Journal of Operational Research in its Applications
Vol.23, NO.1, Spring 2026
ISSN: 2251-7286
DOI: 10.71773/jamlu-2026-1-2240

Presenting the Hub Location-Routing Model in Conditions of Uncertainty, Possibility of Facility Disruption, Environmental Restrictions and Backup Coverage

A. Darabi[1], G. Abbaspour Esfeden[2*], A. Derakhshan[3], M. Modiri[4]
[1] *Ph.D. Student, Department of Industrial Management, South Tehran .C., Islamic Azad University, Tehran, Iran,*
[2] *Associate Professor, Department of Industrial Management, South Tehran .C., Islamic Azad University, Tehran, Iran,*
[3] *Assistant Professor, Department of Management and Internet Technology, South Tehran .C., Islamic Azad University, Tehran, Iran,*
[4] *Associate Professor, Department of Industrial Management, South Tehran .C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

Research Paper

Received: 10 March 2025
Accepted: 26 July 2025

Abstract: The issue of hub location is one of the most interesting and widely used topics in logistics and supply chain discussions. Despite the many researches that have been done in the field of different branches of the hub, there are many problems in the real world that not considering these limitations and conditions of the real world can reduce the quality of the output answers. This research presented a model for the location, allocation and routing of the hub, considering the uncertainty, the possibility of disruption in the facilities, environmental restrictions and the existence of backup coverage.

Introduction: The multi-objective mathematical programming model was presented for the research problem. Therefore, a model with four objectives including minimizing the total cost, maximizing the minimum reliability between the pair of origin and destination nodes, minimizing the maximum waiting time from each pair of nodes and minimizing the amount of carbon dioxide emissions in the entire network was presented.

Materials and Methods: In this paper, then, using the spatially stable approach, the model was stabilized. Due to the hard structure of the model, NSGA II meta-heuristic approach was used to solve numerical problems in different dimensions. In order to evaluate the performance of the designed model, problems were generated based on a real case of passenger transportation in Iran. The real case includes 37 cities in Iran.

Results and Discussion: This problem was solved in a suitable period by the desired algorithm and the obtained results showed the efficiency of the solution approach in solving problems in real dimensions.

Conclusions: Improved solutions combining multi-periodity, uncertainty, support coverage, and environmental issues are very helpful for location-routing decisions.

Keywords: Location, Routing, Hub, Uncertainty, Facility Disruption, Environment.

** Corresponding Author: gh_abbaspour@azad.ac.ir*

مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال بیست و سوم، شماره اول (پیاپی ۸۸)،بهار ۰۵، ص ص ۱۸۳-۱۵۷
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱
DOI: 10.71773/jamlu-2026-1-2240

ارایه‌ی مدل مکان یابی- مسیریابی هاب در شرایط عدم قطعیت، احتمال اختلال در تسهیلات، محدودیت‌های زیست محیطی و پوشش پشتیبان

علی دارابی[1]، قنبر عباس پور اسفدن[2]، علیرضا درخشان[3]، محمود مدیری[4]
۱-دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲-دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۳-دانشیار، گروه مدیریت و فناوری اطلاعات، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۴- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

رسید مقاله: ۲۰ اسفند ۱۴۰۳
پذیرش مقاله: ۴ مرداد ۱۴۰۴

چکیده

مساله‌ی مکانیابی هاب یکی از مباحث جذاب و پرکاربرد در بحث‌های لجستیک و زنجیره‌تامین می‌باشد. علی رغم پژوهش‌های فراوانی که در زمینه‌ی شاخه‌های مختلف هاب انجام شده است، مسایل بسیار فراوانی در دنیای واقعی وجود دارند که لحاظ نکردن این محدودیت‌ها و شرایط دنیای واقعی می‌تواند کیفیت جواب‌های خروجی را کاهش دهد. این تحقیق به ارایه‌ی مدلی برای مکانیابی، تخصیص و مسیریابی هاب با در نظر گرفتن عدم قطعیت، احتمال اختلال در تسهیلات، محدودیت‌های زیست محیطی و وجود پوشش پشتیبان می‌پردازد. در ابتدا به ارایه مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه برای مساله تحقیق پرداخته می‌شود. لذا مدلی با چهار هدف شامل حداقل‌سازی هزینه‌ی کل، حداکثرسازی حداقل قابلیت اعتماد بین زوج گره‌های مبدا و مقصد، حداقل‌سازی حداکثر زمان انتظار از هر زوج گره و حداقل‌سازی میزان انتشارات کربن‌دی‌اکسید در کل شبکه ارایه شد. سپس با بهره‌گیری از رویکرد استوار مکانی، نسبت به استوارسازی مدل اقدام شد. نظر به ساختار سخت مدل، رویکرد فراابتکاری NSGA II جهت حل مسایل عددی در ابعاد مختلف مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل طراحی‌شده، مسایلی برمبنای یک مورد واقعی از حمل و نقل مسافر در ایران تولید شدند. مورد واقعی شامل ۳۷ شهر در ایران می‌باشد. این مساله در مدت زمانی مناسب توسط الگوریتم مورد نظر حل شد و نتایج به دست آمده، کارآمدی رویکرد در حل مسایلی در ابعاد واقعی را نمایان ساخت.

کلمات کلیدی: مکانیابی، مسیریابی، هاب، عدم قطعیت، اختلال در تسهیلات، زیست محیطی.

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: Gh_abbaspour@azad.ac.ir

۱ مقدمه

مساله‌ی مکانیابی هاب یکی از مباحث جذاب و پرکاربرد در بحث های مکانیابی می‌باشد. هاب مرکز خاصی می‌باشد که در آن یک یا چند تا از عملیات مربوط به سازمان‌دهی، تفکیک، هماهنگی، توزیع و حمل و نقل کالا از طرف واحدهای مختلف تجاری و به وسیله‌ی اپراتورهای مختلف صورت می‌گیرد[۱]. طبق آمار سازمان بین المللی حمل و نقل، ۸۰٪ تجارت جهانی از طریق پایانه‌هایی که نقش هاب را دارند انجام می‌گردد. به جای اتصال هر مبدا به مقصد در یک شبکه‌ی حمل و نقل، در یک شبکه‌ی هاب، جریان مواد از مبدا به هاب ارسال می‌گردد و سپس از هاب به مقصد می‌رود. با این کار، کل شبکه‌ی حمل و نقل از مزیت صرفه‌جویی اقتصادی بهره‌مند می‌گردند[۲]. از آنجایی که هزینه‌ی حمل و نقل بین هاب‌ها نسبت به حمل و نقل بین سایر گره ها ارزان‌تر است، استفاده از هاب در شبکه باعث صرفه‌جویی اقتصادی می‌گردد. در واقع هاب به عنوان یک واسطه‌ی بین مبدا و مقصد عمل نموده وکلیه‌ی جریان‌ها ابتدا به هاب رفته و سپس از هاب مجددا توزیع می‌گردد[۱].

امروزه مساله حمل و نقل با چالش‌های افزایش هزینه عملیاتی و استفاده نکردن از ظرفیت وسیله نقلیه مواجه شده است[۳]. همچنین حجم کالاهای ارسالی کم و فواصل بین مقصدها زیاد است که طراحی مسیرها را برای خدمت‌رسانی به چندین مشتری از یک هاب از لحاظ کارآمدی هزینه و کیفیت خدمات بهتر، با چالش‌هایی مواجه کرده است. علاوه بر این، محدودیت‌های زمانی نیز از مسایل حمل و نقل امروزی است که موجب افزایش قیمت حمل و نقل شده است [۴] و از طرفی دیگر در زمینه تحویل بار، به دلیل تقاضای روزافزون برای خدمات تحویل کارآمد، به موقع و پایدار، مسایل عدم قطعیت در مسیریابی مکان هاب اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند. به خصوص این‌که با افزایش حمل و نقل، آلودگی‌های زیست محیطی نیز از چالش‌های دیگر حمل و نقل می‌باشد [۳]. نامناسب بودن مکان‌یابی زیرساخت‌ها و برنامه‌ریزی مسیریابی وسایل نقلیه، افزایش هزینه‌ها، کاهش کارایی توزیع به دلیل تاخیر در تحول و نارضایتی مشتری را فراهم آورده است [۵]. همچنین، شرکت‌های لجستیکی به دنبال راهکارهایی باری کاهش هزینه، کاهش زمان و کاهش اثرات زیست‌محیطی شبکه‌های حمل‌ونقل خود هستند. به طور کلی بیشتر مسایلی که حمل و نقل با آن مواجه هستند، ضعف کارایی اقتصادی آن، زمان حمل و نقل و مصرف سوخت به دلیل ارتباط غیرمستقیم بین نقاط مبدا و مقصد است. به طور کلی، حمل و نقل به دنبال یافتن زمان‌بندی بهینه با هدف کاهش زمان و هزینه‌های حمل و نقل هستند [۶]. بنابراین با توجه به مسایلی که امروزه حمل و نقل با گسترش شهرها و متراکم‌تر شدن شبکه‌های لجستیکی مواجه شده است، بهینه‌سازی مکان‌های هاب و مسیرهای وسایل نقلیه برای حفظ کیفیت خدمات و بهره‌وری عملیاتی بسیار اهمیت دارد [۳].

تحقیقات مختلفی در سال‌های اخیر به مساله‌ی برنامه‌ریزی هاب پرداختند. به عنوان نمونه، شانگ و همکاران [۷] در تحقیقی به الگوریتم‌های اکتشافی برای مساله مکان‌یابی چندمحوری سلسله مراتبی دو هدف در سیستم‌های تحویل بار پرداختند. ناجی و دیابات [۸] در تحقیقی به ارایه ی رویکردی مبتنی بر تجزیه ی بندرز برای حل مساله‌ی طراحی شبکه ی هاب و محور با در نظر گرفتن صرفه‌جویی به مقیاس و تراکم گره پرداختند. چن و همکاران [۹] در تحقیقی به طراحی مدلی به منظور تعیین مکان‌های پورت های هاب و انبارهای تغذیه‌کننده پرداختند. لذا مکان‌های بندرگاه فعلی و آینده را در امتداد خط ساحلی آفریقای غربی مطالعه شد.

محمدی و همکاران [۱۰] در تحقیقی به ارایه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مساله ی مکانیابی و تخصیص تکی هاب با در نظر گرفتن عدم قطعیت پرداختند. میکیچ و همکاران [۱۱] در تحقیقی به ارایه‌ی یک الگوریتم جست و جوی همسایگی متغیر برای مساله‌ی مکانیابی هاب با ظرفیت محدود پرداختند. در این مقاله، مساله‌ی مکان‌یابی هاب ظرفیت دار در شرایط تغییر وضعیت دوره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. دکان چی و همکاران [۱۲] در تحقیقی بحث مکان‌یابی هاب با در نظر گرفتن مسایل زیست محیطی را مطرح کردند. در این مقاله مساله‌ی مکان‌یابی هاب سبز معرفی شده است که بهترین مکان‌ها را برای هاب‌ها و اختصاص گره‌های تقاضا به این مراکز و سرعت کامیون‌ها/پروازها پیدا می‌کند تا تقاضا را بین هر جفت مبدا-مقصد تعیین کند. علی‌رغم مقالات و پژوهش‌های فراوانی که در سال‌های اخیر در زمینه‌ی شاخه‌های مختلف هاب انجام شده است، مسایل و محدودیت‌های بسیار فراوانی در دنیای واقعی وجود دارند که لحاظ نکردن این محدودیت‌ها و شرایط دنیای واقعی می‌تواند کیفیت جواب های خروجی را کاهش دهد [۱۳]. بنابراین باید محدودیت‌هایی که در دنیای واقعی وجود دارد را در مدل اعمال نمود تا بتوان کیفیت خروجی‌ها را افزایش داد [۱۴].

با بررسی‌های پژوهش‌های مختلف، مشخص شده است با این‌که ساختار یک شبکه‌ی حمل و نقل ساختار پویایی می‌باشد، اما طبق [۱۵] تغییرات در ساختار شبکه در طی زمان، محتمل می‌باشد. ممکن است تقاضای گره‌ها کم و زیاد شود، هزینه‌ها تغییر پیدا کند، در برهه‌ای از زمان نیازی به احداث یک هاب نباشد و بسیاری از مسایلی که در حالت دینامیک شبکه‌ی حمل و نقل اتفاق می‌افتد [۱۶، ۱]. بنابراین، برنامه‌ریزی برای شبکه‌ی هاب در یک دوره‌ی زمانی کوتاه امری نامعقول می‌باشد. از این در مطالعات قبلی به تقسیم دوره‌ی تصمیم‌گیری به چند بازه‌ی زمانی مبتنی بر تقاضا و سایر پارامترها کمتر توجه شده است. علاوه بر این، عدم قطعیت در مسیریابی-مکان‌یابی هاب نیز در سال‌های اخیر به طور کامل مورد بحث قرار گرفته است، زیرا مشخص شده است که تقاضای بازار به طور قابل توجهی در برابر رویدادهای جهانی مانند جنگ‌ها و بلایای طبیعی آسیب‌پذیر است [۱۷]. اما ترکیب آن با چند دوره‌ای بودن مکان یابی-مسیریابی هاب به ندرت اتفاق افتاده است و یکی از ویژگی‌های مشترک مطالعات، ماهیت ایستا بودن تصمیمات است که در جهان پیچیده واقعی روبه رشد چالش هایی را برای مدیران ایجاد کرده است و تصمیم‌گیری در بازه‌ی طولانی مدت را غیر واقع بینانه کرده است. بنابراین، طبق [۱۸] عدم قطعیت باید تا حد زیادی در مدل دیده شود تا نتایج به‌دست آمده قابلیت اطمینان بیشتری پیدا کند.

از طرفی دیگر، یکی از متغیرهای بسیار مهم در برنامه‌ریزی در زنجیره تامین بررسی شده است، بحث احتمال اختلال در تسهیلات مورد استفاده است؛ در حالی که مطالعات گذشته آن را در ساختار پویا بررسی نکرده‌اند. از این روی، ضرورت در نظر گرفتن فرسودگی، استهلاک، خرابی های بالقوه و اختلالات احتمالی در تسهیلات به منظور داشتن یک برنامه‌ریزی مناسب، قابل اطمینان و عملیاتی به خوبی احساس می‌شود [۲۰، ۱۹]. همچنین در مطالعات گذشته، مساله طراحی هاب‌ها به تعیین مکان قطب‌ها به کم و زیاد شدن گره‌های موجود می‌پردازد، در حالی که از سقف کربن تعیین‌شده برای شبکه نباید تجاوز کند [۲۱]، چرا که توجه به مسایل زیست‌محیطی به دلیل اهمیت کاهش آلودگی محیط زیست و فشارهای زیست‌محیطی و اجتماعی در سیستم های حمل و نقل رو

به افزایش است. بنابراین، بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های حمل و نقل برای کاهش هزینه تولید و مصرف سوخت که منجر به کاهش آلودگی محیط زیست می‌شود، برای صنایع تولیدی ضروری است [۶].

در نهایت مطالعه [۲۲] مشخص کرده است که پوشش پشتیبان می‌تواند از اختلال در تسهیلات توزیعی و فرآیند توزیع اقلام پیشگیری کند. در مدل با پوشش پشتیبان، احتمال اختلال در تسهیلات و همچنین فاصله ی بین مراکز توزیعی، برخی مراکز توزیعی به عنوان پشتیبان یکدیگر در نظر می‌شود. اما در مدل‌های قبلی پوشش پشتیبان، تصمیمات مبتنی بر تقاضا کمتر توجه شده است و برنامه‌ریزی برای شبکه‌ی هاب باید در یک دوره‌ی زمانی بلند مدت درنظر گرفته شود تا بتوان در کنترل هزینه‌ها موفق شد.

بسیاری از پیشرفت‌هایی که در مسیریابی-مکان‌یابی هاب به‌دست آمده است، نشان می‌دهد که راه‌حل‌های بهبودیافته با ترکیب چند دوره‌ای بودن، عدم قطعیت، پوشش پشتیبان و مسایل زیست محیطی برای تصمیمات مکان یابی- مسیریابی در ادبیات موجود در نظر گرفته نشده است. این خلا در ادبیات، به‌ویژه در حوزه‌های صنعتی و عملیاتی که تصمیم‌گیری پایدار و مقاوم ضرورت دارد، محسوس است. ما به دنبال آن هستیم که با ترکیب چهار عامل مهم و اساسی که مطرح شده است در دنیای واقعی می‌توان به جواب بهینه قابل قبول دست یافت یا خیر. هدف این است که مدلی توسعه داده شود که بتواند نیازهای عملیاتی صنعت را در دنیای واقعی برآورده ساخته و به بهینه‌سازی همزمان هزینه، پایداری و کارایی سیستم کمک کند. مدل پیشنهادی این تحقیق با هدف پر کردن شکاف‌های موجود، طراحی‌شده و دارای نوآوری‌های مهمی است که آن را از مدل‌های پیشین متمایز می‌سازد. در مقایسه با مطالعات موجود، سهم مطالعه حاضر عبارت است از:

- در نظر گرفتن ساختار چنددوره‌ای برای لحاظ تغییرات زمانی در تقاضا، هزینه و وضعیت تسهیلات؛
- مدل‌سازی عدم قطعیت پارامترها برای بهبود دقت تصمیم‌گیری در شرایط واقعی؛
- لحاظ احتمال اختلال در تسهیلات برای افزایش تاب‌آوری شبکه در شرایط بحرانی؛
- اعمال محدودیت‌های زیست‌محیطی به عنوان یکی از الزامات مهم توسعه پایدار؛
- طراحی سازوکار پوشش پشتیبان بین مراکز توزیع برای تداوم عملیات در صورت خرابی تسهیلات.

در نظر گرفتن مباحث مربوطه می‌تواند منجر به نزدیک‌تر شدن هر چه بیشتر مدل به شرایط دنیای واقعی شود و مدلی کاربردی را برای کاربران و به خصوص تولیدکنندگان و توزیع کنندگان ارایه نماید. لذا در این تحقیق ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مساله‌ی مورد نظر طراحی می‌شود. سپس رویکرد حل مناسب برای حل مسایل عددی در ابعاد مختلف طراحی می‌شود و در نهایت کارکرد رویکرد حل در مسایلی با ابعاد مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

ادامه‌ی این مقاله به این شکل برنامه‌ریزی شده است. در بخش دوم به تشریح مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مساله‌ی تحقیق پرداخته می‌شود. در بخش سوم به تشریح روش حل می‌پردازد. در بخش چهارم نتایج عددی ارایه می‌شود و در نهایت بخش پنجم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری خواهد پرداخت.

۲ مدل سازی ریاضی

۲-۱ تشریح مساله

در این بخش مساله‌ی مکان‌یابی، تخصیص و مسیریابی هاب در شرایط عدم‌قطعیت و اختلال در تسهیلات همراه با پوشش پشتیبان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بنا به اهمیت روزافزون ملاحظات زیست‌محیطی این مهم نیز مورد توجه قرار گرفته شده است. درنهایت برای مساله‌ی مورد بحث یک مدل ریاضی چندهدفه نیز ارایه می‌شود. این اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های شبکه، حداکثر زمان حمل و هزینه‌های زیست محیطی را شامل می‌شوند.

در مساله‌ی مکان‌یابی هاب به‌جای اتصال مستقیم هر مبدا به مقصد موردنظر در شبکه‌ی حمل‌ونقل، به جهت استفاده از تخفیف در حمل‌ونقل بین هاب‌ها، مواد از مبدا به هاب ارسال و سپس از هاب به مقصد موردنظر حمل می‌شود. بدین ترتیب کل شبکه‌ی حمل‌ونقل از مزیت صرفه‌جویی اقتصادی بهره‌مند می‌گردند. فی‌الواقع در چنین شبکه‌هایی هاب نقش واسطه‌ی بین مبادی و مقاصد را بازی می‌نماید.

پویایی جزئ لاینفک هر شبکه‌ی حمل‌ونقل می‌باشد؛ لذا وقوع تغییراتی در ساختار شبکه طی زمان مانند نوسان در تقاضای گره‌ها، تغییر در هزینه‌ها، نیاز به احداث هاب در برهه‌ای از زمان و ... امری محتمل است [۱]. بنابراین برنامه‌ریزی برای شبکه‌ی هاب در یک دوره‌ی زمانی کوتاه امری نامعقول می‌نمایاند از این رو در این پژوهش تصمیم‌گیری بر بستر یک افق زمانی چند دوره‌ای انجام می‌گیرد.

امروزه و در جهان به شدت در حال رشد، عدم قطعیت جزء لاینفک تصمیمات مدیران سازمان‌ها شده است لذا عدم اعمال این مهم در مدل خروجی‌های به‌دست آمده را از کیفیت ساقط و غیرمنطقی می‌نماید [۱۸]. ما در این پژوهش با استفاده از رویکرد فازی زمان‌های نادقیق حمل‌ونقل را در مدل لحاظ کرده‌ایم.

در ادبیات موضوع به‌منظور مقابله با اختلالات در شبکه‌ی هاب استراتژی‌های واکنشی متنوعی ارایه شده است همانند تاخیر، لغو و ... [۲۰]. اما این استراتژی‌ها عمدتاً از نظر اقتصادی ناکارامد و از نظر اعمال سخت خواهند بود، لذا برای دستیابی به منافع اقتصادی و شبکه‌ی مطمئن، طراحی شبکه‌ی هاب نه‌تنها باید به مکان‌یابی هاب و مشخصات متداول لینک‌ها توجه کند بلکه جهت مواجهه با اختلالات جزئی یا کلی در لینک‌های شبکه یا تسهیلات هاب، آلترناتیو هاب پشتیبان را نیز درنظر بگیرد [۱۴]. در این پژوهش علاوه بر هاب به لینک پشتیبان نیز توجه کرده‌ایم.

بنا به اهمیت روزافزون مسایل زیست محیطی بالاخص در حمل‌ونقل دریایی در این پژوهش نیز میزان انتشارات کربن‌دی‌اکسید هم در حمل‌ونقل‌ها و هم در عملیات درون هاب‌ها را درنظر گرفته‌ایم.

مفروضات در نظر گرفته شده در این مدل به شرح ذیل هستند:

۱. تعداد هاب‌ها (اولیه و پشتیبان) از قبل مشخص می‌باشد.
۲. در تخصیص گره‌های اسپوک به هاب‌ها سیاست تخصیص تکی درنظر گرفته شده است.
۳. گراف هاب‌ها کامل درنظر گرفته شده است.
۴. سطوح ظرفیتی مختلفی درنظر گرفته شده است به‌نحوی که برای هر هاب احداث‌شده یک سطح ظرفیتی مشخص تعیین می‌گردد.

۵. هزینه‌ها و زمان‌های حمل هم‌چنین تقاضاها پارامترهای نادقیق فازی می‌باشند.

۶. هر لینک هاب-هاب مدهای حمل‌ونقلی مختلفی دارد.

۷. مقدار تقاضای هر نقطه به‌صورت تابعی قطعه‌قطعه خطی از مقدار مطلوبیت مشتریان مستقر در آن نقطه می‌باشد.

۸. انتقال از یک گره اسپوک به هاب توسط تنها یک مد حمل و نقلی (t =۱) و بین دو گره هاب توسط چند مد مختلف (t ≥۲) صورت می‌گیرد.

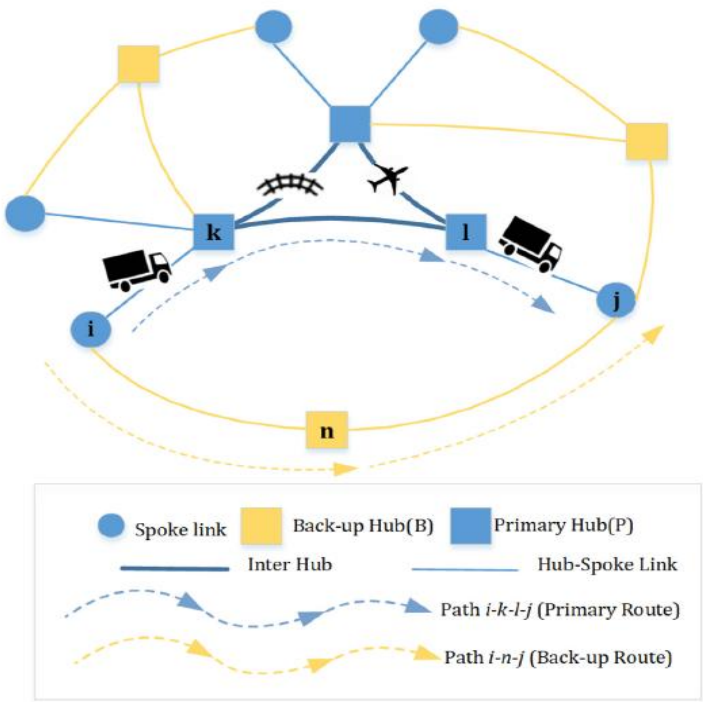
۹. زمان انتظار جریانات ورودی به هر گره هاب از توزیع نمایی پیروی می‌کنند.

۱۰. جهت احداث هاب‌ها چند شیوه‌ی تأمین مالی درنظر گرفته شده است که در هر شیوه مقدار بودجه با پارامتر نادقیق فازی معین می‌گردد.

۱۱. میزان انتشارات CO_2 در مسیرهای انتقال بین گره‌ها و در مدت سرویس‌دهی بارها در هر هاب به‌ازای یک واحد بار از قبل مشخص می‌باشد.

۱۲. جهت مقابله با اختلالات مربوط به مسیرها و هاب‌ها علاوه بر مسیر و هاب اولیه[1] به‌ترتیب مسیر و هاب پشتیبان[2] نیز درنظر گرفته شده است.

نمای گرافیکی مساله‌ی مربوطه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمای گرافیکی مساله‌ی موردبحث

[1] Primary rout and hub
[2] Backup rout and hub

۲-۲ اجزای مدل

اجزای مدل تحقیق به شرح زیر می باشند:

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

$i,j \in I$: گره‌های مبدا و مقصد

$k,l \in H$: هاب‌های شبکه

$t \in M$: مدهای حمل‌ونقلی

$s \in S$: سطوح ظرفیتی برای هاب‌های تاسیس‌شده

$f \in F$: روش‌های تامین هزینه‌های احداث هاب

$p \in P$: دوره‌های زمانی افق تصمیم‌گیری

پارامترها

W_{ij}^{p}: مقدار جریان بین دو گره i و j در دوره‌ی p

U_i: مطلوبیت درک شده توسط گره i

$\tilde{B}_f$: کل بودجه‌ی در دسترس با روش تأمین f

$\left(\frac{A}{P}, int\,e\,rest\%, years\right)$: فاکتور تبدیل ارزش کنونی به ارزش سالانه

$\tilde{C}_{ij}^{t}$: هزینه‌ی حمل‌ونقل بین دو گره i و j و با مد t

$\widetilde{CS}_{k}^{t}$: هزینه‌ی عملیاتی استفاده از مد t در هاب k

$\tilde{F}_{k}^{sf}$: مقدار تامین مالی از f برای هزینه‌های ثابت هاب k و در سطح ظرفیتی s

$\tilde{T}_{ij}^{t}$: مدت زمان حمل‌ونقل بین i و j و با مد t

$\vartheta, \sigma, \omega$: فاکتورهای تخفیف در شبکه‌های هاب

r_{ij}: میزان قابلیت اعتماد لینک بین i و j

p: تعداد هاب اولیه که بایستی احداث شود

q: تعداد هاب پشتیبان که بایستی احداث شود

$R_{ijn} := \left(RP_{iklj} + \overline{RP}_{rklj} RB_{ijn}\right)$: احتمال کل نرخ تحویل جریان بین دو گره i و j (توسط مسیر اوّلیه و پشتیبان)

$\overline{RP}_{rklj} := ۱ - \left(r_{ik} \times r_{kl}^{(۱-\zeta)} \times r_{lj}\right)$: احتمال مکمل مسیر اولیه

$RP_{iklj} = r_{ik} \times r_{kl}^{(۱-\zeta)} \times r_{lj}$: قابلیت اعتماد مسیر اولیه بین i و j و از مسیر $(i \to k \to l \to j)$

$RB_{ijn} = r_{in} \times \psi \times r_{nj}$: قابلیت اعتماد مسیر پشتیبان بین i و j و از مسیر $(i \to n \to j)$

$\zeta \in [۰,۱]$: فاکتور قابلیبت اعتماد بین هاب

$\psi \in [۰,۱]$: فاکتور قابلیت اعتماد درون هاب

χ_{ik}: احتمال عدول از ظرفیت لینک $(i \to k)$

$Disr_{ik}$: احتمال بروز اختلال در لینک $(i \to k)$

Cap_{ik}: ظرفیت لینک $(i \to k)$

$\overline{Cap}_{ik}$: ظرفیت طراحی لینک $(i \to k)$

$LCO۲_{ik}$: میزان انتشارات کربن‌دی‌اکسید در حمل بین دو گره i و k (مستقیم یا بالعکس)

$HCO۲_{k}$: میزان انتشارات کربن‌دی‌اکسید در عملیات درون هاب k

$HLCO۲_{kl}^{t}$: میزان انتشارات کربن‌دی‌اکسید در حمل‌ونقل بین دو گره هاب k و l و با مد حمل‌ونقلی t

متغیرها

X_{ijkl}^{t}: متغیر باینری که اگر بین دو گره i و j از طریق هاب‌های اولیه‌ی k و l مسیری با مد t باشد برابر ۱ $(i \to k \to l \to j)$ در غیر این‌صورت ۰

y_{ijn}^{t}: متغیر باینری که اگر بین دو گره i و j از طریق هاب پشتیبان n مسیری با مد t باشد برابر ۱ $(i \to n \to j)$ در غیر این‌صورت ۰

ZP_{k}^{s}: متغیر باینری که اگر گره k به‌عنوان هاب اولیه با

ZB_{k}^{s}: متغیر باینری که اگر گره k به‌عنوان هاب پشتیبان با

سطح ظرفیتی sباشد ۱ و در غیر این‌صورت ۰

Q_k^f: متغیر باینری که اگر هاب k با روش تأمین مالی f احداث گردد ۱ و در غیر این‌صورت ۰ می‌باشد

H_{ik}: مقدار جریان خروجی از i به k

سطح ظرفیتی sباشد ۱ و در غیر این‌صورت ۰

SL_k^t: متغیر باینری که اگر هاب k از مد t استفاده کند ۱ و در غیر این‌صورت ۰

φ: حداکثر زمان سفر بین زوج مبدا و مقصد

۲-۳ توابع هدف

در این قسمت فرم نهایی توابع هدف مدل اولیه ارایه می‌شوند. این موارد به‌ترتیب حداقل‌سازی هزینه‌ی کل، حداکثرسازی حداقل قابلیت اعتماد بین زوج گره‌های مبدا و مقصد، حداقل‌سازی حداکثر زمان انتظار از هر زوج گره و حداقل‌سازی میزان انتشارات کربن‌دی‌اکسید در کل شبکه را شامل می‌شوند.

هدف اول، کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره می‌باشد. تابع هدف حداقل‌سازی هزینه‌ی کل شبکه در رابطه‌ی (۱) نشان داده شده است. این تابع هدف از سه بخش زیر تشکیل شده است:

۱. هزینه های حمل و نقل در شبکه

۲. هزینه های استقرار تسهیلات

۳. هزینه های عملیاتی بهره گیری از هاب‌ها

$$\begin{aligned} Min \sum_p \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_t \left\{W_{ij}^p (U_i + U_j)\right\} (\sigma \tilde{C}_{ik}^{۱} + \xi \tilde{C}_{kl}^t + \omega \tilde{C}_{lj}^{۱}) X_{ijkl}^t \\ + \sum_k \sum_s \sum_f \tilde{F}_k^{sf} Q_k^f (ZP_k^s + ZB_k^s) \times \left(\frac{A}{P}, int\,e\,rest\%, years\right) + \sum_k \sum_t \widetilde{CS}_k^t SL_k^t \end{aligned} \quad (۱)$$

همان‌گونه که از صورت رابطه‌ی (۱) برمی‌آید این رابطه غیرخطی بوده که برای این منظور تغییر متغیرهای زیر صورت می‌گیرد.

$$ZPQ_k^{sf} = ZP_k^s \times Q_k^f \quad (۲)$$

$$ZP_k^s + Q_k^f - ZPQ_k^{sf} \leq ۱ \quad (۳)$$

$$ZPQ_k^{sf} \leq ZP_k^s \quad (۴)$$

$$ZPQ_k^{sf} \leq Q_k^f \quad (۵)$$

$$ZBQ_k^{sf} = ZB_k^s \times Q_k^f \quad (۶)$$

$$ZB_k^s + Q_k^f - ZBQ_k^{sf} \leq ۱ \quad (۷)$$

$$ZBQ_k^{sf} \leq ZB_k^s \quad (۸)$$

$$ZBQ_k^{sf} \leq Q_k^f \quad (۹)$$

با عنایت به روابط (۲)-(۹) معادل خطی رابطه‌ی (۱) به شرح رابطه‌ی (۱۰)خواهد بود.

$$Min \sum_p \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_t \left\{W_{ij}^p (U_i + U_j)\right\} (\sigma \tilde{C}_{ik}^{۱} + \xi \tilde{C}_{kl}^t + \omega \tilde{C}_{lj}^{۱}) X_{ijkl}^t \quad (۱۰)$$

$$+\sum_{k}\sum_{s}\sum_{f}\tilde{F}_k^{sf}\left(ZPQ_k^{sf}+ZBQ_k^{sf}\right)\times\left(\frac{A}{P},int\,e\,rest\%,years\right)+\sum_{k}\sum_{t}\widetilde{CS}_k^t SL_k^t$$

تابع هدف حداکثرسازی حداقل قابلیت اعتماد بین هر زوج مبدأ-مقصد در رابطه‌ی ۱۱ نشان داده شده است.

$$MaxMin\left[\sum_{t}\sum_{k}\sum_{l}\{W_{ij}(U_i+U_j)\}\times\left\{RP_{iklj}+(۱-RP_{iklj})X_{ijkl}^t\times\sum_{n}RB_{ijn}y_{ijn}^t\right\}\right] \quad (۱۱)$$

مجدداً همان‌گونه که از صورت رابطه‌ی (۱۱) مشخص است این رابطه نیز غیرخطی می‌باشد. معادل خطی این هدف به شرح روابط (۱۲) و (۱۳) می‌باشد.

$$MaxT \quad (۱۲)$$

$$\mathrm{i},k,l,j,nT\le W_{ij}(U_i+U_j)\left(RP_{iklj}+(۱-RP_{iklj})RB_{ijn}\right)+\left(۲-X_{ijkl}^t-y_{ijn}^t\right)\times M;\forall \quad (۱۳)$$

تابع هدف حداقل‌سازی حداکثر زمان انتظار به‌ازای هر زوج گره مبدا-مقصد به صورت روابط (۱۴)-(۱۶) می‌باشد.

$$Min\varphi \quad (۱۴)$$

$$\left(\tilde{T}_{ik}^1+W_k^s+\tilde{T}_{kl}^t+W_l^s+\tilde{T}_{lj}^1\right)X_{ijkl}^t\le\varphi;\forall i,j,k,l,t,s \quad (۱۵)$$

$$\varphi\ge ۰ \quad (۱۶)$$

و درنهایت تابع هدف حداقل‌سازی میزان انتشارات کربن‌دی‌اکسید در رابطه‌ی (۱۷) نشان داده شده است.

$$Min\sum_{p}\sum_{i}\sum_{j}\sum_{k}\sum_{l}\sum_{t}\left\{W_{ij}^p(U_i+U_j)\right\}\left(LCO۲_{ik}+HCO۲_k+HLCO۲_{kl}^t+HCO۲_l^t+LCO۲_{lj}\right)X_{ijkl}^t \quad (۱۷)$$

۲-٤ محدودیت‌ها

در این بخش محدودیت‌های مساله ارایه می‌شوند.

$$\sum_{\substack{k\\k\neq i}}X_{ik}+\sum_{s}ZP_i^s=۱;\forall i \quad (۱۸)$$

$$\sum_{k}\sum_{s}ZP_k^s=p,p\ge ۲ \quad (۱۹)$$

$$\sum_{k}\sum_{s}ZB_k^s=q,q\ge ۲ \quad (۲۰)$$

$$\sum_{n}\sum_{t}y_{ijn}^t=۱;\forall i,j \quad (۲۱)$$

$$R_{iklj}=\left[r_{ik}\times r_{kl}^{(۱-\zeta)}\times r_{lj}\right]+\left[۱-\left(r_{ik}\times r_{kl}^{(۱-\zeta)}\times r_{lj}\right)\right]\times\left(r_{in}\times\psi\times r_{nj}\right);\forall i\neq j,k \quad (۲۲)$$

$$ZB_k^s+ZP_k^s\le ۱;\forall k,s \quad (۲۳)$$

$$\sum_{t}y_{ijn}^t\le\sum_{s}ZB_n^s;\forall i,j,n \quad (۲۴)$$

$$\sum_{l}\sum_{t}X_{ijkl}^t\le\sum_{s}ZP_k^s;\forall i,j,k \quad (۲۵)$$

$$\sum_{l}\sum_{t} X_{ijkl}^{t} \leq \sum_{s} ZP_{l}^{s}\,;\forall i,j,l \tag{۲۶}$$

$$\sum_{t} X_{ijkl}^{t} \geq X_{ik} + X_{jl} - ۱;\forall i,j,k,l,i \neq k, j \neq l \tag{۲۷}$$

$$X_{ik} \leq \sum_{s} ZP_{k}^{s}\,;\forall i,k \tag{۲۸}$$

$$\sum_{s} ZP_{k}^{s} \leq ۱;\forall k \tag{۲۹}$$

$$X_{ijkl}^{t} \leq SL_{k}^{t};\forall i,j,k,l,t \tag{۳۰}$$

$$X_{ijkl}^{t} \leq SL_{l}^{t};\forall i,j,k,l,t \tag{۳۱}$$

$$SL_{k}^{t} \leq \sum_{s} ZP_{k}^{s}\,;\forall k,t \tag{۳۲}$$

$$\sum_{f} Q_{k}^{f} \leq ZP_{k}^{s};\forall k,s \tag{۳۳}$$

$$\sum_{f} Q_{k}^{f} \leq ZB_{k}^{s};\forall k,s \tag{۳۴}$$

$$\sum_{k}\left[\tilde{F}_{k}^{sf} \times \left(ZPQ_{k}^{sf} + ZBQ_{k}^{sf}\right)\right] \leq \tilde{B}_{f};\forall f,s \tag{۳۵}$$

$$H_{ik} \leq \overline{cap}_{ik}[disr_{ik}(۱ - \chi_{ik}) + \chi_{ik}];\forall i,k \tag{۳۶}$$

$$H_{kl} \leq \overline{cap}_{kl}[disr_{kl}(۱ - \chi_{kl}) + \chi_{kl}];\forall k,l \tag{۳۷}$$

$$\begin{gathered} Q_{k}^{f}, X_{ijkl}^{t}, y_{ijn}^{t}, SL_{k}^{t} \in \{0 or ۱\};\forall i,j,k,l,n,t \\ H_{ik}, \varphi \geq ۰;\forall i,k \end{gathered} \tag{۳۸}$$

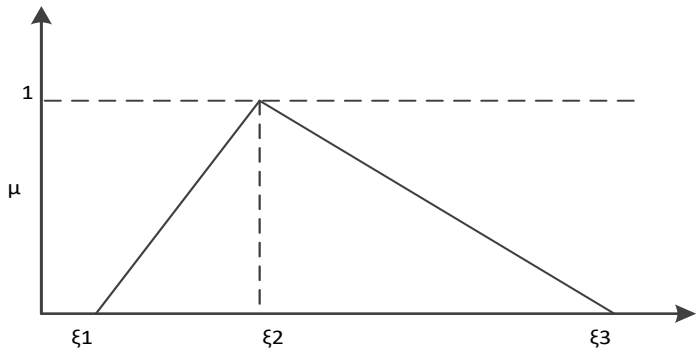
رابطه‌ی (۱۸) تخصیص یگانه را نشان می‌دهد. روابط (۱۹) و (۲۰) به‌ترتیب تعداد هاب‌های اولیه و پشتیبان احداث شده را نشان می‌دهند. رابطه‌ی (۲۱) تخصیص یک هاب پشتیبان به هر مبدأ-مقصد را تضمین می‌کند. رابطه‌ی (۲۲) احتمال کل نرخ تحویل جریان بین هر زوج گره مبدأ-مقصد را نشان می‌دهد. رابطه‌ی (۲۳) تضمین می‌کند که هاب اولیه و پشتیبان در یک گره مستقر نشود. رابطه‌ی (۲۴) تضمین می‌کند که هیچ دو گره غیرهابی مستقیم به یکدیگر متصل نشوند. روابط (۲۵) و (۲۶) تضمین می‌کنند که مسیرهای صحیح از هاب‌های اولیه‌ی احداث شده عبور کنند. رابطه‌ی (۲۷) نشان می‌دهد که مسیری بین دو هاب k,l می‌تواند وجود داشته باشد اگر لینک‌های $n \to k$ و $l \to j$ وجود داشته باشند. رابطه‌ی (۲۸) احداث لینک $i \to k$ را منوط به احداث هاب k می‌کند. رابطه‌ی (۲۹) نشان می‌دهد که هر هاب بایستی در یکی از سطوح ظرفیتی خود احداث گردد. روابط (۳۰) و (۳۱) تضمین می‌کنند درصورتی که $X_{ijkl}^{t} = ۱$ گردد حتماً متغیرهای SL_{k}^{t} و SL_{l}^{t} مربوطه نیز ۱ شوند. رابطه‌ی (۳۲) هرگونه ارتباط هاب-هاب را منوط به احداث هاب می‌کند. روابط (۳۳) و (۳۴) تاسیس هاب را منوط به استفاده از تنها یک شیوه‌ی تامین مالی می‌کنند. رابطه‌ی (۳۵) تضمین می‌کند که هزینه‌ی احداث هاب بیش از بودجه‌ی مورنظر نباشد. روابط (۳۶) و (۳۷) به‌ترتیب محدودیت‌های قابلیت اعتماد ظرفیت مسیرهای بین اسپوک‌ها و هاب‌ها و مسیرهای مابین هاب‌ها را نشان می‌دهند. رابطه‌ی (۳۸) دامنه‌ی متغیرها را نشان می‌دهد.

۲-۵ استوارسازی مدل

در این بخش در جهت استوارسازی مساله‌ی طراحی شده با رویکرد مناسب اقدام می‌شود، به‌گونه‌ای که در انتها معادل استوار مدل ارایه می‌گردد.

همان‌گونه که در فصل قبل عنوان شد؛ مقدار بودجه‌ی هر شیوه‌ی تأمین مالی، هزینه‌ها، زمان‌های حمل و مقادیر تقاضا نادقیق بوده و با اعداد فازی مثلثی نشان داده می‌شوند. همان‌گونه که در مقدمه نیز عنوان شد، پارامترهای هزینه‌ی متغیر و تقاضا با اعداد نادقیق فازی مثلثی نشان داده می‌شوند. در چنین مواردی که عدم‌قطعیت بالا بوده و درنتیجه اثربخشی تصمیمات راهبردی به خطر می‌افتد؛ برنامه‌ریزی استوار امکانی راهگشا خواهد بود [۱۹].

فرض کنید پارامتر $\tilde{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ به‌صورت یک عدد نادقیق فازی مثلثی با تابع عضویت امکانی (μ) به‌صورت شکل ۲ باشد.



شکل ۲. تابع عضویت امکانی یک پارامتر نادقیق فازی مثلثی

هم‌چنین یک مدل ریاضی با پارامترهای فازی مثلثی $\tilde{C} = (C_1, C_2, C_3)$، $\tilde{d} = (d_1, d_2, d_3)$ و $\tilde{B} = (B_1, B_2, B_3)$ به‌صورت روابط (۳۹) را درنظر بگیرید.

$$\begin{aligned} & MinZ = \tilde{C}x + \tilde{F}y \\ & Ax \le \tilde{d} \\ & \tilde{B}y \le e \\ & x \ge 0 \\ & y \in \{0 \ or \ 1\} \end{aligned} \tag{۳۹}$$

براساس [۱۹]، معادل استوار امکانی این مدل به شرح رابطه‌ی (۴۰) می‌باشد.

$$
\begin{aligned}
&Min\,Z = E(Z) + \gamma\left(Z^{\max} - Z^{\min}\right) + \pi(۱-\alpha)\left[d۲ - d۱\right] + \delta(۱-\beta)\left[B_۳ - B_۲\right] \\
&E(Z) = \left(\frac{C۱ + ۲C۲ + C۳}{۴}\right)x + \left(\frac{F۱ + ۲F۲ + F۳}{۴}\right)y \\
&Z^{\max} = (C۳)x + (F۳)y \\
&Z^{\min} = (C۱)x + (F۱)y \\
&Ax \le \alpha d۱ + (۱-\alpha)d۲ \\
&B_۲ y + (B_۳ - B_۲)(\beta)y \le e \\
&x \ge ۰, y \in \{۰,۱\}, ۰/۵ \le \alpha, \beta \le ۱
\end{aligned}
\tag{۴۰}
$$

در این رابطه $E(Z)$ مقدار هزینه‌ی موردانتظار را نشان می‌دهد. هم‌چنین Z^{max} و Z^{min} به‌ترتیب معرف حداکثر و حداقل هزینه بوده و پارامتر γ وزن می‌باشد که اهمیت اختلاف بین این دو هزینه را در مقایسه با دو عبارت دیگر تابع هدف نشان می‌دهد. علاوه بر این $\pi(۱-\alpha)[d۲ - d۱]$ و $\delta(۱-\beta)[B_۲ - B_۱]$ سطح اعتماد محدودیت‌های تصادفی[1] را نمایش می‌دهند که در آن π و δ جریمه‌ی واحد نقض محدودیت‌های دارای پارامترهای نادقیق می‌باشد. همان‌گونه که از صورت رابطه‌ی (۴۰) برمی‌آید، این محدودیت بخاطر وجود $y(\beta)$ غیرخطی است. لذا با تعریف متغیر y' معادل خطی به‌صورت رابطه‌ی (۴۱) خواهد شد.

$$
\begin{aligned}
&Min\,Z = E(Z) + \gamma\left(Z^{\max} - Z^{\min}\right) + \pi(۱-\alpha)\left[d۲ - d۱\right] + \delta(۱-\beta)\left[B_۳ - B_۲\right] \\
&E(Z) = \left(\frac{C۱ + ۲C۲ + C۳}{۴}\right)x + \left(\frac{F۱ + ۲F۲ + F۳}{۴}\right)y \\
&Z^{\max} = (C۳)x + (F۳)y \\
&Z^{\min} = (C۱)x + (F۱)y \\
&Ax \le \alpha d۱ + (۱-\alpha)d۲ \\
&B_۲ y + (B_۳ - B_۲)y' \le e \\
&y' \le \beta + M(۱-y) \\
&y' \ge \beta - M(۱-y) \\
&x, y' \ge ۰, y \in \{۰,۱\}, ۰/۵ \le \alpha, \beta \le ۱
\end{aligned}
\tag{۴۱}
$$

در این رابطه M یک عدد مثبت به‌اندازه‌ی کافی بزرگ می‌باشد.

همان‌گونه که انتظار می‌رود به‌منظور استوارسازی مدل تمامی اهداف و هم‌چنین روابط (۱۵) و (۳۵) نیاز به اصلاح دارند. معادل استوار امکانی رابطه‌ی (۱۵) به شرح روابط (۴۲) تا (۴۵) می‌باشد.

$$
\left(T۲^{۱}_{ik} + W^{s}_{k} + T۲^{t}_{kl} + W^{s}_{l} + T۲^{۱}_{lj}\right)X^{t}_{ijkl} + \left(T۳^{۱}_{ik} - T۲^{۱}_{ik} + T۳^{t}_{kl} - T۲^{t}_{kl} + T۳^{۱}_{lj} - T۲^{۱}_{lj}\right)X'^{t}_{ijkl} \le \varphi; \forall i,j,k,l,t,s \tag{۴۲}
$$

$$
X'^{t}_{ijkl} \le \beta + M\left(۱ - X^{t}_{ijkl}\right); \forall i,j,k,l,t,s \tag{۴۳}
$$

$$
X'^{t}_{ijkl} \ge \beta - M\left(۱ - X^{t}_{ijkl}\right); \forall i,j,k,l,t,s \tag{۴۴}
$$

[1] Chance constraints

$$X'^{t}_{ijkl} \geq 0; \forall i,j,k,l,t,s \tag{۴۵}$$

هم‌چنین معادل استوار امکانی رابطه‌ی ۳۵ در رابطه‌ی ۴۶ قابل مشاهده است.

$$\sum_{k}\left[F_k^{sf} \times \left(ZPQ_k^{sf} + ZBQ_k^{sf}\right)\right] \leq \alpha B۱_f + (۱-\alpha)B۲_f; \forall f,s \tag{۴۶}$$

معادل استوار امکانی تابع هدف اول، حداقل‌سازی هزینه‌های کل شبکه، در رابطه‌ی (۴۷) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned}
&Min \quad E(Cost) + \gamma_۱\left(Cost^{\max} - Cost^{\min}\right) + \pi\left(۱-\alpha\right)\sum_f\left[B۲_f - B۱_f\right] \\
&+\delta\left(۱-\beta\right)\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l\sum_t\left[T۳^۱_{ik} - T۲^۱_{ik} + T۳^t_{kl} - T۲^t_{kl} + T۳^۱_{lj} - T۲^۱_{lj}\right] \\
&E(Cost) = \sum_p\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l\sum_t\left\{W^p_{ij}\left(U_i + U_j\right)\right\}\begin{pmatrix}\sigma\left(\dfrac{C۱^۱_{ik} + ۲C۲^۱_{ik} + C۳^۱_{ik}}{۴}\right) \\ +\xi\left(\dfrac{C۱^t_{kl} + ۲C۲^t_{kl} + C۳^t_{kl}}{۴}\right) \\ +\omega\left(\dfrac{C۱^۱_{lj} + C۲^۱_{lj} + C۳^۱_{lj}}{۴}\right)\end{pmatrix}X^t_{ijkl} \\
&+\sum_k\sum_s\sum_f F_k^{sf}\left(ZPQ_k^{sf} + ZBQ_k^{sf}\right)\times\left(\frac{A}{P}, \text{interest\%}, years\right) + \sum_k\sum_t\left(\frac{CS۱^t_k + ۲CS۲^t_k + CS۳^t_k}{۴}\right)SL^t_k \\
&Cost^{\max} = \sum_p\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l\sum_t\left\{W^p_{ij}\left(U_i + U_j\right)\right\}\left(\sigma\left(C۳^۱_{ik}\right) + \xi\left(C۳^t_{kl}\right) + \omega\left(C۳^۱_{lj}\right)\right)X^t_{ijkl} \\
&+\sum_k\sum_s\sum_f F_k^{sf}\left(ZPQ_k^{sf} + ZBQ_k^{sf}\right)\times\left(\frac{A}{P}, \text{interest\%}, years\right) + \sum_k\sum_t\left(CS۳^t_k\right)SL^t_k \\
&Cost^{\min} = \sum_p\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l\sum_t\left\{W^p_{ij}\left(U_i + U_j\right)\right\}\left(\sigma\left(C۱^۱_{ik}\right) + \xi\left(C۱^t_{kl}\right) + \omega\left(C۱^۱_{lj}\right)\right)X^t_{ijkl} \\
&+\sum_k\sum_s\sum_f F_k^{sf}\left(ZPQ_k^{sf} + ZBQ_k^{sf}\right)\times\left(\frac{A}{P}, \text{interest\%}, years\right) + \sum_k\sum_t\left(CS۱^t_k\right)SL^t_k
\end{aligned} \tag{۴۷}$$

معادل استوار امکانی تابع هدف دوم ، حداکثرسازی حداقل قابلیت اعتماد بین هر زوج مبدأ-مقصد، در رابطه‌ی (۴۸) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned}
&MaxT - \pi(۱-\alpha)\sum_f\left[B۲_f - B۱_f\right] \\
&\quad - \delta(۱-\beta)\sum_i\sum_j\sum_k\sum_l\sum_t\left[T۳^۱_{ik} - T۲^۱_{ik} + T۳^t_{kl} - T۲^t_{kl} + T۳^۱_{lj} - T۲^۱_{lj}\right]
\end{aligned} \tag{۴۸}$$

معادل استوار امکانی تابع هدف سوم، حداقل‌سازی حداکثر زمان انتظار به‌ازای هر جفت گره مبدأ-مقصد، در رابطه‌ی (۴۹) نشان داده شده است.

$$Min\varphi + \pi(1-\alpha)\sum_{f}[B2_f - B1_f] + \delta(1-\beta)\sum_{i}\sum_{j}\sum_{k}\sum_{l}\sum_{t}[T3^{1}_{ik} - T2^{1}_{ik} + T3^{t}_{kl} - T2^{t}_{kl} + T3^{1}_{lj} - T2^{1}_{lj}] \quad (۴۹)$$

معادل استوار امکانی تابع هدف چهارم، حداقل‌سازی میزان انتشارات کربن‌دی‌اکسید، در رابطه‌ی (۵۰) نشان داده شده است.

$$Min \sum_{p}\sum_{i}\sum_{j}\sum_{k}\sum_{l}\sum_{t}\left\{W^{p}_{ij}\left(U_i + U_j\right)\right\}\left(LCO2_{ik} + HCO2_{k} + HLCO2^{t}_{kl} + HCO2_{l} + LCO2_{lj}\right)X^{t}_{ijkl} + \pi(1-\alpha)\sum_{f}\left[B2_f - B1_f\right] + \delta(1-\beta)\sum_{i}\sum_{j}\sum_{k}\sum_{l}\sum_{t}\left[T3^{1}_{ik} - T2^{1}_{ik} + T3^{t}_{kl} - T2^{t}_{kl} + T3^{1}_{lj} - T2^{1}_{lj}\right] \quad (۵۰)$$

۳ رویکرد حل مساله

مسایل مسیریابی وسایل حمل و نقل در زمره مسایل NP-Hard قرار دارند [۲۴، ۲۳]. لذا تحقیق حاضر که از نوع مسایل مکانیابی، مسیریابی و تخصیص می‌باشد نیز به طریق اولی در زمره‌ی مسایل NP-Hard قرار می‌گیرد [۲۵]. با توجه به ساختار NP-Hard مدل ارایه‌شده در پژوهش حاضر، برای حل مسایل عددی در اندازه‌های مختلف نیاز است تا از شیوه‌های فرا ابتکاری یا متاهیوریستیک استفاده گردد. دلیل این مساله آن است که حل مدل پژوهش حاضر توسط نرم افزارهای محاسباتی تجاری نظیر GAMS و Lingo در ابعاد بزرگ خیلی زمان‌بر بوده و در برخی مسایل به بعد غیرممکن است. لذا فقط مسایلی در اندازه‌های کوچک را می شود در مدت اجرایی مناسب توسط این نرم افزارهای تجاری حل نمود. بنابراین، در این فصل ابتدا توضیحاتی کلی در مورد این الگوریتم‌ها داده خواهد شد. بعد از شناخت اولیه، شیوه ی آماده کردن این الگوریتم ها شرح داده می شود و بعد از آن، مسایل و نمونه‌های عددی در ابعاد متنوع توسط این نرم افزارها حل می‌گردند. از آنجایی که متغیرهای مدل تحقیق حاضر از نوع باینری می‌باشند و الگوریتم ژنتیک در حل این دسته مسایل عملکرد مناسبی را از خود به نمایش گذارده است، در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده می‌شود. لذا رویکرد حل شامل بهره‌گیری از الگوریتم فراابتکاری NSGA II است. در ادامه نحوه ی آماده سازی الگوریتم برای حل مسایل عددی تشریح می شود.

۳-۱ مکانیزم انتخاب چرخه رولت

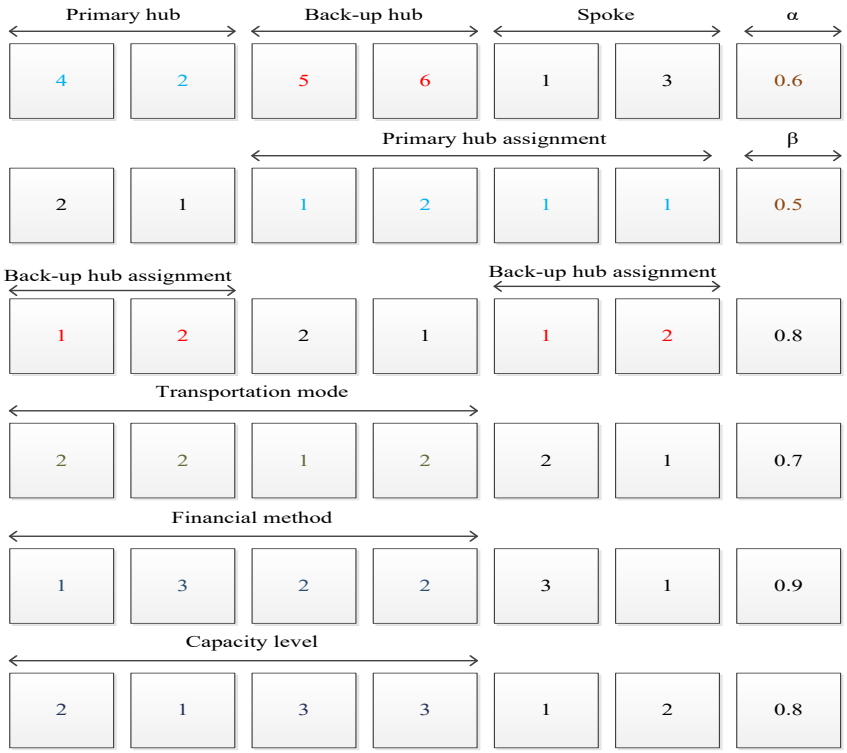
یکی از روش های متداول در انتخاب یک جواب از داخل مرز بهینه‌ی پارتو استفاده از عملگری است که مبتنی بر یک احتمالی از تابع هزینه باشد. بنابراین جواب iام در جمعیت با احتمال مشخص که تابعی از f_i (مقدار فیتنس مربوط به این جواب) انتخاب می‌شود که باید حاصل جمع این احتمال ها نیز برابر یک شود. احتمال جواب انتخابی i ام طبق رابطه‌ی (۵۱) محاسبه می‌شود.

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{n} f_j} \quad (۵۱)$$

در این رابطه f_i برابر مقدار فیتنس جواب iام بوده و تعداد جواب‌های موجود در مرز بهینه‌ی پارتو برابر n می‌باشد.

۳-۲ نحوه نمایش جواب ها

کدینگ مساله در GA، اصطلاحاً کروموزوم[1] نامیده می‌شود. به‌طور سنتی کروموزوم در یک مساله‌ی مکان‌یابی هاب با تعیین مکان هاب‌های غیرمرکزی و تخصیص سایر گره‌ها به هاب‌ها پیکربندی شبکه را تعیین می‌نماید[۲۵]. علاوه بر این، ما تعیین مد حمل‌ونقلی، شیوه‌ی تامین مالی و سطح ظرفیتی هر هاب را نیز در ساختار کروموزوم لحاظ نموده‌ایم. برای درک بهتر کدینگ، مساله‌ای با I=۶، p=۲، q=۲، F=۳، M=۲ و S=۳ را درنظر بگیرید. کدینگ مساله به‌صورت یک ماتریس(I+۱)×۶ می‌باشد. همان‌گونه که از روی شکل ۳ مشخص است، p درایه‌ی سمت چپ از سطر اول، مکان احداث هاب‌های اولیه، q درایه‌ی بعد، مکان احداث هاب‌های پشتیبان، نقاط بعد گره‌هایی که دائماً اسپوک خواهند بود و آخرین درایه‌ی این سطر یک عدد تصادفی در بازه ی [۰/۵,۱] معرف α می‌باشند. سطر دوم تخصیص به هاب‌های اولیه را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال نقاط ۶ و ۱ به‌ترتیب به هاب‌های اولیه‌ی ۲ و ۴ تخصیص می‌یابند و آخرین درایه‌ی آن β را نشان می‌دهد. سطر سوم تخصیص به هاب‌های پشتیبان را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال گره‌های ۲ و ۱ به‌ترتیب به هاب‌های پشتیبان ۶ و ۵ اختصاص یافته‌اند. سطرهای ۴ الی ۶ به‌ترتیب مد حمل‌ونقلی، شیوه‌ی تأمین مالی و سطح ظرفیت هر هاب (اولیه یا پشتیبان) تاسیس شده را نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال هاب پشتیبان مستقر در گره ۵ با روش تامین مالی ۲، در سطح ظرفیت ۳ احداث‌شده و از مد حمل‌ونقلی ۱ استفاده می‌کند.



شکل ۳. ساختار کدینگ مساله

[1] Chromosome

۳-۳ محاسبه مقادیر هدف

همان‌گونه که در مقدمه عنوان شد در این مساله چهار هدف حداقل‌سازی مجموع هزینه‌ها، حداکثرسازی حداقل قابلیت اعتماد بین هر زوج مبدا-مقصد، حداقل‌سازی حداکثر زمان انتظار به‌ازای هر زوج مبدا-مقصد و حداقل‌سازی میزان انتشارات کربن دی‌اکسید درنظر گرفته می‌شود. پس از ایجاد بردار تصادفی جواب این موارد معین می‌گردد تنها نکته‌ی ناگفته امکان عدول از ظرفیت لینک‌ها و بودجه‌ی هر شیوه‌ی تامین مالی می‌باشد که برای این منظور جریمه‌ی مناسب درنظر گرفته می‌شود.

۳-٤ محاسبه مقدار فیتنس

با داشتن جمعیت جواب و مقدار اهداف و جریمه‌ی عدول از ظرفیت لینک و بودجه برای هر جواب، به‌منظور انتخاب جواب‌ها برای عمل‌گرهای تقاطع و جهش با کمک چرخه‌ی رولت نیاز به تعیین فیتنس برای هر کدام می‌باشیم. نکته قابل توجه، نوع تابع هدف دوم می‌باشد. این هدف علی‌رغم سه هدف دیگر از نوع ماکزیمم‌سازی است؛ لذا با قرینه‌سازی مقدار این هدف، آن هم به مینیم‌سازی تبدیل می‌شود. ممکن است مقدار این موارد با هم تفاوت زیادی داشته باشند به‌عبارت ساده‌تر به‌دلیل متفاوت بودن مقیاس‌ها در ابتدای امر نرمال‌سازی مقدار این موارد برای هر جواب لازم می‌نمایاند. به‌عنوان نمونه فرض کنید OF_j^i مقدار هدف jام جواب iام جمعیت باشد مقدار نرمال معادل طبق رابطه‌ی (۵۲) محاسبه می‌شود.

$$NOF_j^i = \frac{OF_j^i}{\underset{i}{Max}\left(OF_j^i\right)} \tag{۵۲}$$

حال مجموع این چهار سنجه‌ی نرمال را برای هر جواب تعیین می‌کنیم. در ادامه معکوس پارامتر حاصل را به‌عنوان سنجه‌ی نهایی برای هر جواب طبق رابطه‌ی (۵۳) محاسبه می‌کنیم.

$$FM^i = \frac{۱}{\sum_j NOF_j^i} \tag{۵۳}$$

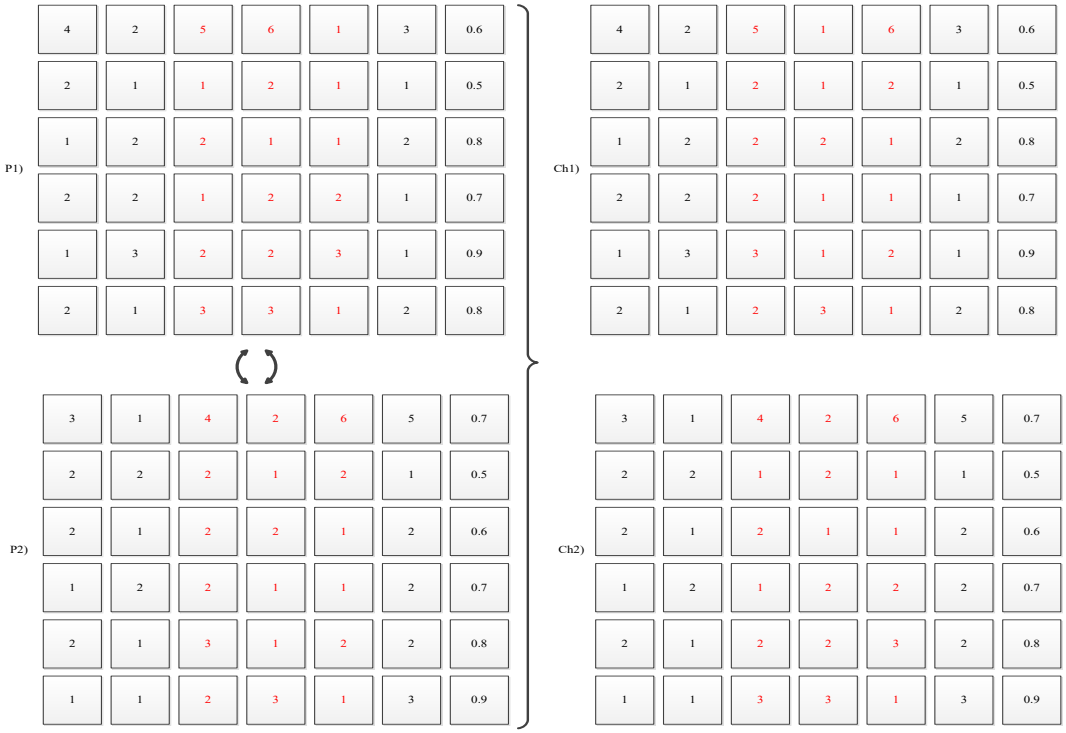
حال به راحتی می‌توان از تقسیم سنجه‌ی نهایی هر جواب بر مجموع سنجه‌ی نهایی تمامی جواب‌ها، فیتنس هر جواب را تعیین نمود.

$$f^i = \frac{FM^i}{\sum_i FM^i} \tag{۵۴}$$

لازم به ذکر است که ممکن است جریمه‌ی عدول از ظرفیت و بودجه هم‌چنین مقدار تابع هدف دوم (حداکثر زمان انتظار) صفر باشد لذا برای جلوگیری از عدم معناداری چنین جواب‌هایی (طی فرآیند نرمال‌سازی) به این پارامترها در تمامی جواب‌ها مقدار ثابتی مانند ۱ را اضافه می‌نماییم.

۳-۵ عملگر تقاطع

پس از ایجاد جواب‌ها، تعیین فیتنس و رتبه‌بندی جواب‌ها بر حسب فیتنس، تعیین ازدحام و انتخاب والدین (با استفاده از چرخه‌ی رولت) عمل تقاطع صورت می‌گیرد که حاصل آن ایجاد دو فرزند از دو والد می‌باشد. ما در این پژوهش عملگر دو نقطه‌ای[1] را به‌کار برده‌ایم. برای درک بهتر به شکل ۴ توجه نمایید. همان‌گونه که از شکل بر می‌آید به تصادف دو ستون از دو والد P۱ و P۲ انتخاب نموده و تمامی عناصر مابین آن‌ها را بین دو ساختار جابجا می‌نماییم. بدین ترتیب دو فرزند Ch۱ و Ch۲ به‌دست می‌آیند.



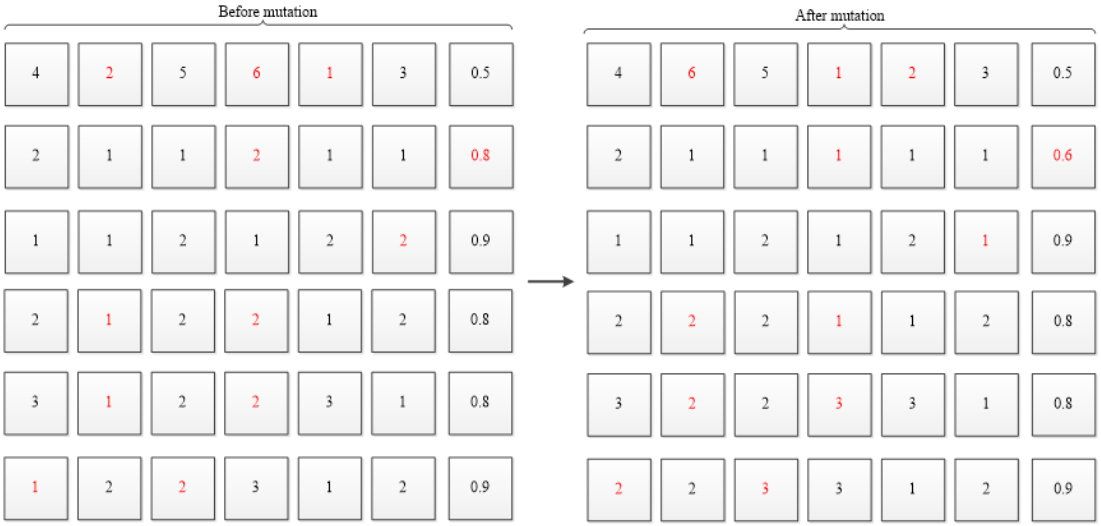
شکل ٤. عملگر تقاطع

۳-٦ عملگر جهش

در ابتدا هشت پارامتر PM۱، PM۲، PM۳، PM۴، PM۵، PM۶، PM۷ و PM۸ را به‌ترتیب به‌عنوان احتمال جهش در سطر مکان‌یابی هاب اولیه، هاب پیشتیبان، تخصیص هاب‌های اولیه و پشتیبان، انتخاب مد حمل‌ونقل، روش تأمین مالی، سطح ظرفیت و سطوح اطمینان ارضای محدودیت‌های دارای پارامتر نادقیق تعریف می‌نماییم. H را به‌عنوان مجموعه‌ی هاب‌های اولیه درنظر بگیرید. جهش در سطر مکان‌یابی هاب بدین صورت انجام می‌شود. ابتدا، به تصادف یک مکان $n_1 \in H$ را به‌عنوان هاب جهش انتخاب می‌کنیم. به‌تصادف یک مکان دیگر $n_2 \in N - H$ را به‌عنوان یک گره غیرهاب جهش انتخاب می‌نماییم. حال دو گره را با هم جابجا می‌کنیم. همین رویه برای هاب‌های پشتیبان نیز انجام می‌شود.

[1] Two-point crossover

جهش سطر تخصیص هاب اولیه و پشتیبان برای تخصیص گره‌ها به‌کار می‌رود. این اپراتور یک گره غیرهاب را انتخاب نموده و به تصادف به هاب دیگر تخصیص می‌دهد. از طرف دیگر جهش در سطور انتخاب مد حمل‌ونقل، روش تامین مالی، سطح ظرفیت با انتخاب تصادفی تعدادی عناصر و جایگزینی آن‌ها با مقادیر تصادفی معتبر صورت می‌پذیرد. درنهایت جهش در سطوح اطمینان برای سطوح اطمینان ارضای محدودیت‌های دارای مقادیر نادقیق کاربرد دارد. این اپراتور یک یا هر دو مورد α و β را انتخاب و آن‌را با یک عدد تصادفی معتبر دیگر جایگزین می‌کند. برای درک بهتر به شکل ۵ توجه فرمایید.



شکل ۵. نحوه‌ی عملکرد جهش

۳-۷ تنظیم پارامترهای الگوریتم

نحوه ی عملکرد الگوریتم های فراابتکاری به شدت وابسته به مقدار پارامترها (فاکتورهای) ذاتی الگوریتم می‌باشد. به همین دلیل، رویکردهای فراوانی برای تنظیم پارامترها در الگوریتم های فراابتکاری در راستای داشتن یک روش حل قدرتمند ارایه شده است.

در این بخش از روش تاگوچی به علت خصوصیات منحصر به فردی که دارد نظیر کاهش قابل ملاحظه ی تعداد آزمایش‌ها و همچنین نگهداری اطلاعات مورد نیاز استفاده شد. به منظور داشتن الگوریتمی قدرتمندتر و تخصصی‌تر، تنظیم پارامترها بر مبنای اندازه ی مساله انجام پذیرفت. در این راستا، مسایل در سه گروه شامل مسایل کوچک، متوسط و بزرگ طبقه بندی شدند. مسایلی با ده گره به عنوان مسایل در ابعاد کوچک، مسایلی با حداکثر بیست گره به عنوان مسایل ابعاد متوسط و مسایل با بیشتر از بیست گره به عنوان مسایل در ابعاد بزرگ دسته بندی می شود. آرایی پنج بار برای محاسبه ی نرخ S/N تکرار گشته است.

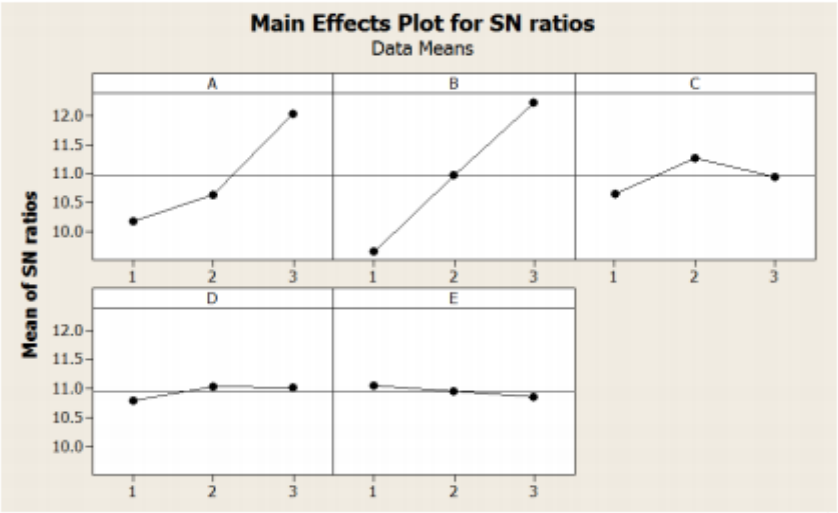
پنج فاکتور جمعیت اولیه، تعداد تکرار، نرخ تقاطع، نرخ جهش و نرخ تولید مجدد به عنوان فاکتورهای اصلی در الگوریتم مدنظر قرار گرفته اند. پارامترهای الگوریتم و سطوح بهینه در جدول ۱ نمایش داده شده است. همچنین، نرخ S/N و سطوح بهینه ی پارامترها در شکل ۶ نشان داده شده است.

همان گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، اندازه‌ی جمعیت بهینه برای مسایل کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب ۱۱۰، ۱۳۰ و ۱۴۵ می‌باشد. همچنین، تعداد تکرار بهینه برای مسایل کوچک، متوسط و بزرگ نیز به ترتیب ۱۴۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ می‌باشد.

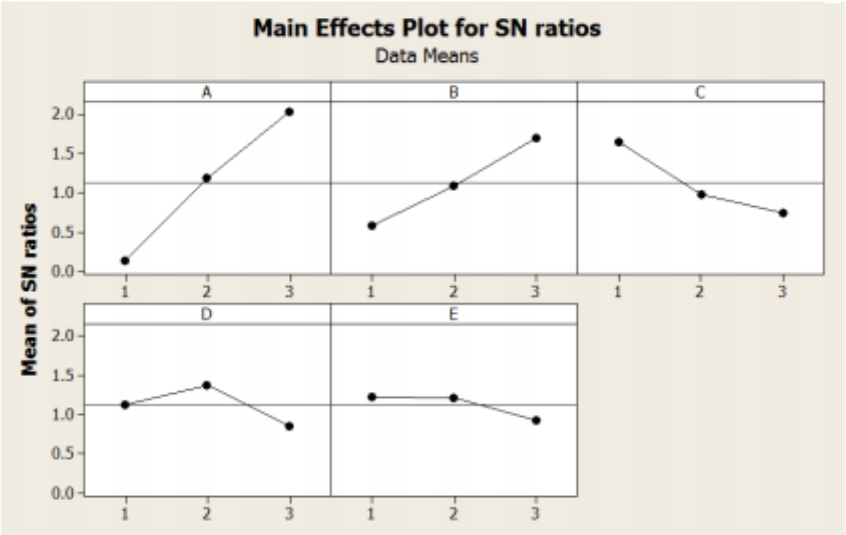
جدول ۱. پارامترها و مقادیر بهینه‌ی آن ها در NSGA II

فاکتور	نماد	مسایل کوچک	مسایل متوسط	مسایل بزرگ
اندازه ی جمعیت	A	۱۱۰	۱۳۰	۱۴۵
تعداد تکرار	B	۱۴۰	۱۴۰	۱۷۰
نرخ تقاطع	C	٪۷۵	٪۶۵	٪۶۵
نرخ بازتولید	D	٪۳	٪۵	٪۷
نرخ جهش	E	٪۴۸	٪۴۸	٪۵۳

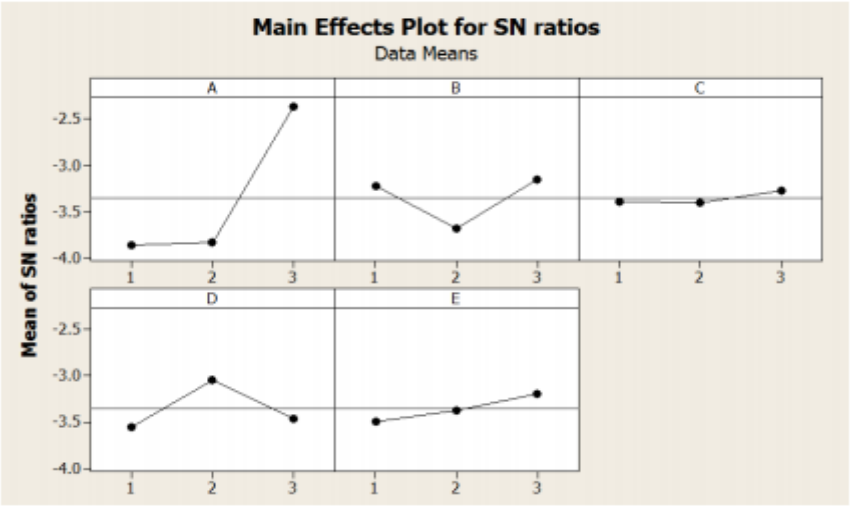
همچنین شکل ۶ نشان‌دهنده‌ی سطوح بهینه ی پارامترهای الگوریتم برای مسایل عددی در ابعاد مختلف می‌باشد. به عنوان نمونه، شکل ۶ نشان می‌دهد که برای مسایل در ابعاد کوچک، فاکتور اندازه ی جمعیت (A) در سطح شماره ی ۳ مقدار بهینه است چرا که دارای شاخص S/N بیشتری نسبت به سطوح ۱ و ۲ می‌باشد. همچنین، برای پارامتر تعداد تکرار (B) نیز سطح ۳ مقدار بهینه را از منظر شاخص S/N ایجاد می‌نماید.



شکل ٦. نمودار نرخ S/N برای الگوریتم NSGA II برای مسایل کوچک



شکل ۷. نمودار نرخ S/N برای الگوریتم NSGA II برای مسایل متوسط



شکل ۸. نمودار نرخ S/N برای الگوریتم NSGA II برای مسایل بزرگ

٤ نتایج عددی

بعد از آماده کردن الگوریتم ها و تنظیم پارامترهای الگوریتم، حال شرایط لازم جهت محاسبات عددی آماده است. در این بخش به تشریح نتایج حاصل از مسایل عددی در ابعاد متنوع پرداخته می‌شود. لذا، این مسایل در نرم‌افزار MATLAB R2015b کدنویسی شدند. کلیه ی محاسبات به وسیله‌ی یک رایانه‌ی شخصی با مشخصات CPU corei7، RAM 4G انجام شد.

٤-۱ طراحی مسایل عددی

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل طراحی شده، مسایلی برمبنای یک مورد واقعی از حمل‌ونقل مسافر در ایران تولید شده‌اند. مورد واقعی توسط کریمی و بشیری [۲۶] معرفی‌شده و شامل ۳۷ شهر در ایران می‌باشد. این داده ترابری

هوایی ایران قابل‌دسترسی است. به‌عبارت دیگر زیرمجموعه‌هایی از این داده با انتخاب گره‌ها از ابتدای لیست، مسایل نمونه‌ای طراحی شدند. به‌دلیل چندهدفه بودن مدل ارایه شده به منظور دستیابی به مرز بهینه‌ی پارتو از الگوریتم کارآمد طراحی شده استفاده شد.

در تمامی مسایل طراحی‌شده، $F=۳$، $T=۳$ و $S=۳$ درنظر گرفته شده است. مابقی اطلاعات عمومی مسایل در جدول ۲ نشان داده شده است. در این جدول نمادهای dis_{ij}، $Tr(\quad)$ و $Rn(\quad)$ به‌ترتیب معرف فاصله‌ی بین دو نقطه (برحسب کیلومتر)، عدد فازی مثلثی و عدد تصادفی با توزیع یکنواخت می‌باشد.

جدول ۲. اطلاعات عام مسایل

پارامتر	مقدار	
$\tilde{C}_{ij}^{۱}$	$Tr(۰/۸,۱,۱/۲) * dis_{ij}$	$\forall i,j$
$\tilde{C}_{ij}^{۲}$	$Tr(۰/۴,۰/۶,۰/۸) * dis_{ij}$	$\forall i,j$
$\tilde{C}_{ij}^{۳}$	$Tr(۰/۳,۰/۴,۰/۵) * dis_{ij}$	$\forall i,j$
$\tilde{B}_f$	$Tr(۱۰۰,۲۰۰,۳۰۰)$	$\forall f$
$F_k^{۱f}, F_k^{۲f}, F_k^{۳f}$	۱۰,۲۰,۳۰	$\forall k,f$
$\tilde{C}S_k^t$	$Tr(۵,۱۰,۱۵)$	$\forall k,t$
$\tilde{T}_{ij}^t$	$Tr(۰/۲,۰/۳,۰/۴) * dis_{ij}$	$\forall i,j,t$
$\nu,\sigma,\omega,\psi,\xi$	$Rn(۰,۱)$	
r_{ij}	$Rn(۰,۱)$	$\forall i,j$
χ_{ik}	$Rn(۰,۱)$	$\forall i,k$
$LCO۲_{ik}$	$۲ * H_{ik}$	$\forall i,k$
$HCO۲_k$	$۰/۵ * \sum_i H_{ik}$	$\forall k$
$HLCO۲_{kl}^t$	H_{kl}	$\forall k,l$

٤-۲ نتایج عددی

به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی با عنایت به جدول ۱ و داده‌های مورد واقعی پیش‌گفته شش مساله طراحی شد. اطلاعات خاص این مسایل در جدول ۳ نشان آورده شده است. در تمامی مسایل افق زمانی ۴ ساله و با نرخ بهره‌ی ۲۰٪ در سرمایه‌گذاری برای احداث هاب‌ها مدنظر قرار گرفته است. به‌عبارت ساده‌تر در تمامی مسایل مقدار پارامتر $\left(\frac{A}{P}, int\,e\,rest\%, years\right)$ برابر ۰/۳۸ درنظر گرفته شده است.

جدول ۳. اطلاعات خاص مسایل

مساله	I	p	q
$model_۱$	۱۰	۲	۲
$model_۲$	۱۵	۳	۲
$model_۳$	۲۰	۳	۳
$model_۴$	۲۵	۳	۳
$model_۵$	۳۰	۴	۳
$model_۶$	۳۷	۴	۴

با حل مسایل طراحی شده توسط الگوریتم پیشنهادی سه جواب از مرز بهینه‌ی پارتو انتخاب و نتایج در جدول ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.

نمای گرافیکی سه جواب مرز بهینه‌ی مورد واقعی ($model_۶$) در شکل ۹ نشان داده شده است. در این شکل موارد الف، ب و ج به‌ترتیب معرف جواب اول، جواب دوم و جواب سوم مرز بهینه می‌باشند. در این شکل نمادهای P و B به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی مکان استقرار هاب‌های اولیه و پشتیبان می‌باشند.

جدول ٤. نتایج حاصل از حل مساله برای جواب اول مرز بهینه

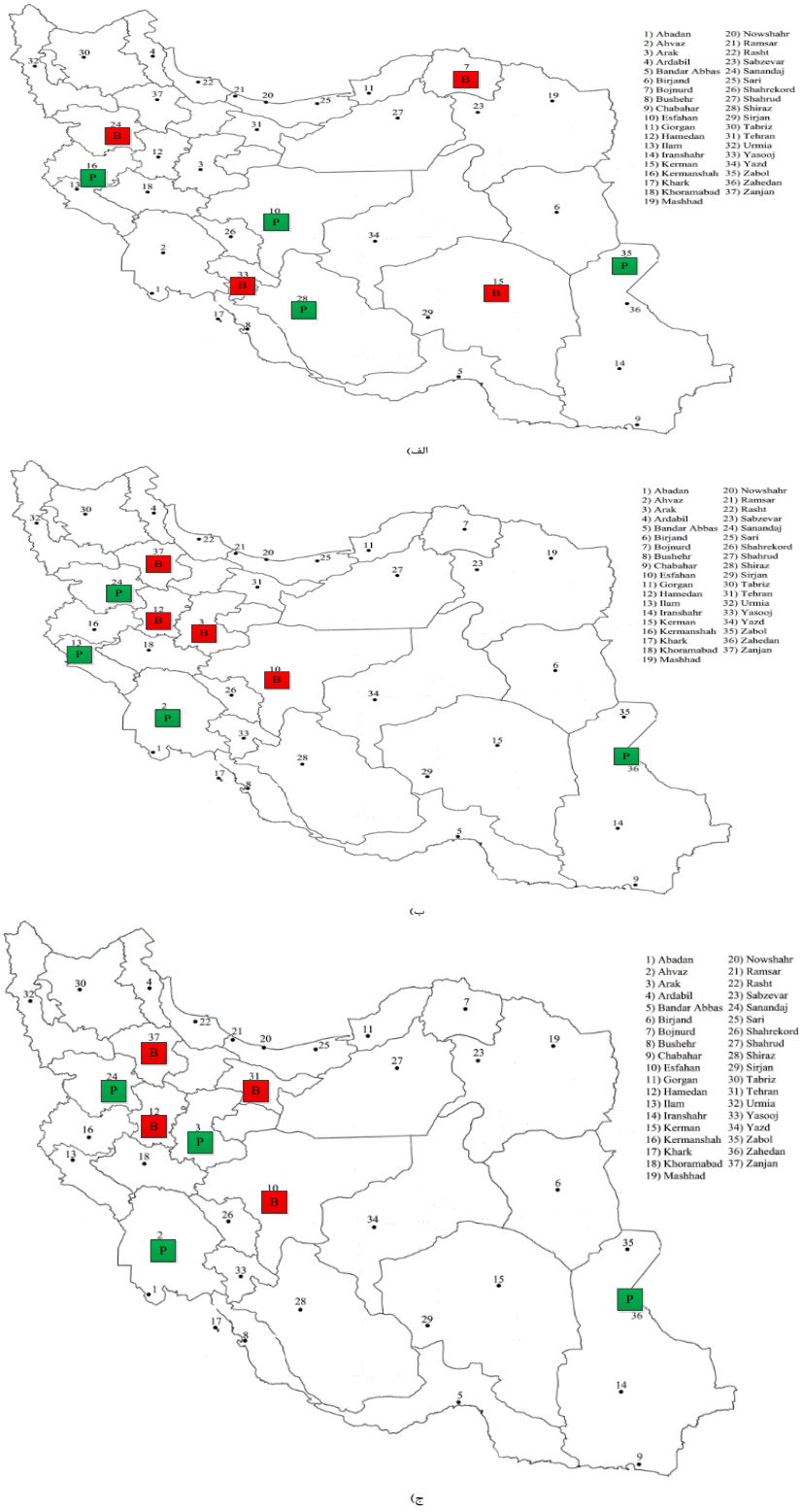
مساله	زمان حل (ثانیه)	جواب اول مرز بهینه			
		$obj۱$	$obj۲$	$obj۳$	$obj۴$
$model_۱$	۱	۱۴۹۳۱	۲۳۴۳/۴	۹۶/۷۲	۶۰
$model_۲$	۱	۱۶۰۳۶	۲۴۵۶/۷	۱۰۹/۹۵	۶۰
$model_۳$	۱	۸۲۳۸۶	۱۲۰۱۱	۴۲/۴۲	۰
$model_۴$	۲	۹۷۴۰۶	۱۵۷۳۰	۱۰۱/۷۴	۶۰
$model_۵$	۲	۱۲۰۲۵۰	۲۱۰۳۹	۵۵۱/۳۱۸۶	۵۰۸/۷۸۸۶
$model_۶$	۲	۳۷۹۷۳۰	۵۶۴۴۷	۲۵۳۵/۸	۲۴۸۱/۲

جدول ٥. نتایج حاصل از حل مساله برای جواب دوم مرز بهینه

مساله	جواب دوم مرز بهینه			
	$obj۱$	$obj۲$	$obj۳$	$obj۴$
$model_۱$	۷۴۴۰/۶	۱۳۷۶/۳	۲۸۹/۵۲۶۴	۲۵۱/۸۱۶۴
$model_۲$	۱۴۱۰۰	۲۷۶۴/۳	۴۲۲/۶۹۳۵	۳۹۴/۷۲۳۵
$model_۳$	۴۴۱۳۰	۷۱۹۳/۸	۷۰۰/۰۵۸۸	۶۵۹/۵۴۸۸
$model_۴$	۱۲۳۱۲۰	۱۵۱۰۹	۱۱۱/۵۸	۶۰
$model_۵$	۱۲۱۷۷۰	۲۱۱۴۱	۵۰۴/۵۵۶۲	۴۶۲/۱۳۶۲
$model_۶$	۴۳۹۴۹۰	۶۲۱۲۶	۱۱۵/۶۶	۶۰

جدول ٦. نتایج حاصل از حل مساله برای جواب سوم مرز بهینه

مساله	جواب سوم مرز بهینه			
	$obj۱$	$obj۲$	$obj۳$	$obj۴$
$model_۱$	۷۹۲۰/۳	۱۰۸۲/۷	۳۵۰/۳۹۲	۳۰۲/۲۰۲
$model_۲$	۱۴۶۷/۸	۲۷۳۹/۷	۴۵۲/۷۲۳۵	۴۱۸/۹۹۳۵
$model_۳$	۸۲۰۲۹	۱۲۱۱۶	۴۲/۴۲	۰
$model_۴$	۱۲۵۷۸۰	۱۵۲۱۶	۱۱۰/۸۱	۶۰
$model_۵$	۱۵۷۲۵۰	۲۶۴۵۱	۱۶۵/۸۱	۱۲۰
$model_۶$	۴۸۷۱۶۰	۶۱۳۶۷	۱۱۳/۴۸	۶۰



شکل ۹. نتایج حاصل از جواب‌های پارتوی ۱ تا ۳ بر روی نقشه

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق توانسته مسایلی در ابعاد دنیای واقعی را به راحتی و در مدت زمانی مناسب حل کند و این مساله نشان گر کارکرد مناسب الگوریتم فوق در حل مسایل عددی در ابعاد دنیای واقعی می‌باشد.

مبتنی بر یافته‌های عددی و تحلیل‌های مرتبط، راهکارهای اجرایی و عملیاتی به منظور بهره‌گیری توسط مدیران و تصمیم‌گیرندگان در پروژه های عمرانی به شرح ذیل ارایه می‌گردند:

- لازم است تا تصمیمات مربوط به مکانیابی، مسیریابی و موجودی به دلیل به هم پیوستگی تصمیمات در زنجیره ی تامین در یک چارچوب یکپارچه مورد بررسی قرار گیرند.
- نگاه جزیره‌ای و جداگانه به مباحث زنجیره ی تامین به خصوص مکانیابی، مسیریابی و تخصیص می‌تواند منجر به مشکلاتی نظیر دوباره کاری ها، توقف زنجیره، تاخیر، اضافه هزینه و غیره شود.
- لازم است تا افزون بر مسایل مالی و کمی، مسایل کیفی و توسعه ی پایدار نظیر توجه به محیط زیست نیز در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ شود.
- در هنگام برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تامین، لازم است تا دست‌اندرکاران و برنامه‌ریزان نسبت به محدودیت‌های دنیای واقعی نظیر عدم قطعیت و اختلالات احتمالی پیش‌بینی‌های لازم را داشته باشند.
- محیط هاب‌ها غالبا باز بوده و تحت تاثیر شرایط آب و هوایی و مسایلی نظیر آن می‌باشد. لذا در نظر گرفتن سناریوهای مختلف وقوع شرایط، می‌تواند برنامه‌ریزی‌ها را در مقابل نوسانات و تاثیرات آن تا حد زیادی مصون دارد.

۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت مساله‌ی هاب در مباحث زنجیره‌ی تامین و لجستیک، در تحقیق حاضر به دنبال ارایه ی مدل مکان یابی- مسیریابی هاب در شرایط عدم قطعیت، احتمال اختلال در تسهیلات، محدودیت‌های زیست محیطی و پوشش پشتیبان بودیم. برای مساله‌ی مورد بحث یک مدل ریاضی چندهدفه ارایه شد. این اهداف به‌ترتیب حداقل‌سازی هزینه‌ی کل، حداکثرسازی حداقل قابلیت اعتماد بین زوج گره‌های مبدا و مقصد، حداقل‌سازی حداکثر زمان انتظار از هر زوج گره و حداقل‌سازی میزان انتشارات کربن‌دی‌اکسید در کل شبکه را شامل می‌شوند. مقدار بودجه‌ی هر شیوه‌ی تامین مالی، هزینه‌ها، زمان‌های حمل و مقادیر تقاضا نادقیق بوده و با اعداد فازی مثلثی نشان داده شدند. با توجه به این که عدم‌قطعیت بالا بوده و درنتیجه اثربخشی تصمیمات راهبردی به خطر می‌افتد؛ برنامه‌ریزی استوار امکانی مورد بهره‌برداری قرار گرفت و نسبت به استوارسازی مدل اقدام شد. با توجه به ساختار NP-Hard مدل، برای حل مسایل عددی رویکرد ژنتیک چندهدفه ارایه و مورد استفاده قرار گرفت. مدل بر روی یک نمونه‌ی موردی در کشور ایران حل شد و نتایج حاصله، کارکرد مناسب رویکرد حل برای حل مسایل عددی در ابعاد مختلف در مدت زمانی مناسب را نشان داد. در انتها و مبتنی بر نتایج عددی حاصله از تحقیق، راهکارها و پیشنهادات اجرایی به منظور کمک به کاربران بالقوه ارایه شد تا بتوانند تصمیماتی دقیق تر و علمی‌تر را اتخاذ نمایند.

تحقیق حاضر را می‌توان با در نظر گرفتن برخی ملاحظات و اضافه کردن بعضی موضوعات توسعه داد و تحقیقات غنی‌تری را ارایه نمود. بررسی بحث موجودی در کنار مباحث مکانیابی، تخصیص و مسیریابی در مساله، توجه بیشتر به موضوع ساخت هاب‌ها به عنوان تسهیلات فیزیکی و در نظر گرفتن درصد پیشرفت ساخت هاب‌ها برای دوره‌های مختلف، استفاده از سایر رویکردهای فراابتکاری یا حل دقیق برای حل مسایل عددی در ابعاد مختلف، استفاده از اعداد نادقیق سناریویی در بخش‌های مختلف زنجیره هم می‌تواند به عنوان زمینه‌هایی برای تحقیقات آتی مورد نظر محققین و پژوهشگران قرار گیرد.

منابع

[1] Gelareh, S., Monemi, R. N., Nickel, S., (2015). Multi-period hub location problems in transportation. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 75, 67-94.

[2] Farahani, R. Z., Hekmatfar, M., Arabani, A. B., Nikbakhsh, E., (2013). Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. Computers & Industrial Engineering, 64(4), 1096-1109.

[3] Wandelt, S., Wang, S., Sun, X., (2024). A literature review on hub location-routing models and their solution techniques. Computers & Operations Research, 106861.

[4] Aloullal, A., Saldanha-da-Gama, F., Todosijević, R., (2023). Multi-period single-allocation hub location-routing: Models and heuristic solutions. European Journal of Operational Research, 310(1), 53-70.

[5] Li, W., Xin, Y., Yang, G., (2025). Regional express delivery network planning: A location-routing model and two-tier adaptive GA. Information Sciences, 712, 122133.

[6] Khalilzadeh, M., Ahmadi, M., Kebriyaii, O., (2025). A Bi-Objective Mathematical Programming Model for a Maximal Covering Hub Location Problem Under Uncertainty. SAGE Open, 15(1), 21582440251324335.

[7] Shang, X., Yang, K., Jia, B., Gao, Z., Ji, H., (2021). Heuristic algorithms for the bi-objective hierarchical multimodal hub location problem in cargo delivery systems. Applied Mathematical Modelling, 91, 412-437.

[8] Najy, W., Diabat, A., (2020). Benders decomposition for multiple-allocation hub-and-spoke network design with economies of scale and node congestion. Transportation Research Part B: Methodological, 133, 62-84.

[9] Chen, K., Xu, S., Haralambides, H., (2020). Determining hub port locations and feeder network designs: The case of China-West Africa trade. Transport Policy, 86, 9-22.

[10] Mohammadi, M., Jula, P., Tavakkoli-Moghaddam, R., (2019). Reliable single-allocation hub location problem with disruptions. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 123, 90-120.

[11] Mikić, M., Todosijević, R., Urošević, D., (2019). Less is more: General variable neighborhood search for the capacitated modular hub location problem. Computers & Operations Research, 110, 101-115.

[12] Dukkanci, O., Peker, M., Kara, B. Y., (2019). Green hub location problem. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 125, 116-139.

[13] Kartal, Z., Hasgul, S., Ernst, A. T., (2017). Single allocation p-hub median location and routing problem with simultaneous pick-up and delivery. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 108, 141-159.

[14] Alumur, S. A., Campbell, J. F., Contreras, I., Kara, B. Y., Marianov, V., O'Kelly, M. E., (2020). Perspectives on Modeling Hub Location Problems. European Journal of Operational Research.

[15] Habibi, M. K., Allaoui, H., Goncalves, G., (2018). Collaborative hub location problem under cost uncertainty. Computers & Industrial Engineering, 124, 393-410.

[16] Gelareh, S., (2008). Hub location models in public transport planning. Ph.D. thesis, Tecnical University of Kaiserslautern, Germany.

[17] Nafea, M., Shihata, L. A., Mashaly, M., (2025). Integrating Social Sustainability into Supply Chain Design: Optimization of a Capacitated Two-Echelon Location-Routing Problem. Technologies, 13(4), 149.

[18] Yang, X., Bostel, N., Dejax, P., (2019). A MILP model and memetic algorithm for the Hub Location and Routing problem with distinct collection and delivery tours. Computers & Industrial Engineering, 135, 105-119.
[19] Torkestani, S. S., Seyedhosseini, S. M., Makui, A., Shahanaghi, K., (2018). The reliable design of a hierarchical multi-modes transportation hub location problems (HMMTHLP) under dynamic network disruption (DND). Computers & Industrial Engineering, 122, 39-86.
[20] Ramshani, M., Ostrowski, J., Zhang, K., Li, X., (2019). Two level uncapacitated facility location problem with disruptions. Computers & Industrial Engineering, 137, 106089.
[21] Taherkhani, G., Hosseini, M., Alumur, S. A., (2024). Sustainable hub location under uncertainty. Transportation Research Part B: Methodological, 187, 103040.
[22] Karatas, M., Yakıcı, E., (2018). An analysis of p-median location problem: effects of backup service level and demand assignment policy. European Journal of Operational Research, 272(1), 207-218.
[23] Santos, B. P., Vieira, L. F., Vieira, M. A., (2017). CGR: Centrality-based green routing for Low-power and Lossy Networks. Computer Networks, 129, 117-128.
[24] Baller, A. C., van Ee, M., Hoogeboom, M., Stougie, L., (2020). Complexity of inventory routing problems when routing is easy. Networks, 75(2), 113-123.
[25] Zhang, W., Chen, Z., Zhang, S., Wang, W., Yang, S., Cai, Y., (2020). Composite multi-objective optimization on a new collaborative vehicle routing problem with shared carriers and depots. Journal of Cleaner Production, 274, 1225
[26] Karimi, H., Bashiri, M., (2011). Hub covering location problems with different coverage types. Scientia Iranica, 18(6), 1571-1578.