

## مسئله مکان‌یابی - مسیریابی هاب زمینی در محدوده نامتراکم و وسیع

فرزاد بهرامی<sup>۱</sup>، حسین صفری<sup>۲</sup>، رضا توکلی مقدم<sup>۳</sup>، محمد مدرس یزدی<sup>۴</sup>

**چکیده:** به منظور کنترل هزینه‌ها در یک شبکه حمل و نقل زمینی که میزان کالای انتقالی بین شهرها از میزان ظرفیت یک کامیون کمتر است، باید علاوه بر تعیین محل صحیح هاب‌ها، بار چند شهر با یکدیگر تجمیع شود و پس از تعیین مسیر حرکت کالاها، به هاب مناسب اختصاص یابد. در این مقاله، حالت خاصی از مسئله مکان‌یابی - مسیریابی هاب زمینی مطرح می‌شود که مناسب با وضعیت ایران است؛ به طوری که شهرها در محدوده نامتراکم و وسیع واقع شده‌اند. یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط به منظور نگاشت مسئله ارائه شده است. با توجه به پیچیدگی محاسباتی حل بهینه مدل، روش حل دو مرحله‌ای، تلفیقی از الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید طراحی شده است. نتایج مقایسات عددی روش حل پیشنهاد شده با یک روش بهینه‌یاب، نشان از دقت و سرعت روش حل ارائه شده دارد. در نهایت یک مورد واقعی از ایران با ۳۱ مرکز استان حل شده تا عملکرد مناسب روش حل پیشنهاد شده در این پژوهش نشان داده شود.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، مدل‌سازی ریاضی، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه، مکان‌یابی هاب.

۱. دکتری مدیریت تولید و عملیات، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۷

نویسنده مسئول مقاله: حسین صفری

E-mail: hsafari@ut.ac.ir

## مقدمه

مسئله مکان‌یابی هاب از جمله مسائل نوینی است که در سه دهه اخیر در دسته مسائل مکان‌یابی مطرح شده و روز به روز توجه بیشتری را به خود جلب می‌کند (کمپل، لاو و ژانگ، ۲۰۰۷)؛ به طوری که از زمان معرفی مقاله اوکلی (۱۹۸۶) تا امروز، استفاده از هاب کاربرد وسیعی در طراحی شبکه صنایع ارتباطات و مخابراتی (لی، لیم و پارک، ۱۹۹۶)، حمل و نقل هوایی (توح و هیگینز، ۱۹۸۵؛ ساساکی، سوزوکی و درزنر، ۱۹۹۹؛ مارتین و رومن، ۲۰۰۳؛ ساساکی، کمپل، کریشنامورثی و ارنست، ۲۰۱۴)، حمل و نقل زمینی (تیلور، هریت، انگلیش و ویکر، ۱۹۹۵؛ یمن، کارا و تسلس، ۲۰۰۷)، خدمات پستی (کوبی و گری، ۱۹۹۳؛ وازنر و زاپفل، ۲۰۰۴؛ لی و مون، ۲۰۱۴) و غیره داشته است.

در مسائل مکان‌یابی هاب، تلاش بر این است که به جای ارتباط مستقیم بین هر مبدأ - مقصد (OD)، از تسهیلاتی به نام هاب استفاده شود تا وظیفه جمع‌آوری، مرتب‌کردن و توزیع کالا را میان OD های متفاوت و با ارتباطات نسبتاً کمتر در شبکه بر عهده گیرند. استفاده از ارتباطات کمتر اجازه می‌دهد جریان متمرکزتر شده و صرفه‌جویی به مقیاس<sup>۱</sup> برای سیستم فراهم شود (آلامور و کارا، ۲۰۰۸؛ شاهین، جبل عاملی و جبارزاده، ۱۳۹۵).

اغلب در دنیای واقعی، به‌ویژه در حمل و نقل‌های زمینی که میزان کالای بین OD کمتر از میزان ظرفیت یک کامیون (LTL)<sup>۲</sup> است، باید به‌منظور کنترل هزینه‌ها، حمل و نقل کالاها از چند مرکز به یک هاب و برعکس تجمیع شود (وازنر و زاپفل، ۲۰۰۴؛ کمپل و اوکلی، ۲۰۱۲). در این موقعیت، علاوه بر مکان‌یابی هاب‌ها و مشخص کردن جریان کلی میان هر OD، حرکت کالاها از مراکز مختلف به هاب نیز باید مشخص و معین شود. این موضع ثابت شده که حل مسئله مکان‌یابی بدون در نظر گرفتن مسیر حرکت، ممکن است به جواب زیربهبینه<sup>۳</sup> منتج شود (سالهی و رند، ۱۹۸۹). مسئله مکان‌یابی - مسیریابی (LRP)<sup>۴</sup> با در نظر گرفتن همزمان تصمیم‌های دو مسئله مکان‌یابی و مسیریابی، این مشکل را بر طرف کرده است (دولابی و سیفی، ۲۰۱۳؛ جاربوی، دربل، هنفی و مادنوویچ، ۲۰۱۳). این رویکرد یکپارچه را لپورت (۱۹۸۸) آن را LRP نامیده است، معمولاً از سه جزء تشکیل می‌شود: تعداد، اندازه و مکان تسهیلات، تخصیص نقاط تقاضا به تسهیلات و طراحی مسیرهای وسایل نقلیه.

- 
1. Economy of scale
  2. Less Than TruckLoad (LTL)
  3. Sub-optimal
  4. Location-Routing Problem (LRP)

کمپل در سال ۱۹۹۴ با بررسی حالت‌های مختلف تخصیص، چهار مسئله بنیادی را برای مکان‌یابی هاب مشابه با مکان‌یابی تسهیلات ارائه کرد. ارنست و کریشنامورثی (۱۹۹۶) با ارائه ویرایشی از مسئله میانه چند هابه، فرمولاسیونی با متغیرهای سه زیرنویسه توسعه دادند که موجب کاهش تعداد متغیرها در مسئله شده و آن را مناسب حل مسائل با ابعاد بزرگ می‌کرد. آنها مسئله پست استرالیا با ۲۰۰ گره<sup>۱</sup> و ۱۰ هاب را در حالی با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)<sup>۲</sup> حل کردند که تا قبل از آن، محققان حداکثر روی مکان‌یابی ۲۵ گره کار می‌کردند.

نگی و سالهی (۱۹۹۸) مسئله مکان‌یابی - مسیریابی تعداد زیادی هاب را با تغییر یکسری از فرضیات کمپل (۱۹۹۴) ارائه دادند و با نوعی الگوریتم ابتکاری، مسئله فرموله شده را حل کردند. وازنر و زاپفل (۲۰۰۴) یک مدل کلی مکان‌یابی هاب و مسیریابی وسایل نقلیه را در بخش حمل و نقل پست اتریش توسعه دادند و با توجه به پیچیدگی مسئله، به ارائه یک جواب ابتکاری مفهومی بسنده کردند. یمن و همکارانش (۲۰۰۷) مسئله مکان‌یابی هاب با آخرین ورود را مدل کردند. در مدل آنان که از دیدگاهی مکان‌یابی هاب بود، به نوعی مسیریابی هم در نظر گرفته شده است؛ به طوری که تمام هاب‌ها به‌طور مستقیم به یکدیگر متصل بودند، اما با در نظر گرفتن زمان‌های توقف در هاب‌ها، یک مسئله حمل و نقل کلی را با چندین محل توقف در گره‌های غیرهاب در نظر گرفتند. بدین صورت که مسیرهای اضافی نیز جزئی از زمان هاب در نظر گرفته شود. کاراوگلان، آلتیپارمک، کارا و دنگیز (۲۰۱۲) با هدف کمینه‌کردن هزینه‌ها، حالتی از مسئله مکان‌یابی و مسیریابی را بررسی کردند که در آن، جمع‌آوری و توزیع همزمان است. ایشان به منظور مدل‌سازی مسئله، دو فرمولاسیون برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط<sup>۳</sup> را ارائه کردند. همچنین برای حل نیز، یک الگوریتم دو مرحله‌ای بر اساس الگوریتم SA پیشنهاد کردند که نتایج مناسبی ارائه می‌کرد. در نهایت ریک، ایرنبرگ و زیمرمن (۲۰۱۴) یک حالت از مسئله مکان‌یابی - مسیریابی هاب با انتقال درون هاب و جمع‌آوری و توزیع محصولات مختلف را در نظر گرفتند که کاربرد عملی آن در چوب‌بری معرفی شد. آنان با ارائه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، بر اساس یک روش بهینه و الگوریتم ژنتیک (GA)<sup>۴</sup> راه‌حلی پیشنهاد دادند تا مسائل با ابعاد بزرگ را حل کند.

در این مقاله، کاربردی از مسئله مکان‌یابی و مسیریابی هاب در حمل و نقل زمینی در محیط نامتراکم و وسیع همانند ایران با هدف کمینه‌کردن هزینه‌ها بررسی خواهد شد. ایران یکی از بزرگ‌ترین کشورهای منطقه و نوزدهمین کشور جهان از لحاظ وسعت است. افزون بر نیمی از

---

1. Node  
 2. Simulated Annealing (SA)  
 3. Mixed integer  
 4. Genetic Algorithm (GA)

مساحت ایران کویری و نیمه کویری و حدود یک سوم آن کوهستانی است. این مسئله موجب تراکم و تعدد شهرها در مناطق حاصلخیز شمال و غرب کشور شده است، در حالی که شرق و جنوب کشور، شهرهایی با جمعیت کمتر، پراکنده‌تر و دورتر دارد. به همین دلیل، از لحاظ توسعه راه‌ها، بین شهرهای غرب و شرق افتراقی به‌وجود آمده است که پوشش یکنواخت شهرها با استفاده از مسیر جاده‌ای را با مشکل مواجه می‌کند. این وضعیت موجب می‌شود که نتوان از راهکار رایج ایجاد تورهای مختلف بین شهرها در مسیریابی استفاده کرد؛ هر چند مسئله مکان‌یابی - مسیریابی، شامل تمام مسائلی است که به نحوی یک مسیر می‌تواند چه به‌صورت تور و چه به‌صورت رفت و برگشت، یک هاب را به بیش از چند گره متصل کند (لوپز، فریرا، سانتوز و بارتو، ۲۰۱۳).

ثابت شده است که هر یک از مسائل مکان‌یابی هاب و مسیریابی وسایل نقلیه، به‌طور جداگانه از لحاظ پیچیدگی سخت (NP-hard) هستند (کمپل و اوکلی، ۲۰۱۲؛ نوروزی، صادق عمل نیک و توکلی مقدم، ۲۰۱۶)، در نتیجه به‌منظور حل این مسائل در ابعاد واقعی، باید از روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری استفاده شود (رضوی، سوخکیان و زیارتی، ۱۳۹۰). در این مقاله یک روش ابتکاری دو مرحله‌ای تلفیقی مد نظر قرار گرفته است؛ به‌طوری که در مرحله اول با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مکان هاب‌ها و تخصیص گره‌ها مشخص می‌شود و در مرحله دوم با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و دو جست‌وجوی محلی، مسیریابی جواب‌ها بهبود می‌یابد. در ادامه مفروضات مسئله بررسی شده و مدل مناسب به‌منظور نگاشت آن فرموله می‌شود؛ سپس با توجه به جدید بودن مدل مطرح شده و پیچیدگی زیاد آن، یک روش دو مرحله‌ای تلفیقی برای حل ارائه خواهد شد. بخش بعد به بررسی نتایج محاسباتی روی مسائل آزمایشی طراحی شده و مورد مطالعه اختصاص دارد. در بخش آخر نیز، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای کارهای بیشتر ارائه خواهد شد.

### مفروضات و مدل‌سازی مسئله

در مسئله تحت بررسی، تعداد و مکان هاب‌ها مشخص نیست. آنها از میان گره‌های شبکه انتخاب می‌شوند و به‌طور کامل به یکدیگر متصل‌اند. لازم است تا بار تمام شهرها حمل شده و هر شهر حتماً و تنها به یک هاب تخصیص داده شود. البته شهری که به‌عنوان هاب انتخاب می‌شود، به خودش به‌عنوان هاب نیز متصل می‌شود. به‌دلیل حفظ وضعیت رقابتی، باید بار تمام شهرها طی مدت حداکثر ۷۲ ساعت به مقصد انتقال یابد.

با توجه به وضعیت کشور، هر مسیر از یک هاب آغاز شده و به‌صورت رفت و برگشت به همان هاب ختم می‌شود، از این رو، جمع‌آوری و توزیع در مسیرها همزمان نیست؛ یعنی ابتدا در

مسیر رفت بارها توزیع شده و پس از تخلیه کامل، در مسیر بازگشت بارها جمع‌آوری می‌شوند. همچنین یک هاب ممکن است به هیچ مسیری سرویس ندهد یا به بیش از یک مسیر سرویس دهد. از سوی دیگر، بارها به صورت دسته‌ای حمل می‌شوند تا بتوان از صرفه‌جویی به مقیاس استفاده کرد. محدودیتی در تعداد وسایل نقلیه وجود ندارد و فرض شده است که شرکت می‌تواند به هر تعدادی که می‌خواهد به صورت روزانه وسیله نقلیه اجاره کند. البته تعداد و نوع وسایل نقلیه در هر مسیر یا بین دو هاب، به حداکثر تعداد بارهای حمل شده در جهت رفت یا برگشت بستگی دارد. برای ایجاد یک هاب یا یک مسیر، هزینه ثابتی در نظر گرفته می‌شود تا از ایجاد هاب یا مسیرهای اشتباه جلوگیری شود.

در ادامه، اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله معرفی می‌شوند:

$i, j$ : اندیس گره‌ها (شهرها) به گونه‌ای که  $i, j \in N$  ( $N$  مجموعه گره‌ها است)

$k, k'$ : اندیس مسیرها

$n$ : اندیس محل گره‌ها در مسیرها

$m, m'$ : اندیس هاب‌ها به گونه‌ای که  $m, m' \in N$

$W_{ij}$ : مقدار تقاضا بین دو گره (شهر) از شهر  $i$  به شهر  $j$

$T_{ij} = T_{ji}$ : زمان حمل بین دو شهر  $i$  و  $j$ ، به طوری که

$TR$ : حداکثر زمانی که وسایل نقلیه قادرند در یک مسیر طی کنند

$TH$ : حداکثر زمانی که وسایل نقلیه می‌توانند بین دو هاب حرکت کنند

$TD$ : حداکثر زمان در دسترس در روز

$CR$ : هزینه ثابت استقرار یک مسیر

$CV$ : هزینه اجاره وسیله نقلیه در مسیر (بر حسب کیلومتر یا زمان)

$CH$ : هزینه اجاره وسیله نقلیه بین دو هاب (بر حسب کیلومتر یا زمان)

$CA$ : حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه

$Z$ : مقدار تابع هدف

$x_{nik}$ : اگر گره  $i$  ام در محل  $m$  ام مسیر  $k$  ام قرار بگیرد، مقدار ۱ و در غیر این صورت

صفر در نظر گرفته می‌شود

$y_{im}$ : اگر گره  $i$  ام به هاب  $m$  ام تخصیص یابد مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر در

نظر گرفته می‌شود.

$VR_k$ : تعداد وسایل حمل و نقل مورد نیاز در مسیر  $k$  ام

$VH_{mm'}$ : تعداد وسایل حمل و نقل مورد نیاز بین دو هاب  $m$  و  $m'$

با توجه به عدم وجود مدل مکان‌یابی - مسیریابی هاب متناسب با وضعیت کشور، در ادامه مدل مناسب فرموله می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_i y_{ii} \cdot CH_i + \sum_i \sum_k x_{1ik} \cdot CR + \sum_k VR_k \cdot CV \\ & + \sum_m \sum_{m'} VH_{mm'} \cdot CH \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱)}$$

St.

$$\sum_i x_{nik} \leq 1 \quad \forall n, k \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\sum_i x_{nik} - \sum_i x_{n+1,ik} \geq 0 \quad \forall n, k \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\sum_{n>1} \sum_k x_{nik} \leq 1 \quad \forall i \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_n \sum_k x_{nik} \geq 1 \quad \forall i \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_m y_{im} = 1 \quad \forall i \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$y_{mm} - y_{im} \geq 0 \quad \forall i, m \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$x_{1mk} - y_{mm} = 0 \quad \forall m, k \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\sum_{n>1} x_{nik} - \sum_{m \neq i} y_{im} \leq 0 \quad \forall i, k \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\sum_{n>1} x_{nik} + x_{1mk} - y_{im} \leq 1 \quad \forall i, m (i \neq j), k \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\sum_n \sum_i \sum_j x_{nik} \cdot x_{n+1,jk} \cdot T_{ij} \leq TR \quad \forall i, j, (i \neq j), k \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$y_{mm} \cdot y_{m'm'} \cdot T_{mm'} \leq TH \quad \forall m, m', (m \neq m') \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$2TR + TH \leq TD \quad \forall m, m', (m \neq m') \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$VR_k.CA - \max\left\{\sum_{n>1} \sum_i (x_{nik} \cdot \sum_j W_{ij}), \sum_{n>1} \sum_i (x_{nik} \cdot \sum_j W_{ji})\right\} \geq 0 \quad \forall k \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$VH_{mm'.CA} - \sum_i \sum_j y_{im} \cdot y_{jm'} \cdot W_{ij} \geq 0 \quad \forall m, m', (m \neq m') \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$VR_k \geq 0 \quad \forall k \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$VH_{mm'} \geq 0 \quad \forall m, m' \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$x_{nik} = \{0,1\} \quad \forall n, i, k \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$y_{im} = \{0,1\} \quad \forall i, m \quad \text{رابطه ۱۹}$$

تابع هدف در رابطه ۱ نشان داده شده است؛ قسمت اول رابطه، هزینه تأسیس هاب در گره نام را مشخص می‌کند. بخش دوم، هزینه تأسیس مسیرها را دربرمی‌گیرد و قسمت‌های سوم و چهارم تابع هدف، به ترتیب هزینه حمل در مسیر و بین هاب‌ها را محاسبه می‌کند. رابطه‌های ۲ تا ۵ محدودیت‌های محل قرار گرفتن گره‌های هاب و غیرهاب را روی مسیرها مشخص می‌کند. توجه داشته باشید که اولین محل در هر مسیر، متعلق به هاب است؛ بنابراین در صورتی که  $n = 1$  باشد، آن گره به عنوان هاب انتخاب شده است و هر گره هاب می‌تواند آغاز کننده چندین مسیر باشد. در رابطه ۲ مدل اطمینان حاصل می‌کند که هر محل در هر مسیر حداکثر به یک گره تخصیص داده می‌شود. در رابطه ۳ مدل تضمین می‌کند که محل‌های روی مسیرها به ترتیب عددی تخصیص داده شده‌اند. رابطه ۴ محدودیت مختص گره‌های غیرهاب است ( $n > 1$ ). با توجه به اینکه این محدودیت برای تمام گره‌ها تعریف می‌شود، هر گره حداکثر می‌تواند یک محل را در جایی خارج از اول مسیر اشغال کند، اما با در نظر گرفتن اولین محل مسیر و با توجه به اینکه گره‌های هاب ممکن است بیش از یک مسیر را پوشش دهند، هر گره حداقل یک محل در بین مسیرها را اشغال خواهد کرد. این مطلب در رابطه ۵ بیان شده است. رابطه ۶ تضمین می‌کند که هر گره تنها به یک هاب تخصیص می‌یابد. رابطه ۷ نیز اطمینان حاصل می‌کند که یک گره تنها زمانی به یک گره دیگر به عنوان هاب متصل می‌شود که آن گره قبلاً به عنوان هاب انتخاب شده باشد.

رابطه‌های ۸ تا ۱۰ مشخص کننده روابط بین مسیریابی و مکان‌یابی هستند؛ رابطه ۸ بیان می‌کند که گره‌هایی که در مکان اول مسیرها قرار دارند، هاب هستند. رابطه ۹ برای گره‌های غیرهاب است، به گونه‌ای که اگر گره‌ای در مکانی غیر از مکان اول قرار گیرد، نمی‌تواند به عنوان

هاب انتخاب شود. رابطه ۱۰ نیز تخصیص درست در هر مسیر را تطبیق می‌دهد تا اگر گره‌ای به یک مسیر تعلق گرفت، به هاب صحیح خود اختصاص یابد. رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نشان‌دهنده زمان مجاز برای طی کردن بارها در مسیرها و هاب‌هاست. با توجه به اینکه در مدل فرض شده که حمل کالا حداکثر تا ۷۲ ساعت امکان‌پذیر است، رابطه ۱۳ نیز باید برقرار باشد. رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نشان‌دهنده تعداد وسایل استفاده‌شده در مسیرها و بین دو هاب است. در نهایت، رابطه‌های ۱۶ تا ۱۹ نشان‌دهنده روابط سیستمی متغیرهای مسئله‌اند. اگرچه مدل ارائه شده غیرخطی است، با استفاده از روش‌های کلاسیک می‌توان مدل را به راحتی به حالت خطی تبدیل کرد (ولسی، ۱۹۹۸: ۴۷-۳۷).

## روش حل

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، مدل ارائه شده شامل مسئله مکان‌یابی و مسیریابی است که از دسته مسائل پیچیده سخت محسوب می‌شود؛ به طوری که در زمان مناسب توسط نرم‌افزارهای بهینه‌یاب قابل حل نیستند. به همین دلیل در اغلب پژوهش‌ها، از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری ترکیبی برای حل آنها استفاده می‌شود. این روش‌ها شامل روش‌هایی است که به نوعی قسمت مکان‌یابی را از مسیریابی جدا کرده و هر یک را به صورت مجزا حل می‌کند (لوپز و همکاران، ۲۰۱۳؛ نگی و سالهی، ۲۰۰۷). از این رو، چنانچه یک بخش از مسئله به طور دقیق حل نشده باقی بماند، ادامه مسیر الگوریتم‌ها با اشکال‌هایی روبه‌رو می‌شود.

در این پژوهش تلاش شده است که مکان‌یابی و مسیریابی همزمان انجام شود؛ به طوری که در مرحله اول با مشخص شدن مکان هاب‌ها، همزمان گره‌ها به هاب‌ها تخصیص داده شده و مسیر آنها در سریع‌ترین زمان ممکن مشخص شود. با ثابت فرض کردن مکان هاب‌ها، در مرحله دوم سعی می‌شود تخصیص‌ها و مسیرها بهبود یابند. با توجه به فضای جواب متنوع مکان‌یابی و مسیریابی، دو الگوریتم فراابتکاری متفاوت برای مرحله‌های اول و دوم مد نظر قرار گرفته است. در مرحله اول از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود تا با جست‌وجوی وسیع فضای جواب، بهترین ترکیب را به عنوان مکان هاب‌ها انتخاب کند. در مرحله دوم به کمک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، جواب به دست آمده تا حد امکان بهبود می‌یابد. به منظور بهبود جواب نهایی نیز از یک الگوریتم جست‌وجوی محلی استفاده می‌شود.

در این بخش، ابتدا الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید معرفی شده، سپس نحوه نمایش جواب‌ها به کمک شکل و مثال عددی نشان داده می‌شود. در ادامه، ضمن معرفی کردن عملگرهای استفاده شده در الگوریتم‌های طراحی، در نهایت روش حل توضیح داده می‌شود.



### الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید

ایده‌ی اساسی الگوریتم ژنتیک از نحوه‌ی تنازع و بقای جانداران در طبیعت است. بر اساس قانون انتخاب طبیعی<sup>۱</sup>، تنها گونه‌هایی از یک جمعیت ادامه‌ی نسل می‌دهند که بهترین خصوصیات را داشته باشند (هالند، ۱۹۹۲). در این الگوریتم، به هر مرحله‌ی تکراری نسل گفته می‌شود و مجموعه‌هایی از پاسخ‌ها در هر نسل را جمعیت می‌نامند. الگوریتم با یک تعداد مشخص از جواب‌ها (کروموزوم) که جمعیت اولیه نامیده می‌شود، کار را آغاز کرده و تلاش می‌کند به کمک یکسری عملگرهای ژنتیکی مانند تقاطع<sup>۲</sup> و جهش<sup>۳</sup>، با بهبود جواب‌ها به سمت جواب بهینه نزدیک شود. معیار سنجش جواب‌ها، عدد برازندگی<sup>۴</sup> آن جواب است که می‌تواند به راحتی مقدار تابع هدف حاصل از آن رشته جواب باشد (بیکر و آیچو، ۲۰۰۳؛ کانها و سیلوا، ۲۰۰۷).

ایده‌ی اصلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نیز از نحوه‌ی ذوب و انجماد تدریجی جامدات و فلزات شکل گرفته و توسط کارهای کریک پاتریک (۱۹۸۳) و کرنی (۱۹۸۵) توسعه یافته است. الگوریتم SA از یک جواب اولیه آغاز می‌شود، سپس در یک حلقه‌ی تکرار به جواب‌های همسایه حرکت می‌کند. اگر جواب همسایه بهتر از جواب فعلی باشد، الگوریتم آن را به‌عنوان جواب فعلی (جاری) قرار می‌دهد (یعنی به سمت آن حرکت می‌کند)، در غیر این صورت، الگوریتم آن جواب را براساس یک تابع احتمالی به شکل  $\exp\left(\frac{-\Delta E}{T}\right)$  به‌عنوان جواب جاری می‌پذیرد. در این رابطه  $\Delta E$  نشان‌دهنده‌ی تفاوت بین تابع هدف جواب فعلی و جواب همسایه و  $T$  معرف پارامتری به نام دما است. امکان پذیرش جواب بدتر به‌عنوان جواب جاری، این امکان را برای الگوریتم فراهم می‌کند تا در دام جواب‌های زیر بهینه نیفتد.

### نحوه‌ی تولید و نمایش جواب

جواب مسئله مطرح شده، موارد متنوعی را شامل می‌شود؛ زیرا باید همزمان مکان هاب‌ها، نحوه‌ی تخصیص گره‌ها به هاب‌ها، تعداد و گره‌های متعلق به مسیرها مشخص شده و محل قرارگیری آنها در مسیرها تعیین شود. به همین دلیل، از چهار رشته‌ی متفاوت (کروموزوم) همانند شکل ۱ برای نمایش جواب استفاده شده است. هر یک از عناصر مرتبط با رشته (ژن)، نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی گره است. رشته‌ی اول متعلق به هاب‌هاست؛ ژن‌ها در این رشته به‌صورت صفر و ۱ مشخص می‌شوند و هر ژنی که مقدار ۱ بگیرد، یعنی گره هاب شده است، در غیر این صورت گره غیرهاب

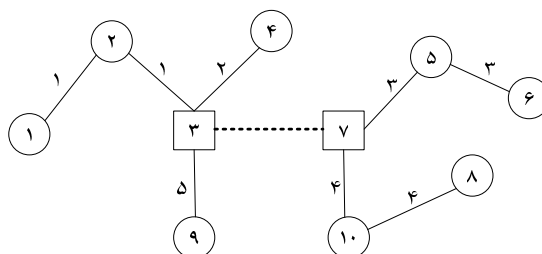
- 
1. Natural Selection
  2. Crossover
  3. Mutation
  4. Fitness

است. البته هاب‌ها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که امکان‌پذیر باشند و محدودیت‌های حداکثر فاصله بین آنها رعایت شود. پس از تعیین هاب‌ها (به‌صورت تصادفی یا ساختارمند)، نوبت به تخصیص سایر گره‌ها به گره‌های هاب می‌رسد. این کار بر اساس نزدیک‌ترین هاب به گره رخ می‌دهد. در شکل ۱، رشته دوم، گره‌های تخصیص‌یافته به هاب‌ها را نشان می‌دهد. در این رشته، فقط اعدادی که به‌عنوان هاب انتخاب شده‌اند، مشاهده می‌شوند.

پس از تخصیص گره‌ها به هاب‌ها، نوبت به مسیریابی آنها می‌رسد. در مرحله اول مسیریابی بر اساس نزدیک‌ترین فاصله با هاب یا نزدیک‌ترین زمان به آخرین گره تخصیص‌یافته به یک مسیر تخصیص می‌یابند تا زمانی که دیگر نتوان به مسیر گره‌یابی تخصیص داد. رشته سوم شماره مسیر هر گره را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ممکن است هر هاب سرمنشأ بیش از یک مسیر باشد، در این رشته گره‌هایی که به‌عنوان هاب انتخاب شده‌اند، عدد صفر می‌گیرند. رشته چهارم نشان‌دهنده ترتیب قرارگیری گره‌ها در مسیرهایشان است. دوباره با توجه به اینکه هر هاب ممکن است سرمنشأ بیش از یک مسیر باشد، زن مربوط به آن، مقدار صفر می‌گیرد. مقادیر مشخص شده در چهار کروموزم یاد شده به‌صورت شماتیک شکل ۲ را با ۱۰ گره و دو هاب هاب تشکیل می‌دهند (هاب‌ها با مربع و گره‌های غیرهاب با دایره نشان داده شده‌اند).

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	
۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	هاب
۳	۳	۳	۳	۷	۷	۷	۷	۳	۷	تخصیص
۱	۱	۰	۲	۳	۳	۰	۴	۵	۴	مسیر
۲	۱	۰	۱	۱	۲	۰	۲	۱	۱	ترتیب

شکل ۱. نحوه نمایش یک مثال فرضی با ۱۰ گره و دو هاب



شکل ۲. شبکه یک مثال فرضی با ۱۰ گره و دو هاب

### عملگرهای استفاده شده

در سه بخش متفاوت مکان‌یابی، تخصیص و مسیریابی، عملگرهای متفاوتی طراحی شده است تا بتوان نسل بعدی یا جواب بعدی را ایجاد کرد. عملگرهای مرتبط با مکان‌یابی و تخصیص در مرحله اول به کار می‌روند و عملگر مرتبط با مسیریابی در مرحله دوم استفاده می‌شود. در روش تولید همسایگی هاب‌ها، یک هاب به‌طور تصادفی انتخاب شده، مقدار ژن مربوط به آن صفر می‌شود و یک گره غیرهاب انتخاب شده مقدار ژن آن ۱ می‌شود. شایان ذکر است که امکان‌پذیری جواب بررسی شده و تنها در صورتی که جواب امکان‌پذیر باشد، جواب همسایه پذیرفته می‌شود.

در تولید همسایگی تخصیص گره‌ها، از دو عملگر تقاطعی و جهش استفاده شده است. در عملگر تقاطعی، به‌صورت تصادفی یک نقطه در کروموزوم تعیین شده و برش داده می‌شود و اعداد دو بخش با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند، البته یک مرحله ترمیم نیز انجام می‌گیرد تا جواب غیرممکن تولید نشود. در عملگر جهش نیز یک گره تصادفی انتخاب شده و به‌صورت تصادفی به هاب دیگر تخصیص داده می‌شود. البته بعد از تخصیص، دوباره امکان‌پذیری جواب بررسی خواهد شد.

مسیریابی جواب‌ها در مرحله اول روی نزدیک‌ترین فاصله تنظیم می‌شوند، اما ممکن است که مسیرهای حاصل شده بهترین مسیریابی تخصیص نباشند. بنابراین در مرحله دوم، در هر مرحله از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، یک گره تصادفی انتخاب شده و به‌صورت تصادفی داخل مسیر دیگری جای‌گذاری می‌شود.

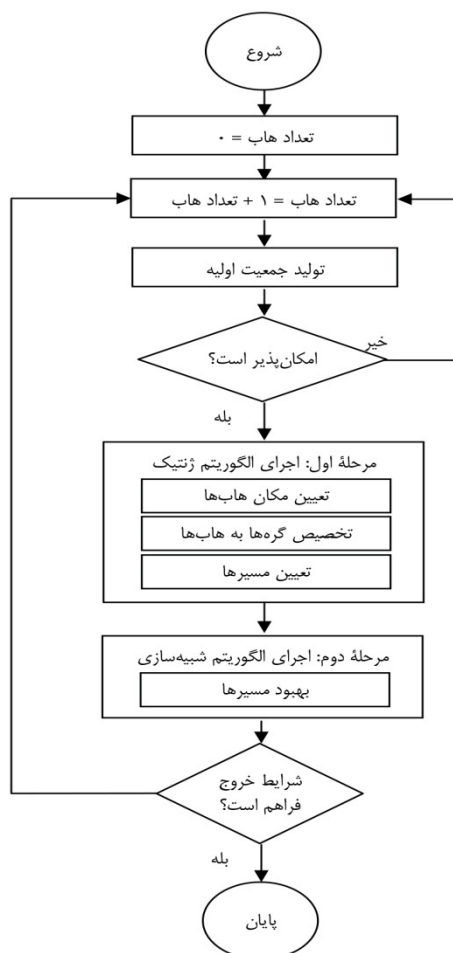
### روش‌های بهبود سراسری جواب

از دو روش جست‌وجوی سراسری به‌منظور بهبود جواب‌های خروجی مرحله دوم استفاده شده است؛ در اولین روش، تمام مسیرها و هاب‌ها بررسی می‌شوند، بدین منظور که آیا امکان‌پذیر است که بخشی یا تمام یک مسیر را به دومین هاب نزدیک تخصیص داد یا خیر. در دومین روش، تمام مسیرهای طولانی شده بررسی می‌شود تا با کاهش مسیر، زمان حمل کاهش یابد یا از تعداد وسایل نقلیه کاسته شود. در هر دو روش اگر راهکار امکان‌پذیر باشد و مقدار تابع هدف بهبود یابد، جواب جدید جایگزین جواب قبلی شده، جست‌وجو از ابتدا انجام می‌شود.

### روش حل پیشنهادی

پس از معرفی مرحله‌های مختلف روش حل، در این بخش روش حل دو مرحله‌ای تلفیقی در قالب شکل ۳ ارائه می‌شود. همان‌طور که در شکل مشخص است، ابتدا تعداد هاب روی یک

مقدار تنظیم می‌شود. اگر با آن تعداد هاب بتوان تمام شهرها را در زمان مجاز پوشش داد، الگوریتم به کار خود ادامه می‌دهد و در غیر این صورت یک واحد به تعداد هاب‌ها اضافه می‌شود. این اضافه‌شدن تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که بتوان یک جمعیت اولیه با آن تعداد هاب ایجاد کرد. با این کار می‌توان بر اساس الگوریتم ژنتیک، مکان‌یابی و تخصیص گره‌ها را مشخص نمود. سپس جواب وارد مرحله دوم می‌شود تا مسیریابی را با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و دو روش جست‌وجوی سراسری معرفی شده بهبود دهد. معیار خروج، بهبود نیافتن جواب در دو دوره متوالی در نظر گرفته شده است.



شکل ۳. فلوجارت روش حل مسئله

### نتایج محاسباتی

به منظور استفاده از روش حل پیشنهاد شده، لازم است ابتدا نتایج حاصل از آن با روش‌های موجود یا روش‌های بهینه‌سازی مقایسه شود تا اعتبار آن تأیید گردد. به همین دلیل، ۱۵ مسئله آزمایشی با ابعاد ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گره‌ای تولید شده است (در هر بعد پنج مسئله). همچنین یک مورد مطالعه با استفاده از روش پیشنهادی حل شده و نتایج تحلیل خواهد شد.

### مقایسه‌های عددی

به منظور مقایسه عددی در مسائل تولید شده، ظرفیت وسیله نقلیه ۲۰۰۰ کیلوگرم و هزینه آن ۲۵ واحد پولی بر حسب روز در نظر گرفته شده است. مقدار تقاضا بین دو شهر نیز به صورت تصادفی در بازه [۲۰۰۰, ۳۰۰۰] کیلوگرم و هزینه تأسیس هاب به صورت تصادفی در بازه [۲۵۰, ۳۰۰] تولید شده است. به منظور جلوگیری از تأسیس یک مسیر با یک شهر و استفاده از صرفه‌جویی به مقیاس، هزینه تأسیس یک مسیر ۲۵ واحد پولی در نظر گرفته می‌شود.

در حل مسائل برای هر یک از زمان‌های بین هاب‌ها و مسیرها، محدودیتی مد نظر قرار می‌گیرد. بر اساس موقعیت واقعی، هاب‌ها بعد از جمع‌آوری‌های روزانه شهر خود و مسیرها، بسته‌ها را تفکیک کرده و در شیفت شب به یکدیگر ارسال می‌کنند. با توجه به سرعت وسایل نقلیه و محدودیت شیفت شب برای انتقال بارها بین هاب‌ها، حداکثر فاصله بین دو هاب ۵۱۰ کیلومتر و حداکثر فاصله در مسیرها ۱۵۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است.

مدل ارائه شده در نرم‌افزار گمز (حل‌کننده سیپلکس<sup>۱</sup>) و روش حل در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است؛ سپس به کمک رایانه چهار هسته‌ای با پردازشگر ۳/۱ گیگاهرتز و رم ۸ گیگ حل شدند. به منظور افزایش سرعت عملکرد حل‌کننده سیپلکس تا چهار برابر حد معمول، سیپلکس در حالت موازی<sup>۲</sup> اجرا شد تا از تمام چهار هسته CPU استفاده کند، اما در مقابل نرم‌افزار متلب به صورت عادی به اجرا درآمد. برای مسائل ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گره‌ای، به ترتیب ۳۶۰۰، ۷۲۰۰ و ۱۴۴۰۰ ثانیه حد زمانی در نظر گرفته شده است. الگوریتم سیپلکس به جز چهار مسئله ۱۰ گره‌ای و دو مسئله ۱۵ گره‌ای، نتوانست در زمان تخصیص داده شده برای مابقی مسائل جوابی منطقی ارائه کند. به همین دلیل فقط مسائل مربوط به ۱۰ و ۱۵ گره‌ای برای مقایسه در نظر گرفته شدند. در جدول ۱ مقدار تابع هدف (OFV) و زمان حل (CPU time) هر مسئله آزمایشی ارائه شده است. شایان ذکر است که در تمام جدول‌ها Nroute و Nhube به ترتیب به

1. CPLEX solver  
2. Parallel

معنای تعداد هاب و تعداد مسیر است. مقدار OFV در واحد پولی و CPU time به صورت ثانیه محاسبه می‌شود.

جدول ۱. مقایسه نتایج روش سیپلکس و روش حل ارائه شده در تمام مسائل ۱۰ گره‌ای

مسائل	روش حل			سیپلکس			مسائل	
	Time	NumR	NumH	OFV	Time	NumR		NumH
۱۰-۱	۶۰/۳	۸	۱	۲۸۳۲/۶	۲۹۴/۸	۸	۱	۲۸۳۲/۶
۱۰-۲	۶۰/۴	۶	۲	۱۸۲۸/۴	۳۶۰۰/۰	۶	۲	۱۷۹۶/۴
۱۰-۳	۶۱/۰	۵	۲	۸۶۱/۰	۱۸۷۹/۳	۵	۲	۸۶۱/۰
۱۰-۴	۶۰/۰	۶	۶	۱۶۵۳/۲	۱۰۲۹/۶	***	***	***
۱۰-۵	۶۰/۹	۶	۲	۲۶۰۰/۵	۷۸۹/۵	۶	۲	۲۶۰۰/۵
۱۵-۱	۲۰۷/۷	۹	۲	۲۴۴۷/۲	۷۲۰۰/۰	۹	۲	۲۴۴۷/۲
۱۵-۲	۲۱۶/۳	۶	۲	۱۸۶۳/۲	۲۴۸۶/۴	***	***	***
۱۵-۳	۲۱۴/۶	۸	۱	۹۰۶/۰	۲۳۰۶/۵	۸	۱	۹۰۶/۰
۱۵-۴	۲۲۰/۷	۷	۲	۴۹۲۸/۶	۷۲۰۰/۰	***	***	***
۱۵-۵	۲۵۷/۴	۷	۲	۶۸۵۵/۲	۷۲۰۰/۰	***	***	***

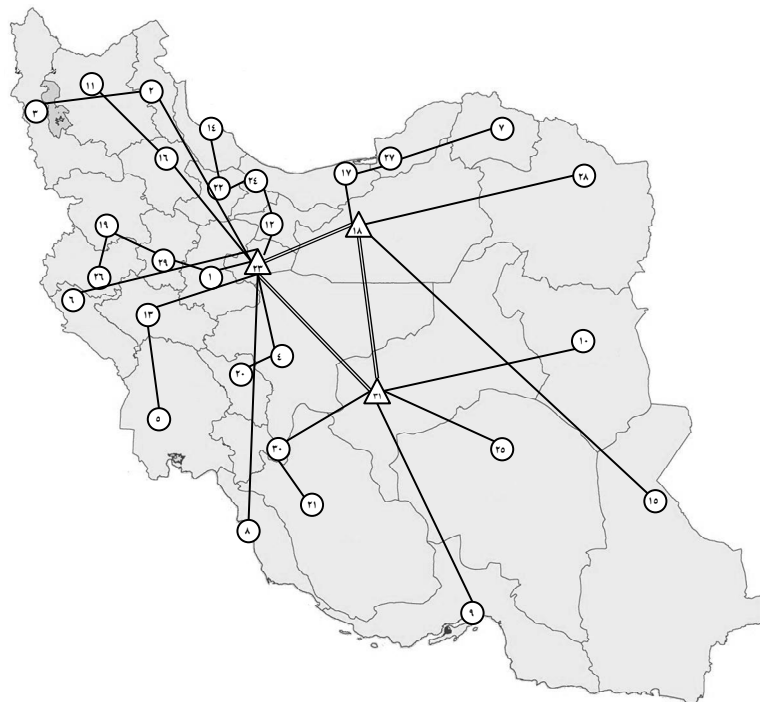
همان‌طور که بیان شد، به کمک سیپلکس در زمان مجاز برای شش مسئله از ۱۰ مسئله ۱۰ و ۱۵ گره‌ای جواب بهینه پیدا شد و برای چهار مسئله جوابی به دست نیامد. این در حالی است که روش حل ارائه شده برای تمام مسائل جوابی را در زمان بسیار کمتر پیدا کرد. در پنج مورد نتایج به خوبی جواب‌های سیپلکس بود، در یک مورد جواب بدتری به دست آمد و در چهار مورد جواب‌ها بهتر از جواب‌های سیپلکس بود. نتایج نشان می‌دهد اختلاف بین جواب‌های روش حل ارائه شده با رویکرد سیپلکس به‌طور میانگین کمتر از ۰/۱ درصد است، اما از لحاظ زمانی روش حل ارائه شده به‌طور میانگین ۲۳۲۹ درصد سریع‌تر به جواب نهایی می‌رسد.

### مورد مطالعه

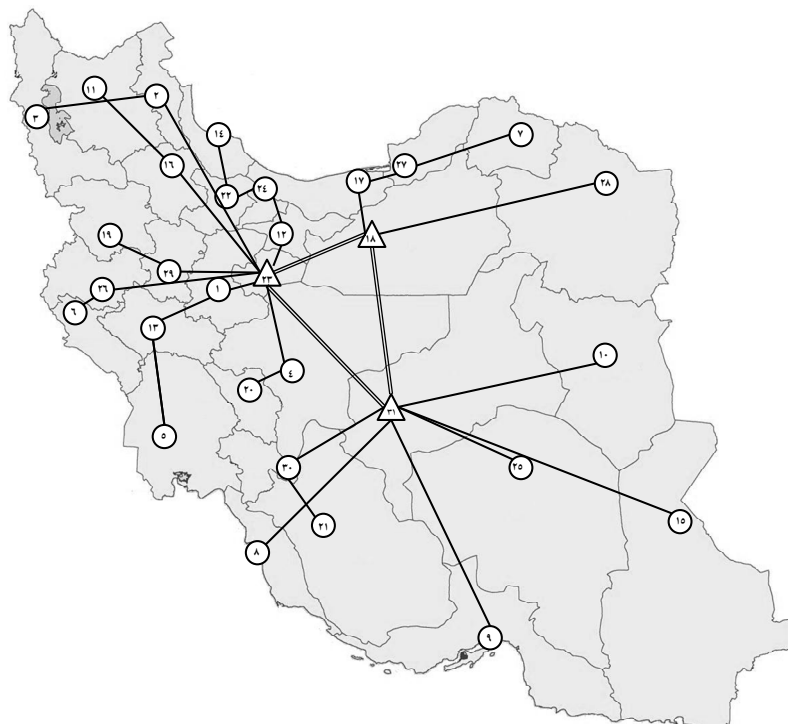
به منظور بررسی مدل و روش پیشنهاد شده که حالت خاصی از مسئله مکان‌یابی و مسیریابی هاب در محدوده نامتراکم و وسیع است، ایران با ۳۱ مرکز استان که در برخی نواحی به یکدیگر نزدیک و در نواحی دیگر بسیار دور و پراکنده‌اند، برای مورد مطالعه انتخاب شد. شایان ذکر است که فرضیه‌ها همانند بخش قبل در نظر گرفته شده است.

به منظور بررسی تأثیر مراحل مختلف روش حل پیشنهاد شده، نتایج روی نقشه ایران به صورت شماتیک و در قالب شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. شماره شهرها نیز در جدول ۲ درج شده است. شایان ذکر است که در شکل‌های ۴ و ۵، دایره‌ها نشان‌دهنده شهرهای غیرهاب و مثلث‌ها معرف هاب‌های انتخاب شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، در بهترین جواب خروجی، سه هاب انتخاب شد که شهرهای سمنان، قم و یزد را دربردارد.

در شکل ۴، جواب خروجی مرحله اول نشان داده شده است. توجه داشته باشید که این جواب لزوماً بهترین جواب نیست. برای مثال، زاهدان به هاب سمنان یا بوشهر به هاب قم اختصاص داده شده است، اما با اجرای مرحله دوم در شکل ۵، اغلب این مشکلات برطرف شده است. با توجه به محدودیت ۵۱۰ کیلومتری برای انتخاب هاب‌ها از یک‌طرف و محدودیت مسیرها از طرف دیگر، هاب‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که تا حد امکان در مرکز کشور واقع شوند، به طوری که دورترین شهر نیز با توجه به محدودیت مسیرهای بسط یافته، قادر به پوشش توسط هاب‌ها باشد.



شکل ۴. بهترین جواب خروجی مرحله اول از حل مسئله مورد مطالعه



شکل ۵. بهترین جواب خروجی مرحله دوم از حل مسئله مورد مطالعه

جدول ۲. نام و شماره شهرهای استفاده شده در مسئله مورد مطالعه

شماره	نام شهر	شماره	نام شهر	شماره	نام شهر	شماره	نام شهر
۱	اراک	۹	بندر عباس	۱۷	ساری	۲۵	کرمان
۲	اردبیل	۱۰	بیرجند	۱۸	سمنان	۲۶	کرمانشاه
۳	ارومیه	۱۱	تبریز	۱۹	سنندج	۲۷	گرگان
۴	اصفهان	۱۲	تهران	۲۰	شهرکرد	۲۸	مشهد
۵	اهواز	۱۳	خرم آباد	۲۱	شیراز	۲۹	همدان
۶	ایلام	۱۴	رشت	۲۲	قزوین	۳۰	یاسوج
۷	بجنورد	۱۵	زاهدان	۲۳	قم	۳۱	یزد
۸	بوشهر	۱۶	زنجان	۲۴	کرج		



### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله یک مسئله مکان‌یابی - مسیریابی هاب زمینی با شرایط خاص کشور ایران طرح شد؛ حالتی که در آن شهرها یا نقاط شبکه در محدوده نامتراکم و وسیع واقع شده‌اند. یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط به منظور نگاشت مسئله ارائه شد. با توجه به پیچیدگی محاسباتی حل بهینه مدل، یک روش حل دو مرحله‌ای، تلفیقی از الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید طراحی شد. به منظور بررسی اعتبار روش پیشنهاد شده با طراحی یکسری مسائل آزمایشی، نتایج عددی روش حل با یک روش بهینه‌یاب مقایسه گردید. نتایج در حل مسائل با ابعاد کوچک‌تر نشان داد روش پیشنهاد شده می‌تواند در زمانی به مراتب کمتر، نتایجی به خوبی روش بهینه‌یاب ارائه کند. در نهایت یک مورد واقعی از کشور ایران با ۳۱ مرکز استان به کمک روش حل پیشنهاد شده بررسی شد. نتایج نشان داد هر دو مرحله روش پیشنهاد شده، تأثیر مثبتی بر جواب خروجی دارند. همچنین با توجه به وسعت کشور، جواب نهایی به صورتی انتخاب می‌شود که از حداکثر فواصل تخصیص داده شده استفاده کند. در هر صورت، تلاش بر این است تا ترکیب تخصیص‌ها و مسیرها به گونه‌ای انتخاب شود که هزینه‌های کلی سیستم کمینه شود.

با توجه به جدید بودن مدل ارائه شده، این امکان فراهم است که با تغییراتی در مفروضات مسئله، مدل را به منظور هر چه واقعی‌تر کردن آن توسعه داد. در مسئله بررسی شده، هزینه حمل و نقل به صورت روزانه در نظر گرفته شده است، اما شاید بهتر باشد هزینه حمل و نقل با توجه به مسافت یا زمان حمل نیز سنجیده شود. از سوی دیگر، با در نظر گرفتن محدودیت فضای محل بارگیری و تخلیه، می‌توان جریمه‌ای نیز برای زودکرد یا دیرکرد وسایل نقلیه در نظر گرفت. یکی دیگر از موارد مهم، پوشش اجباری تمام شهرهاست. در عمل، شرکت‌ها قبل از پوشش یک شهر اطمینان حاصل می‌کنند که حمل بارهای مرتبط با آن اقتصادی باشد. بنابراین بهتر است با حذف محدودیت پوشش تمام شهرها، مسئله را در موقعیت کاربردی‌تری بررسی و مدل کرد. در نهایت، با توجه به نگاه کمابیش متفاوت این مقاله به مسئله مکان‌یابی - مسیریابی، پیشنهاد می‌شود رویکرد مطرح شده در سایر مسائل مشابه در کشور به کار گرفته شود.

### فهرست منابع

- رضوی، م، سوخکیان، م.ع، زیارتی، ک. (۱۳۹۰). ارائه الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر سیستم کلونی مورچگان برای مسئله مکان‌یابی مسیریابی با چندین انبار و فرض تخصیص چندین مسیر به هر وسیله نقلیه. مجله مدیریت صنعتی، ۳ (۶)، ۳۸-۱۷.

شاهین، م، جبل عاملی، م. س.، جبارزاده، آ. (۱۳۹۵). مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی چند روش حمل و نقلی و چند کالایی در فضای غیرقطعی. *مجله مدیریت صنعتی*، ۸ (۴)، ۶۲۵-۶۵۸.

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

Baker, B. M. & Ayechev, M. A. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 30(5), 787-800.

Campbell, A. M., Lowe, T. J. & Zhang, L. (2007). The p-hub center allocation problem. *European Journal of Operational Research*, 176(2), 819-835.

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

Campbell, J. F., & O'Kelly, M. E. (2012). Twenty-five years of hub location research. *Transportation Science*, 46(2), 153-169.

Černý, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of optimization theory and applications*, 45(1), 41-51.

Cunha, C. B. & Silva, M. R. (2007). A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 747-758.

Doulabi, S. H. H. & Seifi, A. (2013). Lower and upper bounds for location-arc routing problems with vehicle capacity constraints. *European Journal of Operational Research*, 224(1), 189-208.

Ernst, A.T. & Krishnamoorthy, M. (1996). Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem. *Location science*, 4(3), 139-154.

Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms. *Scientific american*, 267(1), 66-72.

Jarboui, B., Derbel, H., Hanafi, S. & Mladenović, N. (2013). Variable neighborhood search for location routing. *Computers & Operations Research*, 40(1), 47-57.

Karaoglan, I., Altıparmak, F., Kara, I. & Dengiz, B. (2012). The location-routing problem with simultaneous pickup and delivery: Formulations and a heuristic approach. *Omega*, 40(4), 465-477.

Krikpatrick, S., Gelatt Jr. C.D. & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220 (4598), 671-680.

Kuby, M. J. & Gray, R. G. (1993). The hub network design problem with stopovers and feeders: The case of Federal Express. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 27(1), 1-12.

- Laporte, G., (1988). *Location-routing problems*. In Golden, B.L., Assad, A.A. (eds) *Vehicle Routing: Methods, Studies*. North-Holland, Amsterdam.
- Lee, J. H. & Moon, I. (2014). A hybrid hub-and-spoke postal logistics network with realistic restrictions: A case study of Korea Post. *Expert systems with applications*, 41(11), 5509-5519.
- Lee, Y., Lim, B. H. & Park, J. S. (1996). A hub location problem in designing digital data service networks: Lagrangian relaxation approach. *Location Science*, 4(3), 185-194.
- Lopes, R. B., Ferreira, C., Santos, B. S. & Barreto, S. (2013). A taxonomical analysis, current methods and objectives on location-routing problems. *International Transactions in Operational Research*, 20(6), 795-822.
- Martín, J. C. & Román, C. (2003). Hub location in the South-Atlantic airline market: A spatial competition game. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(10), 865-888.
- Nagy, G. & Salhi, S. (1998). The many-to-many location-routing problem. *Top*, 6(2), 261-275.
- Nagy, G. & Salhi, S. (2007). Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 649-672.
- Norouzi, N., Sadegh-Amalnick, M. & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2016). Modified particle swarm optimization in a time-dependent vehicle routing problem: minimizing fuel consumption. *Optimization Letters*, 11(1), 121-134.
- O'Kelly, M. E. (1986). The location of interacting hub facilities. *Transportation science*, 20(2), 92-106.
- Razavi, M., Soukhakian, M. A. & Ziarati, K. (2011). A Meta Heuristic Algorithms Based on Ant Colony System For Solving Multi Depots Location-routing Problem with Multiple Using of Vehicle. *Industrial Management*, 3(6), 17-38. (in Persian)
- Rieck, J., Ehrenberg, C. & Zimmermann, J. (2014). Many-to-many location-routing with inter-hub transport and multi-commodity pickup-and-delivery. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 863-878.
- Salhi, S., & Rand, G. K. (1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European journal of operational research*, 39(2), 150-156.
- Sasaki, M., Campbell, J.F., Krishnamoorthy, M. & Ernst, A.T. (2014). A Stackelberg hub arc location model for a competitive environment. *Computers & Operations Research*, 47, 27-41.

- Sasaki, M., Suzuki, A. & Drezner, Z. (1999). On the selection of hub airports for an airline hub-and-spoke system. *Computers & Operations Research*, 26(14), 1411-1422.
- Shahin, M., Jabalameli, M. S., Jabbarzadeh, A. (2017). Multi-modal and multi-product hierarchical hub location under uncertainty. *Industrial Management*, 8(4), 625-658. (in Persian)
- Taylor, G. D., Harit, S., English, J. R. & Whicker, G. (1995). Hub and spoke networks in truckload trucking: Configuration, testing and operational concerns. *Logistics and Transportation Review*, 31(3), 209-237.
- Toh, R. S. & Higgins, R. G. (1985). The impact of hub and spoke network centralization and route monopoly on domestic airline profitability. *Transportation Journal*, 24(4), 16-27.
- Wasner, M. & Zäpfel, G. (2004). An integrated multi-depot hub-location vehicle routing model for network planning of parcel service. *International Journal of Production Economics*, 90(3), 403-419.
- Wolsey, L. A. (1998). *Integer programming*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- Yaman, H., Kara, B. Y., & Tansel, B. Ç. (2007). The latest arrival hub location problem for cargo delivery systems with stopovers. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(8), 906-919.