relief and Disaster Supply Chain

Ensiyeh taki[1], Seyed Habib Allah Mirghafoori*[2], Ali morovati Sharifabadi[3], Seyed Heydar Mirfakhreddini[4]

Abstract
In this study, a new two-level mathematical model is presented in order to design a logistics hub network in the supply chain of disasters and disasters. The leader level model uses the location of hubs and the determination of vehicles used. The objective function of this model is to minimize the cost of building hubs, transportation costs, and infrastructure costs to develop a logistics hub network. In the follow-up model, it determines the optimal routes for sending products to applicants with the aim of minimizing service delivery time. Given that solving two-tier models in the case where the follow-up model has an MIP structure, it is known as a difficult problem in research in operations and there is not always a definite solution for it, in this research an innovative algorithm based on complete counting. It is provided with high quality answers. According to the computational results, it can be observed that the developed algorithm is able to produce justified answers and of course it has an acceptable level in terms of the quality of the answers. Using the results of this research can be used as a management tool by crisis management organizations.Keywords: Locating-Routing

1 – ph.d student,industrial management, Yazd university, Isfahan
2 – Associate Professor, Industrial Management, Yazd University
3 – Associate Professor, Industrial Management, Yazd University
4 – Associate Professor, Industrial Management, Yazd University

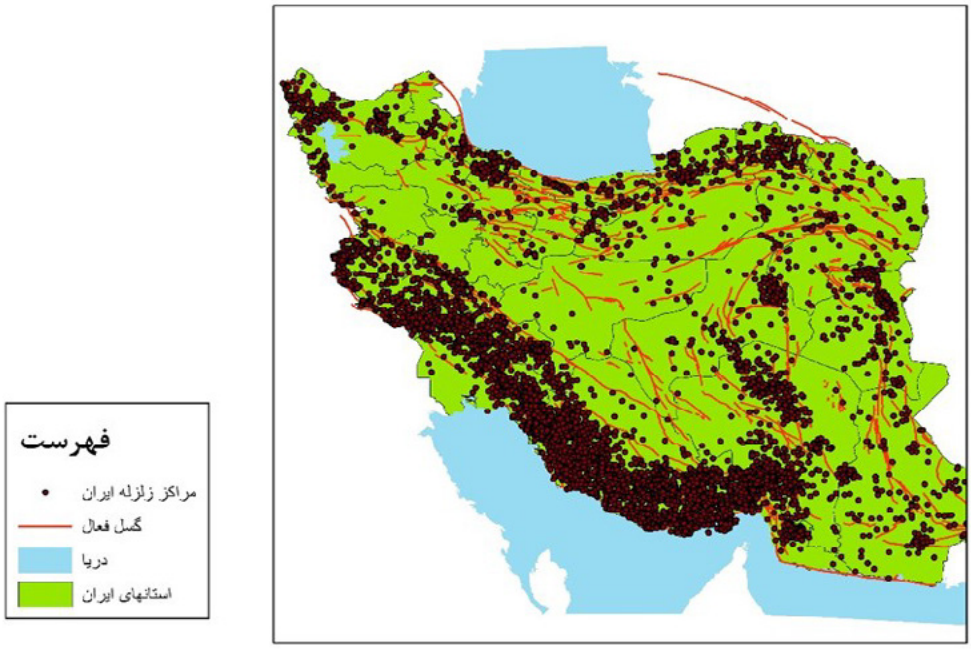
۱- مقدمه

مدیریت زنجیره تأمین امداد و بلایا یکی از مهمترین زیرشاخه های مدیریت زنجیره تأمین است که در سالیان گذشته مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۱]. این موضوع با عناوین دیگر از جمله مدیریت زنجیره تأمین بحران هم شناخته می شود [۲]. در این مسئله سعی می شود ساختار جریان های فیزیکی و اطلاعاتی به نحوی در ساختار مورد نظر بررسی شود که اهدافی نظیر کمینه سازی هزینه های عملیاتی، بیشینه سازی سطح تأمین تقاضا، کمینه سازی زمان انجام خدمات و بیشینه سازی سطح تعادل در تأمین نیازها برآورده شود [۳]. اما به منظور ایجاد ساختاری مناسب جهت خدمت رسانی باید به تصمیمات استراتژیک و هزینه برتوجه ویژه کرد؛ چرا که این تصمیمات تأثیر بسیار زیادی بر حصول نتایج نهایی دارند. یکی از مهمترین تصمیمات استراتژیک در حوزه مدیریت زنجیره تأمین بلایا تعیین مکان مناسب احداث تسهیلات و البته تعیین بهینه سطح ارتباطات بین مکان ها و میزان کالاهای ارسالی به هر نقطه متقاضی توسط این مکان هاست [۴]. بنابراین ارائه یک ساختار جامع برای بررسی و تعیین مکان های بهینه مراکز ارائه خدمت در قالب مراکز تأمین، دسته بندی و توزیع ضروری به نظر می رسد. اما مرکزی که بتواند تمام امور لازم مانند دسته بندی و ارسال سفارشات را به طور چندگانه و همزمان انجام دهد می تواند تا حد بسیاری باعث ایجاد سهولت در امر خدمت رسانی شود [۵]. در ادبیات موضوع این نوع مراکز به عنوان هاب های لجستیکی شناخته می شوند [۶]. هاب های لجستیکی دارای کاربردهای فراوانی بوده و می توانند به طور همزمان علاوه بر ایجاد سهولت در زنجیره امداد و بلایا در ساختارهای لجستیک تجاری هم مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین تعیین محل احداث این هاب ها تصمیمی بنیادی است که باید توسط مدیریت سطح کلان کشور صورت پذیرد [۷]. این در حالی است که سایر تصمیمات مربوط به مدیریت زنجیره امداد و بلایا تنها توسط سازمان های مسئول مانند هلال احمر و سازمان مدیریت بحران اتخاذ می شود. به عبارت دیگر، در طراحی ساختار لجستیکی امداد و بلایا با استفاده از هاب های لجستیکی ۲ تصمیم گیرنده مختلف وجود دارد که در یک ساختار سلسله مراتبی با یکدیگر در تعامل هستند. سطح نخست که مربوط به مدیریت سطح کلان کشور بوده و با نگاهی به کاربردهای مختلف لجستیکی سعی بر تعیین محل بهینه آن ها داشته تا بتوان در تمامی امور حمل و نقل از آن ها استفاده کرد. در سطح دوم هم سازمان های متولی مدیریت امداد وجود دارند که بر اساس تصمیمات اتخاذشده در سطح نخست برای تعیین مکان هاب ها اقدام به تصمیم گیری در مورد تعیین محل تسهیلات خود می کنند. در حقیقت در این مسئله یک ساختار برنامه ریزی دوسطحی وجود دارد و نیاز است که برای بهینه سازی آن از مدل های بهینه سازی برنامه ریزی دوسطحی استفاده شود. بدین منظور در این پژوهش مسئله طراحی زنجیره تأمین امداد و بلایا در قالب یک مدل برنامه ریزی دوسطحی بدین صورت بررسی می شود که در سطح رهبر دولت تصمیمات مربوط به هاب های لجستیکی را اتخاذ خواهد کرد و در سطح پیرو سازمان های مسئول مدیریت بحران اقدام به تعیین محل تسهیلات و تعیین مسیرهای حرکت ناوگان امدادی در صورت وقوع فاجعه خواهند کرد.

در ادامه ساختار مقاله بدین صورت است که در بخش دوم مرور ادبیات تحقیق انجام خواهد شد و سپس در بخش سوم مدل ریاضی مسئله و روش حل تشریح می شود. نتایج محاسباتی حاصل از حل مسئله به کمک الگوریتم ابتکاری تحقیق در بخش چهارم و در نهایت جمع بندی و ارائه پیشنهادات آتی در بخش پنجم مقاله تشریح خواهد شد.

۲- مروری بر پیشینه تحقیق

طبق بررسی های انجام شده اکثر پژوهش های ارائه شده در رابطه با مدیریت زنجیره تأمین در شرایط بحران به ارائه ساختارهای مدیریتی برای رده های مختلف زنجیره تأمین مانند مراکز تأمین، مراکز توزیع اولیه، مراکز توزیع ثانویه، پناهگاه ها و مراکز انتقال آوار پرداختند تا از این طریق بتوانند ساختار مدیریت جریان کالاها بهبود دهند. در این راستا [۸] مسئله طراحی شبکه لجستیک بشردوستانه ی ۲ رده ای شامل انبارهای مرکزی چندگانه و مراکز توزیع محلی را ارائه دادند. آن ها همچنین یک رویکرد جدید برنامه ریزی امکانی-احتمالی دومرحله ای مبتنی بر سناریو را هم توسعه دادند. این پژوهش نیاز اساسی برای طراحی شبکه امداد را در شهر تهران در آماده سازی برای زمین لرزه های بالقوه جهت مقابله با مشکلات لجستیکی اساسی در مراحل قبل و بعد از وقوع بلایا را موجب می شود. ماهارجان و هانائوکا[1] [۹] در پژوهشی به توسعه مدلی ریاضی برای تعیین مکان موقت هاب های لجستیکی برای پاسخ به بلایا و همچنین ارائه روشی جدید برای تعیین وزن اهداف در یک مسئله بهینه سازی چندهدفه پرداختند. علاوه بر این یک سیستم رتبه بندی فازی تحت شرایط تصمیم گیری گروهی برای تعیین اهمیت اهداف زمانی که تصمیم گیرندگان چندگانه وجود دارد، پیشنهاد شده است. [۱۰] به طراحی زنجیره تأمین مواد خونی در شرایط بحران پرداختند که به منظور برخورد با عدم قطعیت پارامترهای ورودی از مدل برنامه ریزی تصادفی دومرحله ای استفاده کردند. در این مدل ۲ سطح زنجیره شامل مراکز تأمین مواد خونی و مراکز توزیع به آسیب دیدگان درنظرگرفته شده است. [۱۱] مسئله طراحی زنجیره تأمین اورژانسی را به عنوان یک مدل چندهدفه پایدار مورد مطالعه قرار دادند که در آن سطوح تأمین مواد، مراکز توزیع سراسری و مراکز توزیع محلی به عنوان ۳ سطح اصلی زنجیره در نظرگرفته شده است. [۱۲] مکان بهینه تسهیلات امدادی شامل مراکز ذخیره مواد غذایی و پناهگاه ها را با استفاده از یک مدل بهینه سازی مورد مطالعه قرار دادند. به صورت مشابه تحقیقات زیادی را می توان ارائه داد که اقدام به توسعه مدل های بهینه سازی با درنظرگرفتن ابعاد مختلف زنجیره در مدیریت بحران کردند؛ اما در این بین استفاده از هاب های لجستیکی کمتر مورد توجه قرار گرفته است، به طوری که طبق بررسی های انجام شده [۱۳] به توسعه ساختاری مبتنی بر هاب لجستیکی به منظور طراحی زنجیره تأمین امداد و بلایا پرداختند که در آن یک مدل ریاضی ۲ هدفه عددی صحیح مختلط توسعه داده شده است. همچنین به منظور نزدیکی شرایط مسئله به ساختارهای دنیای واقعی پارامتر تقاضا به صورت فازی درنظرگرفته شده که همین موضوع باعث توسعه روش حل مبتنی بر محدودیت های شانس فازی بوده است. [۱۴] هم به صورت مفهومی نقش استفاده از هاب های لجستیکی در مدیریت زنجیره تأمین امداد را بررسی کردند. مطابق



شکل ۱- پراکندگی مراکز وقوع زلزله‌هایی با قدرت بیشتر از ۶ ریشتر در ۳۰ سال گذشته

با نتایج به‌دست‌آمده از مقاله مذکور می‌توان گفت که استفاده از تسهیلات هاب می‌تواند بین ۱۰ تا ۴۰ درصد کاهش هزینه در پی داشته باشد. علاوه برآن، زمان ارائه خدمت هم بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بهبود پیدا خواهد کرد. [۱۵] با استفاده از مدل‌های چندشاخصه اقدام به ارزیابی هاب‌های لجستیکی مختلف در شرایط هنگام به هنگام پرداختند. مطابق با نتایج حاصله می‌توان گفت که هاب‌های لجستیکی با ظرفیت استفاده از چندسیستم حمل‌ونقل به مراتب تأثیرگذاری بیشتری نسبت به سایر انواع هاب‌ها در بهبود جریان کالا در زنجیره امداد و بلایا خواهند داشت. در یک جمع‌بندی می‌توان گفت که استفاده از هاب لجستیکی باعث بهبود در هزینه، زمان و همچنین جریان محصولات جهت رسیدن به متقاضیان خواهد شد. اما مقالات یادشده تصمیمات مربوط به مکان‌یابی هاب‌های لجستیکی و سایر امور زنجیره را متعلق به یک سطح تصمیم‌گیری در نظر گرفتند. این در حالی است که در شرایط دنیای واقعی اتخاذ تصمیمات نهایی برای ایجاد هاب‌های لجستیکی مربوط به بالاترین سطح مدیریت یعنی دولت بوده و سایر امور مربوط به تأمین احتیاجات در هنگام بحران به عهده سازمان‌های مسئول است. بنابراین همواره ۲ سطح تصمیم‌گیرنده حضور دارند که البته دارای ساختار تعاملی سلسله مراتبی در قالب رهبر (دولت) و پیرو (سازمان‌های مسئول مدیریت بحران) است. البته در سایر مسائل این حوزه از کاربردهای برنامه‌ریزی دوسطحی استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیق [۱۶] اشاره کرد که در آن یک مدل چندهدفه بهینه‌سازی دوسطحی برای مکان‌یابی مراکز توزیع امداد در لجستیک بشردوستانه ارائه شده است.

در این تحقیق با استفاده از مفهوم برنامه‌ریزی دوسطحی مدلی جدید به‌منظور مدیریت تسهیلات و جریان کالا با استفاده از هاب‌های لجستیکی بررسی خواهد شد. مدل سطح رهبر برای تعیین مکان هاب‌ها اقدام به تصمیم‌گیری در مورد تعیین محل تسهیلات خود می‌کنند. بدین منظور در این پژوهش مسئله طراحی زنجیره تأمین امداد و بلایا در قالب یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی بدین صورت بررسی می‌شود که در سطح رهبر دولت تصمیمات مربوط به هاب‌های لجستیکی را اتخاذ خواهد کرد و در سطح پیرو سازمان‌های مسئول مدیریت بحران اقدام به تعیین محل تسهیلات و تعیین مسیرهای حرکت ناوگان امدادی در صورت وقوع فاجعه خواهند کرد.

۳- بیان مسئله تحقیق

هدف پژوهش حاضر، ارائه یک مدل بهینه‌سازی به‌منظور مکان‌یابی هاب‌های لجستیکی با تمامی کارکردها و مشخصات آن نوع تسهیلات و هم ویژگی‌های یک شبکه مبتنی بر هاب به‌منظور استفاده در شرایط وقوع بحران در قالب زنجیره تأمین امداد و بلایا است. پیش از تشریح ساختار اصلی تحقیق نیاز است که به بررسی چند نکته مهم پرداخته شود. نکته اول شالوده تفکری حمایت‌کننده از پیاده‌سازی چنین طرحی در کشور است. شرایط لجستیکی موجود در امدادرسانی به مناطق بحران‌زده بیانگر چرایی و چگونگی اجرای شبکه لجستیک در کشور و الزامات و نیازمندی‌های طرح گفته‌شده در پهنه مورد بررسی است.

طراحی شبکه لجستیک امداد کشور طرحی مهم و تأثیرگذار در منطقه، کشور و حتی در مقیاس بین‌المللی و خاورمیانه است. چرا که این منطقه بنا به علت ویژگی‌های ژئوپلتیک، ژئواکونومیک و موقعیت خاص خود از منظر لجستیکی بسیار دارای اهمیت است. توسعه ساختار لجستیک امداد علاوه بر بهبود شرایط موجود در امر خدمت‌رسانی تأثیر بسیار زیادی بر شبکه لجستیک کل کشور و

استراتژی‌های کلان حمل‌ونقل و تجارت بین‌المللی ایران خواهد داشت. اما قبل از اینکه بتوان این طرح را در قالب کردهای عددی برای کل کشور تعریف کرد، نیاز است که به‌عنوان نمونه در بخشی از کشور که شرایطی ویژه از لحاظ وقوع بحران‌های مربوط به بخش پدافند غیرعامل دارد، پیاده‌سازی شده و در صورت مناسب بودن نتایج حاصله، برای کل کشور توسعه داده شود. طبق نقشه موجود از زلزله‌های موجود در استناد تاریخی که به کمک نرم‌افزار GIS ترسیم شده، می‌توان به وضوح مشاهده کرد که در مناطق جنوب، جنوب غربی و غرب کشور تمرکز بسیار زیادی وجود دارد. بنابراین پیاده‌سازی نتایج این تحقیق در این بخش‌ها می‌تواند باعث ایجاد شرایطی مناسب به‌منظور ارزیابی کارکرد مدل پیشنهادی تحقیق به‌منظور بهبود شرایط موجود باشد.

اصولاً در مسائلی با ویژگی‌های حاضر چند عامل در زمینه‌های واقعی و ریاضیاتی تحقیق بسیار تأثیرگذارند که از آن جمله می‌توان به تعداد، ظرفیت و هزینه احداث تسهیلات اشاره کرد. به‌ویژه در مسائل با رویکرد طراحی شبکه که بر روی مکان‌یابی تسهیلات تأکید دارند، این مورد بیشتر کرد دارد. در مورد تعداد تسهیلات می‌توان چند رویه را اجرا کرد.

با توجه به مسئله مورد بررسی در این تحقیق که طراحی شبکه هاب لجستیکی در شبکه امداد بلایا با درنظرگرفتن مسائل مسیریابی و مدیریت موجودی است، می‌توان گفت که تسهیلات هاب مورد نظر بر اساس مدل‌های هاب حداکثر پوشش مکان‌یابی خواهند شد. اما جهت ایجاد ارتباط مناسب بین مسائل مکان‌یابی هاب در سطح اول و مسائل مسیریابی و مدیریت موجودی در سطح دوم از ۲ رویکرد مجزا استفاده می‌شود. در رویکرد نخست در قالب یک مسئله کلاسیک ابتدا تسهیلات هاب با درنظرگرفتن تابع یا توابع هدف و همچنین محدودیت‌های مشخص انجام شده و تمامی مشخصه‌های لازم مانند سطح ظرفیت، میزان انتقال کالا و غیره تعیین می‌شود. اما در رویکرد دوم در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی مکان‌یابی تسهیلات هاب به‌عنوان تصمیم‌گیری سطح رهبر، مسیریابی و مدیریت موجودی به‌عنوان تصمیمات سطح پیرو درنظرگرفته می‌شود. مشخص است که این رویکرد در قالب یک مسئله تئوری بازی هابی شناخته می‌شود. در این بازی ۲ بازیگر حضور دارند که به‌صورت رهبر و پیرو می‌بایست به بهینه‌سازی ساختار نهایی بپردازند. بدین منظور در ابتدا سطح رهبر بر اساس استراتژی‌های خود ساختاری ابتدایی برای مکان‌یابی مراکز هاب را مشخص می‌کند که این تعیین مکان‌ها در قالب قانون از پیش تعیین‌شده برای پیرو درنظرگرفته می‌شود. بنابراین پیرو هم بر اساس این قوانین به بهینه‌سازی مسئله خود یعنی مسیریابی و مدیریت موجودی می‌پردازد؛ اما مشخص است که احتمال دارد قوانین ارائه‌شده از طرف رهبر تا حد زیادی محدودکننده باشد و پاسخ نهایی را از پاسخ بهینه موجود دور کند. برای برطرف‌سازی این مشکل بازیگر سطح رهبر انعطاف‌پذیر بوده و دوباره بر اساس ساختار ارائه‌شده توسط پیرو به‌منظور بهبود وضعیت موجود اقدام به تغییر تصمیمات خود خواهد کرد. این موضوع باعث ایجاد یک حالت رفت‌وبرگشتی بین سطوح رهبر و پیرو می‌شود. این رفت‌وبرگشت‌ها تا جایی ادامه می‌یابد که هر ۲ سطح رهبر و پیرو به نقطه تعادلی برسند که برای برآیند تصمیمات آن‌ها حالت بهتری وجود نداشته باشد. این نقطه تعادل در ادبیات تحقیق تحت عنوان نقطه تعادل استکلبرگ شناخته می‌شود. از نتایج این تحقیق می‌توان در مدیریت توزیع و تأمین کالا در هنگام وقوع بحران به‌منظور ارتقای سطح خدمات استفاده کرد. این ساختار باعث خواهد شد، هم در سطح زمان ارائه خدمات و در هزینه‌های استراتژیک صرفه‌جویی مناسبی صورت پذیرد. مفروضات مدل ریاضی عبارتند از:

تعداد گره‌های عادی و بالقوه جهت انتخاب به‌عنوان هاب معلوم هستند؛

- تعداد هاب‌هایی که از هر نوع باید مکان‌یابی شوند، مشخص است؛
- محل تمامی گره‌ها معلوم است؛
- ساختار شبکه کلی مسئله بدون جهت است؛
- شبکه ارتباط دهنده هاب غیرکامل است؛
- هاب‌ها محدودیت ظرفیت ندارند؛
- تخصیص سایر گره‌ها به هاب‌ها به‌صورت تک‌تخصیصی است؛
- محدودیت بودجه‌ای وجود ندارد؛
- روش‌های حمل‌ونقل در ۳ دسته‌ی جاده‌ای، ریلی و هوایی بررسی می‌شوند؛
- ارتباط مستقیم بین ۲ گره غیرهاب مجاز است؛
- برای ارتباطات میان‌هابی عامل تخفیف زمانی وجود دارد؛
- حمل‌ونقل بین هابی در ۲ دسته جاده‌ای و سایر روش‌ها بررسی می‌شود.

نمادها مجموعه‌های رهبر

N	,	$\{i,j\}$	= مجموعه کل گره‌های شبکه
H	,	$\{k,l\}$	= مجموعه گره‌های بالقوه برای احداث هاب
T	,	$\{t\}$	= مجموعه انواع مختلف تسهیلات هاب
M'	,	$\{m\}$	= مجموعه روش‌های حمل‌ونقل (g : روش حمل‌ونقل جاده‌ای)
E	,	$\{e\}$	= مجموعه نوع کالاهای حمل‌شده
V	,	$\{v\}$	= مجموعه انواع مختلف وسایل حمل‌ونقل جاده‌ای

نمادها مجموعه‌های پیرو

E	,	$\{i\}$	= مجموعه مراکز تأمین اقلام امدادی
S	,	$\{i\}$	= مجموعه پناهگاه‌ها
V	,	$\{v\}$	= مجموعه وسایل حمل‌ونقل که با $v \in V$ مشخص می‌شود
D	,		= مجموعه انبارهای وسایل حمل‌ونقل

$D(v)$, $\{i\}$ = محل استقرار مجموعه وسایل حمل‌ونقل $v \in V$

N , $\{i,j\}$ = مجموعه کل نقاط در فرآیند توزیع اقلام

پارامترهای سطح رهبر

P^t = تعداد هاب نوع t که باید احداث شود

FH_k^{mt} = هزینه ثابت احداث یک هاب لجستیکی از نوع t در مکان بالقوه‌ی k

f_{ij}^e = جریان کالایی از نوع e ما بین ۲ گره

$\hat{C}_{ij}$ = هزینه حمل‌ونقل ما بین ۲ گره در صورت حمل‌ونقل مستقیم

C_{ij}^m = هزینه حمل‌ونقل ما بین ۲ گره در حمل‌ونقل بین هابی با استفاده از روش حمل‌ونقل m

HL_{kl}^m = هزینه اتصال شبکه بین هابی با استفاده از روش حمل‌ونقل m

پارمترهای سطح پیرو

C_{ij} = زمان حمل محصولات از گره $i \in N$ به گره $j \in N$

S_i = مقدار عرضه اقلام امدادی مرکز تأمین $i \in N$

d_i = تقاضای پناهگاه $i \in S$ برای اقلام امدادی

b_i = حداکثر زمان رسیدن کالاها به گره متقاضی $i \in S$

Cap_v = ظرفیت وسیله نقلیه $v \in V$

Dt_i = زمان ارائه خدمت در گره

cap^v = ظرفیت وسیله‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای نوع v

CV^v = هزینه استفاده از وسیله‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای نوع v

$Size^m$ = ظرفیت کانتینر مورد استفاده در روش حمل‌ونقل m (غیر از روش جاده‌ای)

d_{kl}^m = هزینه تخلیه و بارگیری کانتینر مورد استفاده در روش حمل‌ونقل m (غیر از روش جاده‌ای) در حمل ما بین هاب‌های k و l

tt_{ij}^m = زمان حمل‌ونقل بین ۲ گره با استفاده از روش حمل‌ونقل m

ot_k^m = زمان عملیاتی مورد نیاز روش حمل‌ونقل m در هاب k

α^m = ضریب تخفیف زمانی بین هابی روش حمل‌ونقل m

SB_{ij} = محدوده‌ی زمان خدمت ما بین ۲ گره

M = یک عدد به اندازه‌ی کافی بزرگ

متغیرهای تصمیم سطح رهبر

HU_k = برابر با ۱ است؛ اگر هاب k به‌عنوان هاب انتهای مسیر درنظرگرفته شود و در غیر این‌صورت برابر با صفر است.

H_k^{mt} = اگر یک هاب از نوع t در مکان بالقوه‌ی k با پشتیبانی از روش حمل‌ونقل m احداث شود، یک؛ در غیر این صورت صفر

$\hat{Y}_{ij}$ = اگر حمل‌ونقل بین ۲ گره به‌صورت مستقیم انجام شود، یک؛ در غیر این صورت صفر

Y_{ijkl}^m = اگر حمل‌ونقل بین ۲ گره از طریق پیوند هابی k و l با استفاده از روش حمل‌ونقل m صورت گیرد، یک؛ در غیر این صورت صفر

Z_{kl}^m = اگر پیوند هابی روش حمل‌ونقل m بین ۲ هاب k و l ایجاد شود، یک؛ در غیر این صورت صفر

متغیر تصمیم سطح پیرو

X_{ij}^v = برابر با ۱ است؛ اگر وسیله نقلیه $v \in V$ از گره $i \in N$ به گره $j \in N$ حرکت کند و در غیر این‌صورت برابر با صفر است.

Y_i^v = برابر با ۱ است؛ اگر وسیله نقلیه $v \in V$ به گره $i \in E \cup S$ تخصیص داده شود و در غیر این‌صورت برابر با صفر است.

Z_v = برابر با ۱ است؛ اگر از وسیله نقلیه $v \in V$ استفاده شود و در غیر این‌صورت برابر با صفر است.

Q_i^v = تعداد اقلامی که توسط وسیله نقلیه به گره متقاضی می‌رسد.

T_i^v = زمان رسیدن وسیله حمل‌ونقل به گره

X_{ik} = اگر گره i به هاب k تخصیص یابد، یک؛ در غیر این صورت صفر

TFG_{kl}^m = میزان کالای حمل‌شده بین هاب‌های k و l از طریق روش حمل‌ونقل جاده‌ای

num_{kl}^v = تعداد وسیله‌ی حمل‌ونقل مورد نیاز از نوع v بین هاب‌های k و l

ICG_{kl}^m = هزینه جابه‌جایی کالایی بین هاب‌های k و l از طریق روش حمل‌ونقل جاده‌ای

TFM_{kl}^m = میزان کالای حمل‌شده بین هاب‌های k و l از طریق سایر روش حمل‌ونقل (غیر از روش جاده‌ای)

سطح رهبر

(۱)

$$\min \sum_{k\in K}\sum_{m\in M}\sum_{t\in T} FH_k^{mt} H_k^{mt} + \sum_{k\in K}\sum_{l\neq k}\sum_{m\in M} HL_{kl}^{m} Z_{kl}^{m} \sum_{i\in I}\sum_{i\neq l}\sum_{e\in E} f_{ij}^{e} \hat{C}_{ij} \hat{Y}_{ij} + \sum_{i\in I}\sum_{j\neq i}\sum_{k\in K}\sum_{l\neq k}\sum_{m\in M}\sum_{e\in E}\left(C_{ik}^{g} + C_{kj}^{g}\right) Y_{ijkl}^{m} f_{ij}^{e} + \sum_{k\in K}\sum_{l\neq k}\sum_{m=\{g\}} ICG_{kl}^{g} + \sum_{k\in K}\sum_{l\neq k}\sum_{m=\{g\}} ICM_{kl}^{m}$$

Subject to :

$$\sum_{k,m} H_k^{mt} = P^t \qquad \forall t \in T \tag{۲}$$

$$\sum_{k} X_{ik} = 1 \qquad \forall i \in N \tag{۳}$$

$$\sum_{i} X_{ik} \le M \sum_{t} H_k^t \qquad \forall k \in H \tag{۴}$$

$$\sum_{t} H_k^t \le M \sum_{i} X_{ik} \qquad \forall k \in H \tag{۵}$$

$$\sum_{i} X_{ik} \le M X_{kk} \qquad \forall k \in H \tag{۶}$$

$$2Z_{kl}^{m} \le H_k^{mt} + H_l^{mt} \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m \in M \ , t \in T \tag{۷}$$

$$2Z_{kl} \le \sum_{m,t} H_k^{mt} + \sum_{m,t} H_l^{mt} \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \tag{۸}$$

$$\sum_{l:l\neq k\ ,m} Z_{kl}^{m} \ge 1 + M\left(X_{kk} - 1\right) \qquad \forall k \in H \tag{۹}$$

$$\sum_{k,l:k\neq l\ ,m} Y_{ijkl}^{m} = 1 - \hat{Y}_{ij} \qquad \forall i,j \in N : i \neq j \tag{۱۰}$$

$$\sum_{l:l\neq k\ ,m} Y_{ijkl}^{m} - \sum_{l:l\neq k\ ,m} Y_{ijlk}^{m} = X_{ik} - X_{jk} \qquad \forall i,j \in N : i \neq j \ , k \in H \tag{۱۱}$$

$$Y_{ijkl}^{m} + Y_{ijlk}^{m} \le Z_{kl}^{m} \qquad \forall i,j \in N : i \neq j \ , k,l \in H : k \neq l \tag{۱۲}$$

$$TFG_{kl}^{m} \ge \sum_{i,j:i\neq j\ ,e} f_{ij}^{e} Y_{ijkl}^{m} \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m = \{g\} \tag{۱۳}$$

$$num_{kl}^{v} \ge \frac{TFG_{kl}^{m}}{cap^{v}} \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m = \{g\} \ , v \in V \tag{۱۴}$$

$$ICG_{kl}^{m} = num_{kl}^{v} CV^{v} \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m = \{g\} \ , v \in V \tag{۱۵}$$

$$TFM_{kl}^{m} \ge \sum_{\ldots} f_{ij}^{e} Y_{ijkl}^{m} \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m \in M \tag{۱۶}$$

$$ICM_{kl}^{m} = \left(TFM_{kl}^{m} / Size^{m}\right)\left(C_{kl}^{m} + d_{kl}^{m}\right) \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m \in M \tag{۱۷}$$

$$ST_{ij} = \left[\sum_{k\ :k\neq i} tt_{ik}^{g} X_{ik} + \sum_{k,l\ :k\neq l\ ,t} ot_k^{m} + \left(\alpha^{m} tt_{ij}^{m}\right) + ot_l^{m} + \sum_{k:k\neq j} tt_{kj}^{g} X_{kj}\right] Y_{ijkl}^{m} + tt_{ij}^{m} \hat{Y}_{ij} \qquad \forall i,j \in N : i \neq j \tag{۱۸}$$

$$ST_{ij} \le SB_{ij} \qquad \forall i,j \in N : i \neq j \tag{۱۹}$$

$$HU_k \le \sum_{\forall i\in N} X_{ik} \tag{۲۰}$$

$$\sum_{\forall i\in N} X_{ik} \le MHU_k \tag{۲۱}$$

$$H_k^{mt} \in \{0,1\} \qquad \forall k \in H \ , m \in M \ , t \in T \tag{۲۲}$$

$$X_{ik} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in N, k \in H \tag{۲۳}$$

(۲۴)

$$Z_{kl}^{m} \in \{0,1\} \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m \in M \tag{۲۵}$$

$$Y_{ijkl}^{m} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j \in N : i \neq j \ , k,l \in H$$

$$\hat{Y}_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j \in N : i \neq j \tag{۲۶}$$

$$TFG_{kl}^{m} \ge 0 \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m = \{g\} \tag{۲۷}$$

$$num_{kl}^{v} \ge 0 \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m = \{g\} \tag{۲۸}$$

$$ICG_{kl}^{m} \ge 0 \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m = \{g\} \tag{۲۹}$$

$$TFM_{kl}^{m} \ge 0 \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m \in M \tag{۳۰}$$

$$ICM_{kl}^{m} \ge 0 \qquad \forall k,l \in H : k \neq l \ , m \in M \tag{۳۱}$$

$$ST_{ij} \ge 0 \qquad \forall i,j \in N : i \neq j \tag{۳۲}$$

سطح پیرو

$$min \sum_{v\in V} \sum_{i\in\{k|HU_k=1\}\cup S} T_i^{v} \tag{۳۳}$$

Subject to :

$$\sum_{j\in\{k|HU_k=1\}} \sum_{i\in D(v)} X_{ij}^{v} = Z_v \qquad \forall v \in V \tag{۳۴}$$

$$\sum_{i\in D(v)\cup\{k|HU_k=1\}} X_{ij}^{v} = \sum_{i\in\{k|HU_k=1\}\cup S} X_{ji}^{v} \qquad \forall j \in \{k \mid HU_k = 1\}, v \in V \tag{۳۵}$$

$$\sum_{j\in D(v)\cup\{k|HU_k=1\}} X_{ij}^{v} = Y_i^{v} \qquad \forall i \in \{k \mid HU_k = 1\}, v \in V \tag{۳۶}$$

$$Cap_v \, Y_i^{v} \ge Q_i^{v} \qquad \forall i \in \{k \mid HU_k = 1\}, v \in V \tag{۳۷}$$

$$Y_i^{v} \le Q_i^{v} \quad \forall i \in \{k \mid HU_k = 1\} \cup S, v \in V \tag{۳۸}$$

$$\sum_{j\in\{k|HU_k=1\}\cup S} X_{ji}^{v} = Y_i^{v} \qquad \forall i \in S, v \in V \qquad (۳۹)$$

$$\sum_{v\in V} Q_i^{v} = d_i \qquad \forall i \in S \qquad (۴۰)$$

$$X_{ii}^{v} = 0 \qquad \forall i \in N, v \in V \qquad (۴۱)$$

$$\sum_{v\in V} Q_i^{v} \le S_i \qquad \forall i \in \{k \mid HU_k = 1\} \qquad (۴۲)$$

$$\sum_{i\in\{k|HU_k=1\}} Q_i^{v} \le Cap_v \, Z_v \qquad \forall v \in V \qquad (۴۳)$$

$$\sum_{i\in S} Q_i^{v} = \sum_{i\in\{k|HU_k=1\}} Q_i^{v} \qquad \forall v \in V \qquad (۴۴)$$

$$\sum_{v\in V} Z_v \le V \qquad (۴۵)$$

$$T_i^{v} = 0 \qquad \forall i \in D(v), v \in V \qquad (۴۶)$$

$$\left(T_i^{v} + Dt_i + C_{ij}\right) - BigM\left(1 - X_{ij}^{v}\right) \le T_i^{v} \qquad (۴۷)$$
$$\forall j \in \{k \mid HU_k = 1\}, v \in V, i \in D(v) \cup \{k \mid HU_k = 1\}$$

$$\left(T_i^{v} + Dt_i + C_{ij}\right) - BigM\left(1 - X_{ij}^{v}\right) \le T_i^{v} \qquad (۴۸)$$
$$\forall j \in S, v \in V, i \in \{k \mid HU_k = 1\} \cup S$$

$$T_i^{v} \le b_i \qquad \forall v \in V, i \in S \qquad (۴۹)$$

$$X_{ij}^{v}, Y_i^{v}, Z_v \in \{0,1\} \qquad \forall i, j \in N, v \in V \qquad (۵۰)$$

$$T_i^{v}, Q_i^{v} \ge 0 \qquad \forall i \in N, v \in V \qquad (۵۱)$$

معادله (۱) تابع هدف مسئله است که متشکل از ۶ بخش زینه‌ای است. در بخش اول هزینه ثابت احداث تسهیلات، در بخش دوم هزینه احداث زیرساخت بین هابی، در بخش سوم هزینه حمل‌ونقل در صورت حمل مستقیم کالا و در بخش‌های چهارم، پنجم و ششم هزینه حمل‌ونقل در صورت استفاده از شبکه هابی محاسبه می‌شود. محدودیت (۲) تعداد هاب‌های احداثی از هر نوع با پشتیبانی روش حمل‌ونقل معین را مشخص می‌کند. محدودیت (۳) بیان می‌کند که هر گره غیرهاب می‌تواند تنها به یک هاب تخصیص یابد. محدودیت‌های (۴) و (۵) رابطه بین ۲ نوع متغیر احداث تسهیل (یعنی تعداد هاب‌های احداثی از هر نوع با پشتیبانی روش حمل‌ونقل معین و گره غیرهاب تخصیص‌یافته به یک هاب) را برقرار می‌کند. محدودیت (۶) نشان‌دهنده این است که یک گره زمانی می‌تواند به یک هاب تخصیص یابد که هاب مورد نظر احداث شده باشد. کارکرد محدودیت (۷) در این است که یک ارتباط بین هابی با استفاده از یک روش حمل‌ونقل (غیر از جاده‌ای) زمانی می‌تواند برقرار شود که هر ۲ گره مورد نظر به‌عنوان هاب انتخاب شده و از روش مورد نظر پشتیبانی کنند. این ارتباط در روش حمل‌ونقل جاده‌ای مستقل از نوع روش پشتیبانی‌شده در هاب‌ها است؛ چرا که ارتباط جاده‌ای مانند سایر روش‌ها (ریلی و هوایی) نیاز به تسهیلات و تجهیزات خاص ارتباطی، تخلیه و بارگیری ندارد. این مسئله در محدودیت (۸) نشان داده شده؛ جایی که با احداث ۲ هاب در ۲ نقطه ارتباط جاده‌ای بین آن ۲ هاب بدون توجه به نوع روش پشتیبانی‌شده می‌تواند برقرار شود. محدودیت (۹) بیان می‌کند که در صورتی که نقطه‌ای به‌عنوان هاب انتخاب شود، حتماً به هابی دیگر با ارتباط بین هابی متصل خواهد شد. این مسئله موجب می‌شود تا ارتباط بین هاب‌ها به‌صورت مناسب برای حمل کالا با کم‌ترین هزینه ممکن برقرار شود. در محدودیت (۱۰) انتخاب ما بین روش حمل‌ونقل مستقیم و بر اساس هاب صورت می‌گیرد. محدودیت (۱۱) محدودیت تعادل جریان ما بین گره‌هاست. این محدودیت تعیین‌کننده‌ی این است که کدام ارتباط بین هابی برای حمل‌ونقل مابین ۲ گره مورد استفاده قرار گیرد. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که جریان کالایی فقط بر روی پیوندهای هابی احداث‌شده صورت پذیرد. محدودیت (۱۳) مقدار کل کالای حمل‌شده در بین ۲ هاب با استفاده از روش حمل جاده‌ای را محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۴) تعداد وسیله مورد نیاز از هر نوع را تعیین می‌کند و محدودیت (۱۵) هزینه حمل‌ونقل جاده‌ای بین هابی را محاسبه می‌کند. در محدودیت (۱۶) مقدار کل کالای حمل‌شده بین هابی برای سایر روش‌های حمل‌ونقل (غیر از جاده‌ای) محاسبه می‌شود و در محدودیت (۱۷) هزینه این نوع حمل‌ونقل ما بین ۲ هاب مشخص می‌شود. محدودیت (۱۸) کل زمان خدمت بین ۲ گره را محاسبه کرده و محدودیت (۱۹) کران مربوط به آن را مشخص می‌کند. محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱) تضمین می‌کند که در صورت تخصیص تعدادی از نقاط تقاضا به یک هاب آن هاب به‌عنوان نقطه انتهایی مسیر درنظرگرفته شود. این محدودیت‌ها نقطه ارتباط بین سطح رهبر و پیرو هستند که در آن هاب‌های انتهای مسیر که توسط رهبر تعیین می‌شوند، همان مراکز تأمین کالا برای سطح پیرو خواهند بود. محدودیت‌های (۲۲) تا (۳۲) نامنفی، صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم مسئله را نشان می‌دهد.

تابع هدف (۳۳) کل زمان رسیدن وسایل حمل‌ونقل به مراکز تأمین اقلام امدادی و پناهگاه‌ها را نشان می‌دهد. محدودیت (۳۴) بیانگر این است که در صورت اعزام وسیله حمل‌ونقل، آن وسیله از انباری که در آن مستقر شده به سمت یکی از تأمین‌کننده‌ها شروع به حرکت می‌کند. محدودیت (۳۵) محدودیت تعادل جریان برای مراکز تأمین اقلام امدادی را نشان می‌دهد. محدودیت (۳۶) بیانگر این است که اگر وسیله‌ای به مرکز تأمینی اختصاص یابد، قبل از آن فقط انبار محل استقرار وسیله یا یک مرکز تأمین دیگری وجود دارد. محدودیت‌های (۳۷) و (۳۸) رابطه بین ۲ متغیر Q_i^{v} و Y_i^{v} را برای هر مرکز تأمین اقلام امدادی و هر پناهگاه نشان می‌دهد که در محدودیت (۳۷) زمانی که Q_i^{v} مقدار بزرگ‌تر از صفر می‌گیرد، سبب می‌شود که Y_i^{v} مقدار یک را اختیار کند و در محدودیت (۳۸) زمانی که Q_i^{v} مقدار صفر را اختیار می‌کند، باعث می‌شود Y_i^{v} مقدار صفر را انتخاب کند. محدودیت (۳۹) بیانگر این است که اگر

وسیله‌ای به یک پناهگاه اختصاص یابد، قبل از آن پناهگاه فقط یک مرکز تأمین اقلام امدادی قرار گرفته است. محدودیت (۴۰) میزان تقاضای هر پناهگاه را برای اقلام امدادی نشان می‌دهد. محدودیت (۴۱) از ایجاد حلقه در هر گره از شبکه جلوگیری می‌کند. محدودیت(۴۲) حداکثر میزان موجودی اقلام امدادی برای هر مرکز تأمین را نشان می‌دهد. محدودیت (۴۳) بیانگر حداکثر ظرفیت هر وسیله حمل‌ونقل است. محدودیت (۴۴) بیانگر این است که هر وسیله حمل‌ونقل تعداد اقلامی که از مراکز تأمین مختلف بارگیری می‌کند، با تعداد اقلامی که در پناهگاه تخلیه می‌کند، با هم برابر است. محدودیت (۴۵) حداکثر تعداد وسایل حمل ونقل در دسترس را نشان می‌دهد. محدودیت (۴۶) بیانگر این است که زمان شروع حرکت هر وسیله حمل‌ونقل از انبار محل استقرارش صفر درنظرگرفته می‌شود. محدودیت‌های(۴۷) و (۴۸) زمان رسیدن هر وسیله حمل‌ونقل به هر مرکز تأمین اقلام امدادی و هر پناهگاه را به ترتیب نشان می‌دهند. محدودیت (۴۹) بیانگر پنجره زمانی برای زمان رسیدن وسایل امدادی به پناهگاه‌ها است. محدودیت‌های (۵۰) و (۵۱) محدوده مقدارگیری متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۳-۱- روش حل

حل مسئله برنامه‌ریزی چندسطحی به‌منظور رسیدن به پاسخ‌های بهینه سراسری همواره به‌عنوان مسئله‌ای پیچیده در علم تحقیق در عملیات مدنظر محققان بوده و تاکنون روشی جامع برای حل آن ارائه نشده است. در حقیقت حل مسائل برنامه‌ریزی دوسطحی با وجود متغیرهای گسسته در سطح پیرو همواره به‌عنوان مسئله‌ای باز در تحقیق در عملیات مطرح است؛ اما جهت حصول پاسخ‌های عددی قابل اطمینان هر محقق بر اساس ساختار مسئله خود از الگوریتمی ابتکاری استفاده کرده تا بتواند شرایط موجود در مفهوم روش KKT را شبیه‌سازی و مسئله دوسطحی را به‌صورت تک سطحی حل کند.

در این تحقیق الگوریتمی ابتکاری مبتنی بر شمارش کامل به‌منظور حصول پاسخ‌های عددی توسعه یافته است. ساختار این الگوریتم بدین صورت است که در ابتدا تمامی پاسخ‌های ممکن ارائه‌شده توسط سطح رهبر به‌عنوان مجموعه پاسخ‌های اولیه درنظرگرفته می‌شود. سپس سطح پیرو به‌ازای هر یک از این پاسخ اقدام به حل مسئله خود کرده و مجموعه پاسخ‌های حاصله به‌ازای هر یک از اعضای مجموعه پاسخ‌های رهبر را به‌عنوان مجموعه جدیدی ذخیره می‌کند. در نهایت هر یک از پاسخ‌های موجود در مجموعه جدید در مدل سطح رهبر جایگذاری شده و مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود. از بین تمامی نتایج موجود پاسخی که دارای بهترین مقدار عددی است، به‌عنوان پاسخ مطلوب مسئله درنظرگرفته خواهد شد. گام‌های اجرایی این الگوریتم را می‌توان به‌صورت شبه‌کد زیر ارائه داد.

گام ۱- تولید استراتژی‌های تصمیم مختلف سطح رهبر (تعیین تمام پاسخ‌های موجه ممکن)

گام ۲- ذخیره مقدار متغیرهای تصمیم سطح رهبر به‌ازای هر استراتژی تولیدشده در گام یک در مجموعه Strategies

گام ۳- حل مسئله سطح پیرو به‌ازای مقادیر ثابت‌شده متغیرهای سطح رهبر بر اساس مجموعه Strategies

گام ۴- ذخیره مقدار متغیرهای تصمیم تولیدشده برای سطح پیرو در گام ۳ در مجموعه Initial Solutions

گام ۵- جایگذاری هر یک از متغیرهای تصمیم موجود در مجموعه‌های Strategies و Initial Solutions در مدل رهبر و محاسبه (بدون بهینه‌سازی) مدل رهبر به‌ازای هر یک عضو از مجموعه‌ها

گام ۶- انتخاب بهترین پاسخ حاصله بر اساس مقدار تابع هدف مدل رهبر بر اساس ساختار گام ۵ به‌عنوان پاسخ نهایی

موضوع بسیار مهم در اجرای این الگوریتم این است که در کردهای عددی با ابعاد بزرگ نمی‌توان تمامی پاسخ‌های ممکن برای رهبر را تولید کرد. در واقع زمانی‌که ابعاد مثال‌های عددی رشد کند، تعداد پاسخ‌های موجود سطح رهبر به شدت افزایش یافته و عملاً تولید تمام پاسخ‌های موجه غیرممکن است. بنابراین مطلوب به نظر می‌رسد تنها بخشی از پاسخ‌ها به‌عنوان استراتژی‌های مورد بررسی درنظرگرفته شود. اما تعیین مجموعه‌ای مناسب از استراتژی‌ها خود به‌عنوان چالش جدیدی شناخته خواهد شد؛ چراکه در صورت عدم انتخاب چند استراتژی مناسب ممکن است بخشی از فضای پاسخ‌ها که پاسخ بهینه در آن قرار دارد، از دست رفته و عملاً کارکرد الگوریتم غیرقابل ارزیابی باشد. بدین منظور نیاز است که سیاستی مطلوب برای تولید استراتژی‌هایی با کیفیت مدنظر قرار گیرد. بدین منظور در این پژوهش ابتدا با استفاده از یک الگوریتم جست‌وجو محلی مبتنی بر پاسخ، استراتژی‌های مطلوب تولید و سپس گام‌های ۲ تا ۶ الگوریتم اجرا خواهد شد.

۳-۱-۱- الگوریتم جست‌وجوی محلی برای تولید استراتژی‌های سطح رهبر

تلاش می‌کند در طی تکرارهای متوالی یک پاسخ اولیه را از طریق جایگزینی با پاسخ‌های همسایه بهبود ببخشد. اما تعداد پاسخ‌های همسایه یک راه حل غیرقابل شمارش است. بنابراین نقطه قوت یک الگوریتم جست‌وجوی محلی کارا در یافتن پاسخ‌های همسایه مؤثر[۲] است [۱۷]. بدین منظور در این تحقیق ساختاری ابتکاری جهت انجام جست‌وجوهایی با تأثیرگذاری بالا در ایجاد پاسخ‌های متنوع مطابق با رویه زیر ارائه می‌شود.

یک جمعیت P_t با اندازه N (که در آن N تعداد متغیرها را نشان می‌دهد) و یک راه حل $X_{kit}=(X_{1it},X_{2it},\ldots,X_{nit})$ در جمعیت P_t مشخص می‌شود. گفتنی است که n به تعداد متغیرها، i به i-امین راه حل در جمعیت و t به شماره جمعیت اشاره دارد. مجموعه S_{kit} به‌عنوان مجموعه همسایه‌ها روی k-امین متغیر در راه حل $X_{i.t}$ است، تعریف می‌شود.

$$S_{kit}=\left\{W_{kit}^{+},W_{kit}^{-}\right\} \qquad ۵۲$$

$$W_{kit}^{+}=X_{kit}+c\times\left(u_{kit}-v_{kit}\right) \qquad ۵۳$$

$$W_{kit}^{-} = X_{kit} - c \times \left(u_{kit} - v_{kit} \right) \qquad ۵۴$$

که درآن W_{kit}^{+} و W_{kit}^{-} به ۲ همسایه راه حل X_{kit} اشاره دارد. همچنین $u_{kit} = \left(u_{1it}, u_{2it}, \ldots, u_{nit} \right)$، $k = \{1,2,\ldots,n\}$. و $v_{kit} = \left(v_{1it}, v_{2it}, \ldots, v_{nit} \right)$، $k = \{1,2,\ldots,n\}$ به ۲ راه حل تصادفی انتخاب‌شده از جمعیت P_t و c به فاکتور به‌هم‌ریختگی که طبق توزیع نرمال $N = \left(\mu, \sigma^2 \right)$ به‌دست می‌آید، اشاره دارد. استفاده از توزیع نرمال مطابق یک روش ارزیابی[۳] (ES) است. عملگر جهش در (ES)، از طریق اضافه کردن random noise drawn با استفاده از توزیع نرمالی طبق رابطه (۵۵) بر روی پاسخ‌های موجود اعمال می‌شود:

$$X_i^{'} = X_i + N\left(0, \sigma^2\right) \qquad ۵۵$$

که درآن X_i به متغیر راه حل اشاره دارد. $X_i^{'}$ یک مقدار جدید از X_i به وسیله اجرای یک عملگر جهش و σ توان جهش نامیده می‌شود. اما فاکتور به‌هم‌ریختگی مورد استفاده در الگوریتم جست‌وجوی محلی پیشنهادی کمی با (ES) متفاوت است. تفاوت اصلی در این ۲ الگوریتم شامل ۲ بخش زیر است:

شیوه به‌هم‌ریختگی متفاوت است. در الگوریتم پیشنهادی ارزش به‌هم‌ریختگی طبق $N = \left(\mu, \sigma^2 \right)$ بوده و در $\left(u_{kit} - v_{kit} \right)$ ضرب می‌شود؛ در حالی که در ES فاکتور به‌هم‌ریختگی به‌منظور تولید فرزند جدید به‌طور مستقیم به مقدار متغیر اضافه می‌شود.

تنظیمات σ هم متفاوت است. در الگوریتم پیشنهادی مقدار σ ثابت است؛ در حالی که در ES مقدار σ براساس برخی قوانین موجود در ES تغییر می‌کند.

در حقیقت استفاده از فاکتور به‌هم‌ریختگی در الگوریتم جست‌وجوی محلی ارائه‌شده، به‌عنوان یک معیار تصمیم‌گیر درنظرگرفته نشده است. اما به هرحال دارای تأثیر کمی در روند بهبود اجرای الگوریتم است. برای فاکتورهای u و v هم بایستی تنظیمات دقیقی را انجام داد. برای فاکتور u می‌توان به راحتی توجیه کرد که باید دارای مقدار بزرگ‌تر از صفر (u>0) باشد. همچنین در مورد مقدار آن هم باید دقت کرد؛ چراکه مقادیر بسیار بزرگ باعث می‌شود که مقدار $\left(u_{kit} - v_{kit} \right)$ همچنان بسیار بزرگ باشد و باعث تشدید فاکتور به‌هم‌ریختگی الگوریتم می‌شود. از طرفی مقادیر بسیار کوچک آن باعث می‌شود که مقدار $\left(u_{kit} - v_{kit} \right)$ هم بسیار کوچک شده و با ضرب شدن فاکتور c در آن مقدار بسیار کوچک‌تری حاصل و فاکتور به‌هم‌ریختگی بسیار کم شود که در نهایت میزان همگرایی الگوریتم هم کم می‌شود. در مورد پارامتر σ هم می‌توان به راحتی گفت که باید دارای مقدار بزرگ‌تر از صفر باشد. به علاوه اگر σ بسیاربزرگ یا بسیارکوچک باشد، پارامتر c تحت تأثیر قرار گرفته و متعاقباً همگرایی الگوریتم تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. پیشنهاد می‌شود مقادیر σ و μ در بازه $[0,1]$ باشد.

در هر تولید پاسخ در روند اجرای الگوریتم جست‌وجوی محلی یک مجموعه از همسایه‌های k-امین متغیر از پاسخ $X_i^{'}$ بر اساس معادلات (۱۷-۴)-(۱۹-۴) تولید می‌شود. سپس در مورد اینکه آیا ۲ پاسخ همسایه می‌توانند به‌عنوان پاسخ موجود جایگزین شوند یا نه، از یک استراتژی جایگزینی استفاده می‌شود. در این استراتژی فرض براین است که ۲ پاسخ موجود هستند: راه حل همسایه W و راه حل موجود X به‌منظور مقایسه پاسخ‌ها ۳ حالت زیر می‌تواند رخ دهد:

۱. پاسخ X توسط پاسخ W مغلوب می‌شود. $(W \succ X)$
۲. پاسخ W توسط پاسخ X مغلوب می‌شود. $(W \prec X)$
۳. هر ۲ پاسخ X و W توسط دیگری نامغلوب هستند. $(W \prec\succ X)$

مراحل استراتژی جایگزینی مطابق با شبه کد یک است.

مشخص است که با جایگزینی پاسخی موجود با هر پاسخ همسایه دیگر الگوریتم به سمت یافتن پاسخ نهایی همگرا می‌شود. اگر $W_{kit}^{+} \prec\succ X_{it}$ یا $W_{kit}^{-} \prec\succ X_{it}$ باشد، یک راه حل همسایه برای جایگزینی X_{it} انتخاب می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که میزان همگرایی پاسخ‌ها افزایش یابد؛ بنابراین در نهایت مجموعه‌ای از پاسخ‌های اولیه با کیفیت بالا خواهیم داشت. با توجه به اینکه پاسخ‌های تولیدشده دارای ساختاری موجه هستند، بنابراین می‌توان از آن‌ها به‌عنوان استراتژی‌های اولیه در سطح رهبر استفاده کرد.

$$If: \left(w_{kit}^{+} \succ x_{it} \text{ and } w_{kit}^{-} \succ x_{it} \right) \leftrightarrow \left(x_{it} \leftarrow randomly(w_{kit}^{+} \text{ or } w_{kit}^{-}) \right)$$
$$else\,If: \left(w_{kit}^{+} \succ x_{it} \text{ or } w_{kit}^{-} \succ x_{it} \right) \leftrightarrow \left(x_{it} \leftarrow dominated(w_{kit}^{+} \text{ or } w_{kit}^{-}) \right)$$
$$else\,If: \left(w_{kit}^{+} \prec\succ x_{it} \text{ and } w_{kit}^{-} \prec\succ x_{it} \right) \leftrightarrow \left(x_{it} \leftarrow randomly(w_{kit}^{+} \text{ or } w_{kit}^{-}) \right)$$
$$else\,If: \left(w_{kit}^{+} \prec\succ x_{it} \right) \leftrightarrow \left(x_{it} \leftarrow w_{kit}^{+} \right)$$
$$else\,If: \left(w_{kit}^{-} \prec\succ x_{it} \right) \leftrightarrow \left(x_{it} \leftarrow w_{kit}^{-} \right)$$
$$else: Do_nothing$$

شبه کد ۱- مراحل استراتژی جایگزینی پاسخ‌ها

۴- ارزیابی عملکرد مدل تحقیق

در این بخش به‌منظور بررسی صحت عملکرد مدل ارائه‌شده، یک مثال‌های عددی مطابق با ساختار ارائه‌شده در بخش (۴-۱) تولید خواهد شد و به کمک الگوریتم ابتکاری تحقیق حل می‌شود. گفتنی است که مدل‌های تحقیق در رویه الگوریتم ابتکاری با استفاده از حل‌کننده Cplex ۱۲ در محیط نرم‌افزار GAMS ۲۴ حل خواهد شد.

۴-۱- ساختار تولید مثال عددی

با توجه به اینکه بررسی دقیق کارایی مدل ریاضی و البته الگوریتم‌های حل نیازمند حل نمونه‌های عددی مختلف در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ دارد، بنابراین باید تعداد زیادی مثال عددی طراحی شود. اما این کار نیازمند صرف زمان بسیاری خواهد بود؛ چراکه مقداردهی به تک‌تک پارامترها باید بر اساس شرایط موجود در دنیای واقعی باشد. از این رو، به‌منظور صرفه‌جویی زمانی رویه‌ای کلی برای تولید نمونه‌های عددی درنظرگرفته خواهد شد تا بتوان با سرعت بیشتری تمام پارامترهای لازم جهت مثال‌های عددی را تولید کرد. بدین منظور در ابتدا برای هر مثال کوچک تعداد گره‌های شبکه به‌صورت تصادفی از بازه ۱۰ تا ۳۰ انتخاب خواهد شد. در واقع $N_{\text{کوچک}} = random[10-30]$. برای مثال‌های متوسط و بزرگ هم $N_{\text{متوسط}} = random[30-80]$ و در نهایت $N_{\text{بزرگ}} = random[80-200]$. اما برای تعیین گره‌های بالقوه جهت احداث هاب خواهیم داشت $H_{\text{کوچک}} = 0.2 \times N_{\text{کوچک}}$، $H_{\text{متوسط}} = 0.2 \times N_{\text{متوسط}}$ و $H_{\text{بزرگ}} = 0.2 \times N_{\text{بزرگ}}$. انواع تسهیلات هم برای مثال‌های عددی کوچک برابر با $T_{\text{کوچک}} = 2$، برای مثال‌های متوسط و بزرگ برابر با $T_{\text{متوسط و بزرگ}} = 3$ درنظرگرفته خواهد شد. روش‌های حمل‌ونقل همواره برابر با $M = 2$ (روش زمینی و هوایی) خواهد بود. نوع کالاها برای مثال‌های عددی در ابعاد کوچک به ترتیب به‌صورت $E_{\text{کوچک}} = random[2-5]$، $E_{\text{متوسط}} = random[6-12]$ و $E_{\text{بزرگ}} = random[14-25]$ است. در مورد انواع وسایل حمل‌ونقل زمینی هم خواهیم داشت $V_{\text{کوچک}} = random[2-3]$، $V_{\text{متوسط}} = random[4-6]$ و $V_{\text{بزرگ}} = random[7-10]$. در تولید مقدار پارامترهای ورودی هم $P^t_{\text{کوچک}} = [2-4]$، $P^t_{\text{متوسط}} = [5-7]$ و $P^t_{\text{بزرگ}} = [5-10]$. هزینه احداث هاب‌ها برای تمامی مثال‌ها دارای بازه یکسانی خواهد بود؛ بنابراین $FH^{mt}_k = [1000-2000]\times 10^7$ ریال است. همچنین مقدار پارامتر جریان بین گره‌ها $f^e_{ij} = [50-100]$ است. هزینه انتقال هر واحد کالا بین هاب‌ها در بازه $\hat{C}_{ij} = [200-500]\times 10^4$ ریال است. هزینه اتصال هاب‌ها هم در بازه $HL^m_{kl} = [2000-3000]\times 10^4$ درنظرگرفته می‌شود. ظرفیت وسایل نقلیه جهت جابه‌جایی به‌صورت تصادفی از مجموعه انتخاب $cap^v = \{10,30,50\}$ تن می‌شود. در رابطه با هزینه استفاده از وسایل نقلیه زمینی هم مجموعه $CV^v \in \{1000,2000,3000\}\times 10^4$ ریال درنظرگرفته می‌شود. ظرفیت کانتینرهای حمل غیرزمینی هم در بازه $Size^m = [50,100]$ تن است. هزینه تخلیه و بارگیری کانتینرهای هم در بازه $d^m_{kl} = [800-1000]\times 10^4$ ریال است. زمان حمل‌نقل بین گره‌ها هم بر اساس تابعی خطی از فاصله اقلیدسی بین آن‌ها درنظرگرفته می‌شود. زمان عملیاتی مورد نیاز برای روش حمل‌ونقل هم در بازه $ot^m_k = [1-3]$ است. سایر پارامترها هم به‌صورت بازه‌های زیر درنظرگرفته خواهد شد.

بدین صورت تمامی پارامترها ورودی مسئله در بازه‌های عددی منطقی مقداردهی شده و می‌توان به کمک آن‌ها کردهای عددی را حل کرد.

۴-۲- نتایج عددی

به‌منظور بررسی عملکرد مدل ارائه‌شده یک مثال عددی در ابعاد بزرگ (کوشیده شده که بزرگ‌ترین ابعاد ممکن درنظرگرفته شود) مطابق با تشریحات ارائه‌شده در بخش (۴-۱) طراحی شده است. مطابق با ساختار الگوریتم ابتکاری ارائه‌شده، لازم است که ابتدا استراتژی‌های مربوط به تصمیمات سطح رهبر تولید شود.

C_{ij}	=	زمان حمل محصولات از گره $i \in N$ به گره $j \in N$	ساعت $[10-50]$
S_i	=	مقدار عرضه اقلام امدادی مرکز تأمین $i \in N$	$[5000-20000]$
d_i	=	تقاضای پناهگاه $i \in S$ برای اقلام امدادی	$[200-1000]$
b_i	=	حداکثر زمان رسیدن کالاها به گره متقاضی $i \in S$	ساعت $[100-150]$
Cap_v	=	ظرفیت وسیله نقلیه $v \in V$	تن $[10-50]$

جدول ۱- مجموعه استراتژی‌های تولیدشده برای سطح رهبر

سناریو	اقدامات	قطاع‌های انتخابی
۱	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۲-۱-۳۲-۳۶-۴-۱۸-۱۴-۳۳-۳۰-۹-۲۸-۱۲-۲۰-۳۴-۵-۱۱-۲۲
	هاب‌های احداث‌شده	۱۱-۱۶-۲۳-۱۰-۲۲-۲۵-۸-۴
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳۵-۲۰-۷-۳۶-۱-۲۳-۸-۲۷-۳۱-۴۰-۹-۱۱-۲۹-۳۹-۲۱-۱۸-۶-۳۲-۱۴-۵
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۲۸-۲-۳-۲۰-۴-۲۹-۴۰

ادامه جدول ۱- مجموعه استراتژی‌های تولیدشده برای سطح رهبر

سناریو	اقدامات	قطاع‌های انتخابی
۲	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۴۰-۱۲-۳۳-۲۴-۱۹-۳۴-۲۱-۳۵-۱-۷-۳-۱۷-۵-۱۳-۱۱-۳۶-۲۶
	هاب‌های احداث‌شده	۱۳-۳۷-۹-۳۹-۳۰-۳۴-۳۵-۳-۵-۱-۶-۳۲-۳۱-۲۶-۲۹-۲۵-۱۲
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳-۲۹-۱۸-۲۷-۳۰-۲۵-۱۹-۳۱-۵-۴-۲۶-۱۷
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۷-۳-۲۶-۲۷-۲۰-۱۶-۳۱-۱۲-۶-۱۹-۲۵-۳۶-۱۰
۳	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۱۵-۱۸-۲۳-۱۳-۳۶-۳۲-۴۰-۷-۲۶-۲۹-۲۷-۳۰-۱۹-۱۷
	هاب‌های احداث‌شده	۸-۲۹-۱۸-۶-۱۳-۲۲-۷
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳-۱۷-۷-۹-۲۷-۳۰-۱۶-۲۲-۴-۳۹-۱۲-۱۵-۳۵-۱-۲۰-۲-۳۶
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۲۰-۱۹-۳۱-۲۲-۶-۲-۳۹-۳۳-۱۱-۳۲-۴-۲۷-۸-۳۷-۱-۲۱-۲۴-۳۴-۳۵
۴	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۲۴-۱۱-۲-۲۸-۹-۱۶-۴۰-۱۲-۳۴
	هاب‌های احداث‌شده	۹-۳۱-۲۵-۶-۴-۱۵-۲۹-۳۶-۸-۳۵-۳۸-۲۱
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳۹-۲۵-۹-۱۹-۱۸-۱-۱-۲۱-۱۴-۳۱-۱۳-۴۰-۲۳-۲۸-۳۵-۱۵-۲۰-۲۶
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۳۴-۲۶-۳۱-۳۷-۱۲-۲۱-۲۹-۸-۱۸-۳۳-۶-۲-۲۵-۱۰-۱۴-۳۲-۵-۱۱-۳۵-۳۶
۵	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۲-۱-۳۲-۳۶-۴-۱۸-۱۴-۳۳-۳۰-۹-۲۸-۱۲-۲۰-۳۴-۵-۱۱-۲۲
	هاب‌های احداث‌شده	۱۱-۱۶-۲۳-۱۰-۲۲-۲۵-۸-۴
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳۵-۲۰-۷-۳۶-۱-۲۳-۸-۲۷-۳۱-۴۰-۹-۱۱-۲۹-۳۹-۲۱-۱۸-۶-۳۲-۱۴-۵
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۲۸-۲-۳-۲۰-۴-۲۹-۴۰
۶	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۴۰-۱۲-۳۳-۲۴-۱۹-۳۴-۲۱-۳۵-۱-۷-۳-۱۷-۵-۱۳-۱۱-۳۶-۲۶
	هاب‌های احداث‌شده	۱۳-۳۷-۹-۳۹-۳۰-۳۴-۳۵-۳-۵-۱-۶-۳۲-۳۱-۲۶-۲۹-۲۵-۱۲
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳-۲۹-۱۸-۲۷-۳۰ ۲۵-۱۹-۳۱-۵-۴-۲۶-۱۷
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۷-۳-۲۶-۲۷-۲۰-۱۶-۳۱-۱۲-۶-۱۹-۲۵-۳۶-۱۰
۷	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۱۵-۱۸-۲۳-۱۳-۳۶-۳۲-۴۰-۷-۲۶-۲۹-۲۷-۳۰-۱۹-۱۷
	هاب‌های احداث‌شده	۸-۲۹-۱۸-۶-۱۳-۲۲-۷
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳-۱۷-۷-۹-۲۷-۳۰-۱۶-۲۲-۴-۳۹-۱۲-۱۵-۳۵-۱-۲۰-۲-۳۶
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۲۰-۱۹-۳۱-۲۲-۶-۲-۳۹-۳۳-۱۱-۳۲-۴-۲۷-۸-۳۷-۱-۲۱-۲۴-۳۴-۳۵
۸	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۲۴-۱۱-۲-۲۸-۹-۱۶-۴۰-۱۲-۳۴
	هاب‌های احداث‌شده	۹-۳۱-۲۵-۶-۴-۱۵-۲۹-۳۶-۸-۳۵-۳۸-۲۱
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳۹-۲۵-۹-۱۹-۱۸-۱-۱-۲۱-۱۴-۳۱-۱۳-۴۰-۲۳-۲۸-۳۵-۱۵-۲۰-۲۶
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۳۴-۲۶-۳۱-۳۷-۱۲-۲۱-۲۹-۸-۱۸-۳۳-۶-۲-۲۵-۱۰-۱۴-۳۲-۵-۱۱-۳۵-۳۶
۹	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۲-۱-۳۲-۳۶-۴-۱۸-۱۴-۳۳-۳۰-۹-۲۸-۱۲-۲۰-۳۴-۵-۱۱-۲۲
	هاب‌های احداث‌شده	۱۱-۱۶-۲۳-۱۰-۲۲-۲۵-۸-۴
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳۵-۲۰-۷-۳۶-۱-۲۳-۸-۲۷-۳۱-۴۰-۹-۱۱-۲۹-۳۹-۲۱-۱۸-۶-۳۲-۱۴-۵
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۲۸-۲-۳-۲۰-۴-۲۹-۴۰
۱۰	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۴۰-۱۲-۳۳-۲۴-۱۹-۳۴-۲۱-۳۵-۱-۷-۳-۱۷-۵-۱۳-۱۱-۳۶-۲۶
	هاب‌های احداث‌شده	۱۳-۳۷-۹-۳۹-۳۰-۳۴-۳۵-۳-۵-۱-۶-۳۲-۳۱-۲۶-۲۹-۲۵-۱۲
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳-۲۹-۱۸-۲۷-۳۰ ۲۵-۱۹-۳۱-۵-۴-۲۶-۱۷
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۷-۳-۲۶-۲۷-۲۰-۱۶-۳۱-۱۲-۶-۱۹-۲۵-۳۶-۱۰
۱۱	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۱۵-۱۸-۲۳-۱۳-۳۶-۳۲-۴۰-۷-۲۶-۲۹-۲۷-۳۰-۱۹-۱۷
	هاب‌های احداث‌شده	۸-۲۹-۱۸-۶-۱۳-۲۲-۷
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳-۱۷-۷-۹-۲۷-۳۰-۱۶-۲۲-۴-۳۹-۱۲-۱۵-۳۵-۱-۲۰-۲-۳۶
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۲۰-۱۹-۳۱-۲۲-۶-۲-۳۹-۳۳-۱۱-۳۲-۴-۲۷-۸-۳۷-۱-۲۱-۲۴-۳۴-۳۵
۱۲	لینک‌های مستقیم ایجادشده	۲۴-۱۱-۲-۲۸-۹-۱۶-۴۰-۱۲-۳۴
	هاب‌های احداث‌شده	۹-۳۱-۲۵-۶-۴-۱۵-۲۹-۳۶-۸-۳۵-۳۸-۲۱
	لینک‌های ایجادشده بین هاب و مناطق	۳۹-۲۵-۹-۱۹-۱۸-۱-۱-۲۱-۱۴-۳۱-۱۳-۴۰-۲۳-۲۸-۳۵-۱۵-۲۰-۲۶
	لینک‌های ایجادشده بین هاب‌ها	۳۴-۲۶-۳۱-۳۷-۱۲-۲۱-۲۹-۸-۱۸-۳۳-۶-۲-۲۵-۱۰-۱۴-۳۲-۵-۱۱-۳۵-۳۶

بدین منظور ۱۲ استراتژی برتر انتخاب و مطابق با جدول ۱ ارائه می‌شود.

این استراتژی‌ها به‌عنوان متغیرهای ثابت‌شده وارد مدل سطح پیرو شده و توسط حل‌کننده Cplex حل می‌شود. در جدول زیر مقدار تابع هدف حاصل از حل مدل پیرو پس از ثابت شدن متغیرهای سطح رهبر ارائه شده است.

جدول ۲- مقدار تابع هدف سطح پیرو به‌ازای هریک از استراتژی‌های سطح رهبر

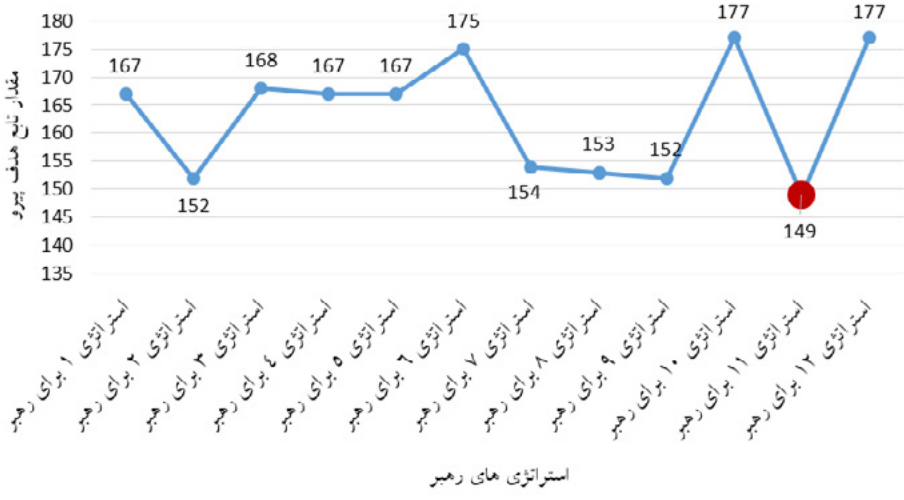
استراتژی تولیدشده توسط رهبر	مقدار تابع هدف پیرو	استراتژی تولیدشده توسط رهبر	مقدار تابع هدف پیرو
۱	۱۶۷	۷	۱۵۴
۲	۱۵۲	۸	۱۵۳
۳	۱۶۸	۹	۱۵۲
۴	۱۶۷	۱۰	۱۷۷
۵	۱۶۷	۱۱	۱۴۹
۶	۱۷۵	۱۲	۱۷۷

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌ازای استراتژی ۱۱ تابع هدف پیرو دارای کمترین مقدار ممکن است. به کمک نمودار زیر می‌توان این برتری را به‌صورت مشخص‌تری مشاهده کرد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، استراتژی ۱۱ با داشتن مقدار ۱۴۹ ساعت برای تابع هدف پیرو دارای بهترین مقدار ممکن است. اما مطابق با گام‌ها الگوریتم تحقیق نیاز است که دوباره متغیرهای تولیدشده برای سطح پیرو در مدل رهبر جایگذاری شده و بهترین مقدار ممکن برای هر ۲ مدل استخراج شود. در جدول زیر، مقدار تابع هدق رهبر به‌ازای جایگزینی متغیرهای سطح پیرو در آن ارائه می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از جایگذاری مقدار متغیرهای تصمیم پیرو به‌ازای هر استراتژی در سطح رهبر، مقدار ۱۲۴۷۹۱۲۳۶۶۸ کمترین عددی تولید شده برای رهبر است. این مقدار تابع هدف به‌ازای استراتژی ۲ و مقدار تابع هدف سطح پیرو ۱۵۲ است. در حقیقت این مقدار بهترین تصمیم ممکن برای تصمیمات همزمان رهبر و پیرو است. نمودار زیر به‌صورت واضح برتری استراتژی ۲ به‌عنوان پاسخ نهایی برای تمامی تصمیمات را نشان می‌دهد.

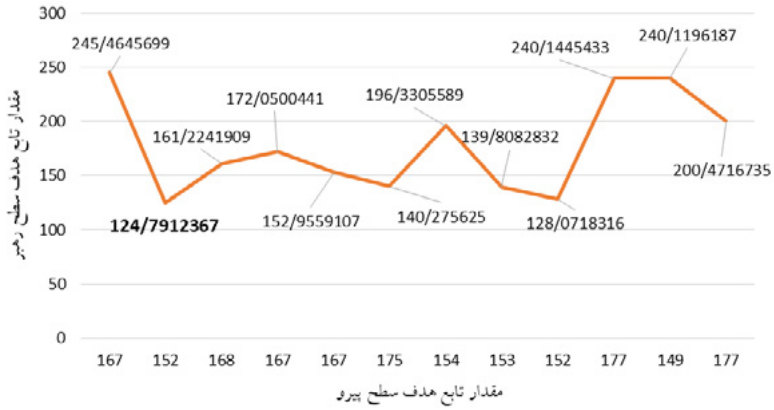
بنابراین می‌توان تصمیم بهینه برای این مثال عددی را بدین صورت ارائه داد که مقدار تابع هدف سطح رهبر برابر با ۱۲۴۷۹۱۲۳۶۶۸ تومان، تابع هدف سطح پیرو برابر با ۱۵۲ ساعت و استراتژی نهایی جهت پیاده‌سازی استراتژی ۲ است. بدین صورت مشاهده می‌شود که الگوریتم ارائه‌شده، قادر به تولید پاسخ‌های بهینه محلی است. واضح است که تولید پاسخ بهینه سراسری



شکل ۲- مقدار تابع هدف سطح پیرو به‌ازای استراتژی‌های رهبر

جدول ۳- مقدار تابع هدف سطح رهبر به‌ازای تصمیمات پیرو

استراتژی تولیدشده توسط رهبر	مقدار تابع هدف پیرو	مقدار تابع هدف رهبر	استراتژی تولیدشده توسط رهبر	مقدار تابع هدف پیرو	مقدار تابع هدف رهبر
۱	۱۶۷	۲۴۵۴۶۴۵۶۹۹۴	۷	۱۵۴	۱۹۶۳۳۰۵۵۸۸۷
۲	۱۵۲	۱۲۴۷۹۱۲۳۶۶۸	۸	۱۵۳	۱۳۹۸۰۸۲۸۳۱۵
۳	۱۶۸	۱۶۱۲۲۴۱۹۰۸۸	۹	۱۵۲	۱۲۸۰۷۱۸۳۱۵۷
۴	۱۶۷	۱۷۲۰۵۰۰۴۴۰۵	۱۰	۱۷۷	۲۴۰۱۴۴۵۴۳۳۴
۵	۱۶۷	۱۵۲۹۵۵۹۱۰۶۶	۱۱	۱۴۹	۲۴۰۱۱۹۶۱۸۶۵
۶	۱۷۵	۱۴۰۲۷۵۶۲۵۰۱	۱۲	۱۷۷	۲۰۰۴۷۱۶۷۳۴۵



شکل ۳- مقدار تابع هدف سطح رهبر به‌ازای هریک از توابع هدف سطح پیرو

جدول ۴- تحلیل حساسیت مدل در حالت استفاده و عدم استفاده از هاب لجستیکی

ردیف	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف در حالت عدم استفاده از هاب	مقدار تابع هدف در حالت استفاده از هاب	میزان بهبود
۱	۱۲۲،۴۲۷	۱۵۷۳۱۸۶۰۰۰	۱۵۷۳۱۸۶۰۰۰	-
۲	۱۲۱،۶۹۱	۱۶۳۱۶۰۷۰۰۰	۱۶۳۱۶۰۷۰۰۰	-
۳	۱۱۰،۵۰۹	۱۱۸۹۵۵۷۰۰۰	۱۱۸۹۵۵۷۰۰۰	-
۴	۱۲۴،۷۷۹	۶۷۶۰۴۲۰۰۰	۶۷۶۰۴۲۰۰۰	-
۵	۱۳۹،۵۱۷	۳۳۵۰۳۱۶۰۰۰	۳۲۰۴۷۹۳۰۰۰	۴،۳۴
۶	۱۳۴،۳۷۲	۲۳۶۰۱۹۹۰۰۰	۲۲۴۹۲۲۸۰۰۰	۴،۷۰
۷	۱۰۱،۰۴۳	۲۹۳۱۹۷۵۰۰۰	۲۸۲۱۱۶۴۰۰۰	۳،۷۸
۸	۱۲۴،۹۹۴	۲۳۷۸۱۳۰۰۰۰	۲۳۰۷۶۴۹۰۰۰	۲،۹۶
۹	۱۲۶،۱۷۹	۱۹۴۸۱۰۱۰۰۰	۱۸۶۵۵۹۹۰۰۰	۴،۲۳
۱۰	۱۱۸،۳۵۲	۴۷۱۶۱۵۴۰۰۰	۴۳۹۴۳۵۰۰۰۰	۶،۸۲

نیازمند انجام شمارش کامل تمام استراتژی‌های ممکن برای رهبر است که عملاً غیرقابل انجام است. بنابراین به پاسخ‌های بهینه محلی، اما با کیفیت قابل قبول اکتفا می‌شود.

۴-۲-۱- تحلیل حساسیت

با توجه به اینکه با استفاده از بررسی یک مثال عددی نمی‌توان به‌صورت دقیق در مورد صحت عملکرد یک مدل اظهار نظر کرد، بنابراین نیاز است که حساسیت مدل به‌ازای تغییر در برخی از پارامترهای ورودی برای مدل سطح رهبر به‌صورت شفاف بررسی شود.

۴-۲-۱-۱- استفاده و عدم استفاده از هاب لجستیکی

در این بخش تعداد ۱۰ مثال عددی در ابعاد کوچک طراحی و سپس به کمک حل‌کننده Cplex حل می‌شود تا مقدار تابع هدف در حالت استفاده از هاب لجستیکی و عدم استفاده از ان بررسی شود. انتظار می‌رود که استفاده از هاب لجستیکی بتواند باعث کاهش هزینه به‌صورت محسوس شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار بهبود تابع هدف در مثال‌های یک تا ۴ برابر با صفر بوده که نشان می‌دهد استفاده و عدم استفاده از هاب تأثیری بر مقدار تابع هدف ندارد. البته این موضوع به این دلیل پیش آمده که با توجه به مقدار پارامترهای ورودی مسئله، مدل تصمیم گرفته در صورت وجود و نبود امکان استفاده از هاب همچنان کالاها را به‌صورت مستقیم و بدون استفاده از هاب ارسال کند. اما در مثال‌های ۵ تا ۱۰ شرایط متفاوت شده و مدل تصمیم به استفاده از هاب لجستیکی گرفته است. می‌توان مشاهده کرد که میزان بهبود مشخصی در تابع هدف رخ داده است. نمودار زیر مقدار این سطح بهبود را نشان می‌دهد.

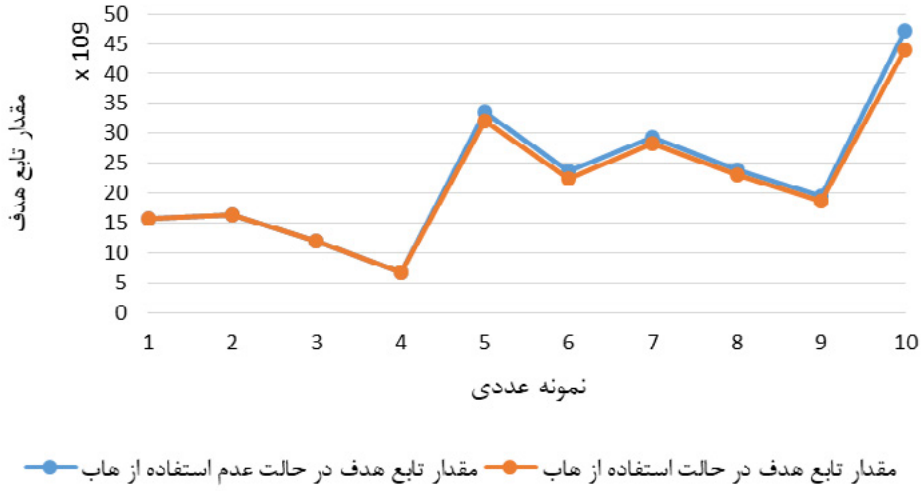
۴-۲-۱-۲- حساسیت زمان حل نسبت به تغییر پارامترهای ورودی

مسئله‌ای دیگری که دارای اهمیت زیادی است، تأثیر زمان حل مسئله در مقادیر مختلف پارامترهای ورودی است. در واقع زمان حل مسئله مورد نظر خواه و ناخواه با تغییر پارامترها و متغیرهای مسئله تغییر خواهد کرد و عوامل متعددی باعث ایجاد تغییرات در زمان حل و همچنین پیچیدگی مسئله خواهند شد. هر کدام از این عوامل به نوبه‌ی خود بر زمان حل تأثیر دارند که به بررسی آن پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه مدل مسئله مورد نظر این تحقیق یک مسئله عددصحیح خطی است، با بزرگ‌تر شدن سایز مسئله زمان حل هم به مراتب افزایش می‌یابد. اما عواملی که بر زمان حل تأثیرگذار هستند، عبارتند از:

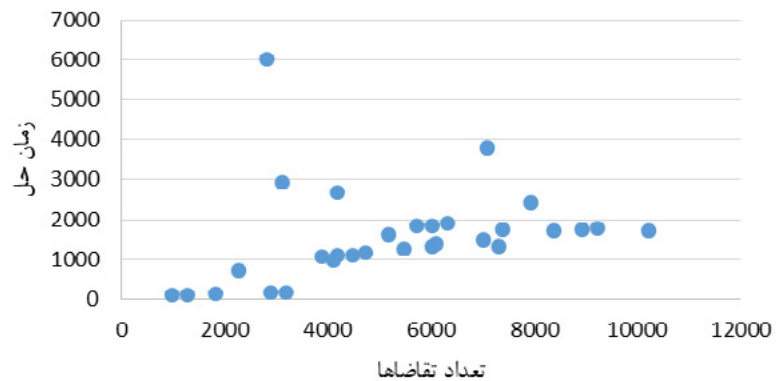
۱. مقدار تقاضا
۲. تعداد محصولات
۳. تعداد وسایل نقلیه

پس از حل کردهای عددی مختلف با مقدار تقاضا، تعداد محصولات و البته تعداد وسایل نقلیه مختلف نمودارهای زیر روند حساسیت زمان حل مسئله نسبت به تغییر این پارامترها را نشان می‌دهد.

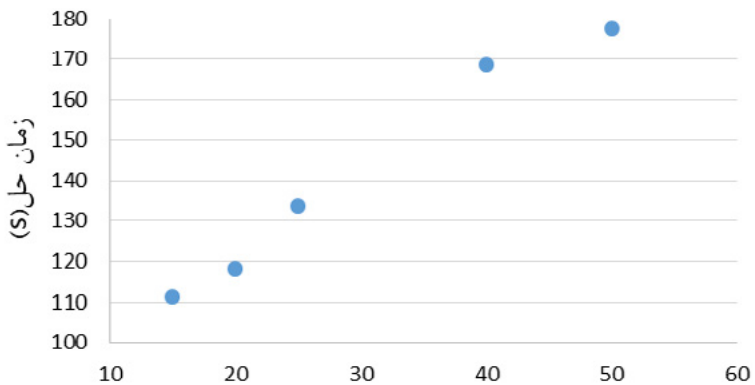
به وضوح مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد تقاضاها یا همان محصولات و بالا رفتن سایز مسئله، زمان حل مسئله هم افزایش می‌یابد؛ به‌طوری که مسئله در سایزهای کوچک به‌صورت آنی به جواب دقیق می‌رسد و با افزایش تعداد محصولات و نزدیک شدن سایز مسئله به سایز دنیای واقعی زمان حل هم بسیار بالاتر خواهد رفت. در این نمودار مشاهده می‌شود، برای بعضی از مسائل زمان حل بسیار بالا است و دلیل اصلی آن طولانی شدن حل در



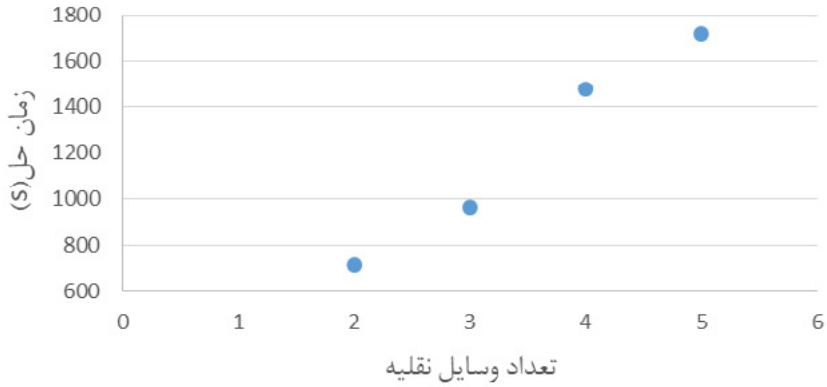
شکل ۴- اختلاف مقدار تابع هدف در استفاده و عدم استفاده از هاب لجستیکی



شکل ۵- تأثیر تعداد تقاضاها بر روی زمان حل



شکل ۶- تأثیر تعداد محصولات بر روی زمان حل



شکل ۷- تأثیر تعداد وسایل نقلیه بر روی زمان حل

نزدیکی گپ مورد نظر است که تبدیل به داده‌ای پرت شده؛ اما بیشتر از یک روند صعودی پیروی می‌کنند.

در نمودار بالا هم مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد محصولات هم زمان حل مسئله از روندی صعودی پیروی می‌کند. به همین صورت در حالت افزایش تعداد وسایل حمل‌ونقل هم می‌توان مشاهده کرد که زمان حل مسئله به‌صورت صعودی افزایش می‌یابد.

بنابراین می‌توان گفت که مدل ارائه‌شده به‌صورت مناسب در برابر تغییر مقدار پارامترهای ورودی مسئله از خود حساسیت نشان می‌دهد که این موضوع خود دلیلی برای کارکرد مناسب مدل ارائه‌شده است. در نهایت می توان نتیجه به‌دست‌آمده از این تحقیق را در قالب پاسخگویی به ۵ پرسش زیر خلاصه کرد.

۱. چگونه می‌توان ساختاری مبتنی بر برنامه‌ریزی دوسطحی به‌منظور مکان‌یابی هاب‌های لجستیکی و مسیریابی-موجودی مراکز تأمین در زنجیره امداد و بلایا ارائه کرد؟

ابتدا مدلی ریاضی به‌منظور تعیین مکان هاب‌ها لجستیکی و ایجاد شبکه انتقال محصولات ارائه شده است. سپس مدلی مستقل به‌منظور مدیریت موجودی و مسیریابی جهت ارائه خدمت طراحی شده است. با توجه به اینکه تعیین مکان احداث هاب‌ها تصمیمی استراتژیک و مدیریت موجودی و مسیریابی تصمیمی تاکتیکی است، بنابراین در ساختاری یکپارچه یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی به گونه‌ای ارائه شده که سطح اول به ایجاد شبکه هاب لجستیکی و سطح پیرو به تعیین میزان موجودی و مسیریابی می‌پردازد.

۲. مکان بهینه احداث هاب‌های لجستیک برای خدمت‌رسانی به متقاضیان در شرایط بحرانی چگونه تعیین می‌شود؟

پاسخ به این پرسش در حل مدل نخست تحقیق است که شبکه هاب لجستیکی را طراحی کرده است. همچنین مدل سطح رهبر هم اقدام به تعیین مکان هاب‌ها کرده است. بنابراین پس از حل این مدل می‌توان از نتایج ان برای تعیین مکان هاب‌های لجستیکی استفاده کرد.

۳. چگونه می‌توان مسیرهای بهینه برای ارائه خدمت به متقاضیان جهت دریافت خدمت در شرایط بحران را مشخص کرد؟

تعیین مسیر حرکت وسایل نقلیه به‌عنوان یک تصمیم تاکتیکی وابسته به تصمیمات مربوط به تشکیل شبکه هاب لجستیکی بوده و بنابراین پس از حل مدل دوم حاصل می‌شود.

۴. سطح موجودی بهینه در هریک از انبارهای احداث‌شده چه مقدار باید باشد تا سطح ارائه خدمات به متقاضیان بیشینه شود؟

مدیریت موجودی هم مشابه با مسیریابی پس از حل مدل دوم حاصل می‌شود. این تصمیمات به‌صورت مستقیم وابسته به تعیین محل هاب‌ها بوده و بنابراین به‌عنوان مدل سطح پیرو ارائه شده است.

۵. استفاده از برنامه‌ریزی چندسطحی تا چه میزان بر اتخاذ تصمیمات نهایی اثرگذار است؟

استفاده از برنامه‌ریزی چندسطحی می‌تواند باعث یکپارچگی تصمیمات و ایجاد تصمیمات بهینه برای هر دوسطحی با توجه به نظرات یکدیگر شود. در صورتی که مدل‌ها به‌صورت مستقل حل شوند، نمی‌توان تضمینی ایجاد کرد که پس از اتخاذ تصمیم در هر سطح، سطح بعدی بتواند نتایج مناسبی را به‌دست آورد. بنابراین در یک ساختار هماهنگ می‌تواند نقطه تعادل تصمیمات تحت عنوان نقطه تعادل استکلبرگ را به‌دست آورد.

پی‌نوشت

1. Maharjan and Hanaoka
2. Efficient neighbor solutions
3. evolution strategies

منابع

1. Van Wassenhove, L.N. and A.J. Pedraza Martinez, Using OR to adapt supply chain management best practices to humanitarian logistics. International Transactions in Operational Research, 2012. 19(1-2): p. 307-322.
2. Tatham, P. and M. Christopher, Humanitarian logistics: Meeting the challenge of preparing for and

responding to disasters. 2018: Kogan Page Publishers.

3. Mejia-Argueta, C., et al., Multicriteria optimization approach to deploy humanitarian logistic operations integrally during floods. International Transactions in Operational Research, 2018. 25(3): p. 1053-1079.
4. Sarma, D., et al. A multi-objective post-disaster relief logistic model. in 2017 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC). 2017. IEEE.
5. Hugos, M.H., Essentials of supply chain management. 2018: John Wiley & Sons.
6. Maharjan, R. and S. Hanaoka, A multi-actor multi-objective optimization approach for locating temporary logistics hubs during disaster response. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 2018. 8(1): p. 2-21.
7. Alumur, S. and B.Y. Kara, Network hub location problems: The state of the art. European journal of operational research, 2008. 190(1): p. 1-21.
8. Tofighi, S., S. Torabi, and S. Mansouri, Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty. European Journal of Operational Research, 2016. 250(1): p. 239-250.
9. Maharjan, R. and S. Hanaoka, A multi-actor multi-objective optimization approach for locating temporary logistics hubs during disaster response. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 2018.
10. Fahimnia, B., et al., Supply chain design for efficient and effective blood supply in disasters. International Journal of Production Economics, 2017. 183: p. 700-709.
11. Cao, C., et al., A novel multi-objective programming model of relief distribution for sustainable disaster supply chain in large-scale natural disasters. Journal of cleaner production, 2018. 174: p. 1422-1435.
12. Zhang, J., Z. Wang, and F. Ren, Optimization of humanitarian relief supply chain reliability: a case study of the Ya'an earthquake. Annals of Operations Research, 2019: p. 1-22.
13. Maharjan, R. and S. Hanaoka, A credibility-based multi-objective temporary logistics hub location-allocation model for relief supply and distribution under uncertainty. Socio-Economic Planning Sciences, 2019: p. 100727.
14. Zarei, M.H., R. Carrasco-Gallego, and S. Ronchi, On the role of regional hubs in the environmental sustainability of humanitarian supply chains. Sustainable Development, 2019.
15. Maharjan, R. and S. Hanaoka, Fuzzy multi-attribute group decision making to identify the order of establishing temporary logistics hubs during disaster response. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 2019. 9(1): p. 2-21.
16. Gutjahr, W.J. and N. Dzubur, Bi-objective bilevel optimization of distribution center locations considering user equilibria. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016. 85: p. 1-22.
17. Aarts, E., E.H. Aarts, and J.K. Lenstra, Local search in combinatorial optimization. 2003: Princeton University Press.