مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۱-۳۳، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۳-۱۲

Original Article

رویکردی جدید در مدل‌سازی و حل مسائل مکان‌یابی محور ـ مسیریابی و آزمایش آن روی سامانه‌ی پستی ایران

محمدعلی صنیعی‌منفرد* (دانشیار)
ستاره بهزادی پیشکناری (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا

ازجمله مسائل راهبردی ـ عملیاتی مطرح در بالاترین سطح شبکه‌های توزیعی کالا و خدمات، شناسایی مکان‌های محوری و تعیین مسیرهای حلقوی اتصال آنها به مراکز اقماری مربوطه است. در این مقاله رویکرد جدیدی در قالب یک فرایند حلقوی تکرارپذیر برای حل این نوع مسائل، که به‌عنوان مسائل مکان‌یابی محور ـ مسیریابی شناخته می‌شوند، توسعه داده می‌شود و سپس روی شبکه‌ی پستی ایران پیاده‌سازی و آزمایش می‌شود. در بخش مکان‌یابی محورها، علاوه بر هزینه از معیار قابلیت اطمینان استفاده می‌شود و در بخش مسیریابی ابتدا تعداد وسائل نقلیه به‌کمک الگوریتم کلارک ـ رایت تعیین و سپس با استفاده از رویکرد ادغامی جست‌وجوی همسایگی متغیر و شبیه‌سازی تبریدی بهبود داده می‌شود. حل به دست آمده خوب ولی البته نادقیق است. نتایج پیاده‌سازی این رویکرد با حل دقیق اعتبارسنجی می‌شود.

واژگان کلیدی: مکان‌یابی P محور مرکز، مسیریابی وسایل نقلیه، شبکه‌ی پستی، الگوریتم تکرارپذیر، شبیه‌سازی تبریدی، جست‌وجوی همسایگی متغیر.

mas_monfared@alzahra.ac.ir
setareh.behzadi@student.alzahra.ac.ir

۱. مقدمه

در سامانه‌ی خدمات پستی ایران مراکز اصلی و فرعی پست، همراه با دفاتر متعدد محلی و چندین شرکت خصوصی، در یک شبکه‌ی سراسری فعالیت می‌کنند. در این سامانه، بیشتر بسته‌های ارسالی (شامل نامه‌های معمولی، نامه‌های سفارشی، کارت پستال، بسته‌ها و...) به‌صورت نقطه به نقطه یا انتقالات مستقیم جابه‌جا می‌شوند. به همین علت، در زمان‌بندی فعالیت‌های بین خدمات پست مرکزی و شرکت‌های فرعی همیشه تعارضاتی ایجاد می‌شود که مولد تأخیر در ارسال بسته‌های پستی است.

با درک چنین وضعیتی، می‌خواهیم ضمن تجدید ساختار سامانه‌ی پستی ایران، آن را به یک سامانه‌ی دوسطحی تبدیل کنیم به‌طوری که دارای چندین محور در سطح اول و تعداد زیادی مراکز اقماری در سطح دوم باشد. در این‌صورت، محورها (یا هاب‌ها) جایگزین مراکز اصلی فعلی پستی (البته با تعداد بسیار کم‌تر) خواهند گردید. همچنین به‌منظور کاهش تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز در جابه‌جایی از هر محور با اقمارش به جای اجرای حمل و نقل مستقیم یا خطی، از مسیرهای حلقوی استفاده می‌کنیم. بدین‌ترتیب، مسئله‌ی توزیع بسته‌های پستی به یک مسئله‌ی مکان‌یابی محورها و یک مسئله‌ی شناسایی مسیرهای حلقوی (یا تورها) تبدیل می‌شود که به آن مسئله‌ی مکان‌یابی محور ـ مسیریابی گفته می‌شود. در این چارچوب، تعدادی از مراکز پستی استانی فعلی به‌دلیل جمعیت یا امکانات بیشتری که دارند محورهای سامانه‌ی توزیعی پست ایران خواهند شد. در این مسئله‌ی مکان‌یابی محورها در واقع همه مراکز استانی کاندیدا هستند و به‌صورت بالقوه می‌توانند محور شوند.

پژوهش‌های مختلفی در سامانه‌های توزیع پستی دنیا با رویکردی مشابه صورت گرفته است و طبقه‌بندی‌های مختلفی برای ادبیات مسائل مکان‌یابی ـ مسیریابی وجود دارد.[۱-۳] ازجمله مین و همکارانش[۴] با بررسی این مسائل، پژوهش‌های انجام‌گرفته را براساس دو رویکرد طبقه‌بندی کردند: ۱. پژوهش‌های با رویکرد مدل‌سازی؛ ۲. پژوهش‌های با رویکرد حل. در رویکرد مدل‌سازی سطوح سلسله‌مراتبی سامانه‌ی توزیع، ماهیت عرضه/تقاضا، تعداد تسهیلات/وسایل نقلیه، ظرفیت تسهیلات/وسایل نقلیه، افق برنامه‌ریزی و معیارها یا اهداف مختلف مورد ملاحظه قرار می‌گیرد. اما در رویکرد حل، توسعه‌ی الگوریتم‌های دقیق، ابتکاری و فرابتکاری مورد توجه قرار می‌گیرند. کوپر[۵] ترکیب یک مسئله‌ی حمل و نقل و یک مسئله‌ی مکان‌یابی را برای اولین بار مطالعه کرد که بعدها به اسم مدل مکان‌یابی ـ مسیریابی نام‌گذاری شد. در یک مسئله‌ی P محور مرکز، مکان P محور در شبکه مشخص، و گره‌ها یا مکان‌های غیر محور به گره‌های محور با هدف کمینه‌کردن بیشینه زمان سفر یا فاصله یا هزینه‌ی بین هر جفت گره مشخص می‌شود.

کوپر در مقاله‌ی دیگری روش حل ابتکاری را برای مدلش پیشنهاد کرد.[۶] با

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۴/۶/۲۳، پذیرش ۱۳۹۴/۶/۲۸.

این حساب و مطابق با طبقه‌بندی ما، کوپر در مقاله‌ی اولش رویکرد مدل‌سازی و در مقاله‌ی دوم خود رویکرد حل داشت. ژاکوبسن و مادسن[۷] توزیع روزنامه‌ها در دانمارک را به‌صورت یک مسئله‌ی مسیریابی ـ مکان‌یابی مدل کردند. سپس سه روش ابتکاری برای حل آن یعنی تعیین مکان‌ها و مسیرها توسعه دادند. ستینر در تزکارشناسی ارشد خود[۸] سامانه‌ی پستی ترکیه را به‌صورت یک مدل چندهدفه‌ی مکان‌یابی P محور میانه ـ مسیریابی مدل‌سازی کرد و از یک الگوریتم تکرارپذیر برای حل آن بهره برد. حل مسائل P محور میانه در یک شبکه، در واقع تعیین کردن مکان‌های P محوری است که کمینه‌ساز جریان مبادلات بین گره‌ها به‌صورت فواصل طی شده، هزینه‌های حمل‌ونقل یا زمان باشد. کوپر و ژاکوبسن[۶و۷] (هر دو) رویکرد مدل‌سازی و حل را با هم به کار گرفتند. کیم و اوکلی[۹] برای اولین بار مسئله‌ی مکان‌یابی P محور با معیار قابلیت اطمینان را اجرا کردند تا دست‌کم اطمینان بین گره‌های محور و غیرمحور را در شبکه بیشینه کنند. اسنیدر و داسکین[۱۰و۱۱] علاوه بر دو معیار مرسوم کمینه‌سازی زمان و هزینه، از معیار قابلیت اطمینان هم بهره گرفتند. داوری و همکارانش[۱۲] نیز مکان‌یابی P محور میانه را، وقتی قابلیت اطمینان هر کمان به‌صورت یک متغیر فازی در نظر گرفته شود، مدل کرده و به کمک شبیه‌سازی تبریدی حل کردند. آلومور و کارا[۱۹] و حسنی و همکاران[۲۰] نیز قابلیت اطمینان را برای مسائل P مرکز مطرح کردند.

در این چارچوب، ما می‌خواهیم در این مقاله رویکرد جدیدی را برای مدل‌سازی و حل مسائل مکان‌یابی ـ مسیریابی پیشنهاد و سپس آن را روی شبکه‌ی پستی ایران آزمایش کنیم. رویکرد ما مبتنی بر مطالعات ستینر[۸] (تکرارپذیری روی دو مرحله‌ی مکان‌یابی و مسیریابی) و حسنی و همکاران[۱۴] (روش معرفی معیار قابلیت اطمینان) است. با این حال، تفاوت کار ما با ستینر در این است که به جای مدل P محور میانه، از مدل P محور مرکز استفاده می‌کنیم تا امکان ورود معیار قابلیت اطمینان را داشته باشیم؛ زیرا به‌کارگیری معیار قابلیت اطمینان با مسائل P محور میانه‌ی ستینر سازگار نبود. همچنین، ما در رویکرد جدید خود از روش حل تکرارپذیر ستینر استفاده می‌کنیم، اما الگوریتمی که به‌کار می‌گیریم روش جست‌وجوی همسایگی متغیر (مشابه کار حسنی و همکاران[۱۴]) توأم با روش فراابتکاری شبیه‌سازی تبریدی است. به‌طور کلی، به‌علت پیچیدگی ترکیب مسائل مرسوم مکان‌یابی محور ـ مسیریابی، بیشتر روش‌های دقیق توانایی حل مسائل بزرگ‌مقیاس را ندارند. به‌همین دلیل محققین از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌کنند.[۱۳-۱۸] ما در مدل‌کردن شبکه‌ی پستی ایران در بالاترین سطح ـــ که فقط مراکز استانی را شامل می‌شود ـــ می‌توانیم از مدل‌های دقیق استفاده کنیم و این کار را انجام داده و نتایج مقایسه‌یی آن را هم گزارش کرده‌ایم، اما رویکرد جدید خود را با استفاده از روش‌های ابتکاری ـ فراابتکاری توسعه داده‌ایم که با طبیعت مسائل مکان‌یابی ـ مسیریابی سازگار باشد و مثلاً اجرای آن در سطح پایین‌تر شبکه‌ی پستی ایران ممکن شود.

ما در این مقاله برای اولین بار از سه معیار قابلیت اطمینان، هزینه (یا طول سفر) و تعداد وسائل نقلیه در مدل‌سازی، و نیز از تکرارپذیری در کنار روش‌های ابتکاری ـ فراابتکاری در حل خود استفاده کرده‌ایم. سپس، برای اولین بار با استفاده از این رویکرد به طراحی مجدد شبکه‌ی پستی ایران پرداختیم. بدین‌ترتیب، نوآوری ما در این مقاله هم در ساختار ریاضی مدل و هم در روش حل آن است که در بخش‌های دیگر این نوشتار تشریح خواهد شد.

در بخش دوم این مقاله، ساختار ریاضی مدل را ارائه می‌کنیم و تفاوت‌های آن را با کارهای مشابه نشان می‌دهیم. بخش سوم اختصاص دارد به طرح رویکرد جدید حل، که دو مرحله‌یی (مکان‌یابی، مسیریابی) و تکرارپذیر است. در بخش چهارم، نتایج اجرای رویکرد جدید مدل‌سازی و حل را روی طراحی مجدد شبکه‌ی پستی ایران در بالاترین سطح آن که سطح مراکز استانی باشد ارائه می‌کنیم و با مقایسه‌ی این نتایج با نتایج حاصل از حل دقیق عملکرد رویکرد جدید نشان داده خواهد شد. در بخش پنجم به نتیجه‌گیری و معرفی راهبردهای پژوهش‌های جدید می‌پردازیم.

۲. مدل‌سازی: رویکرد جدیدی برای مکان‌یابی ـ مسیریابی سامانه‌ی پستی ایران

در ابتدا برای معرفی مدل جدید لازم است فرضیات مورد نظر و متغیرهای تصمیم‌گیری را معرفی کنیم. به‌دلیل وجود ده‌ها خط ارتباطی بین شهرهای مختلف استفاده از یک روش زمان‌بندی برای جابه‌جایی بسته‌های پستی پیچیده خواهد بود. به‌ویژه این که شرکت‌های فرعی پستی با چنین زمان‌بندی معینی مخالف‌اند. همین امر موجب طولانی شدن زمان تحویل بسته‌ها می‌شود. شرکت‌های فرعی شامل شرکت‌های باربری یا مسافربری هستند؛ شرکت‌های باربری ترجیح می‌دهند بسته‌ها را زمانی که به حجم قابل قبولی رسید ارسال کنند و شرکت‌های مسافربری نیز ترجیح می‌دهند پس از تکمیل ظرفیت مسافران سفرها انجام شود که این ملاحظات زمان‌بندی معین را با نوسان و تأخیر مواجه می‌سازد. به‌همین خاطر، ما سامانه‌ی پستی ایران را در دو سطح بالا و پایین مدل می‌کنیم.

مشکلات زمان‌بندی مطرح شده در بالا مربوط به سطح پایین سامانه است. در حالی که ما در مسئله‌ی مورد نظر خود فرض کرده‌ایم که تعدادی از مراکز استان‌ها نقش محور و بقیه نقش اقمار را دارند. همه‌ی مراکز استان‌ها نقاطِ تقاضای شبکه‌ی پستی ما هستند، اما آنچه در داخل یک شهر یا درون یک استان اتفاق می‌افتد به سطح دوم سامانه‌ی پستی مربوط می‌شود بدین معنا که ارسال‌هایی را که در هریک از شهرها (از دفتر پستی تا آدرس نوشته شده بر پاکت) یا استان‌ها (از دفتر مراکز استان تا شهر مورد نظر) انجام می‌شود بررسی نمی‌کنیم بلکه می‌خواهیم با مدیریت ارسال‌ها در سطحی بالاتر نقاط متمرکزی برای ارسال‌ها در سطوح استانی پیدا کنیم و به کم‌تر شدن زمان و هزینه، و بیشتر شدن قابلیت اطمینان ارسال‌ها کمک کنیم. در واقع مدیریت ارسال‌های داخل شهرها و استان‌ها توسط خود شهرها و مراکز استان‌ها انجام خواهد شد. همچنین، آنچه را که ما «بسته‌های پستی» می‌نامیم شامل همه‌ی نامه‌های معمولی، نامه‌های سفارشی، کارت پستال، بسته‌ها و... است و نیز جریان ارسال‌های بین‌المللی نادیده گرفته می‌شود. خدمات پستی اضطراری که نیازمند ارسال در زمان دقیقی است نیز از محدوده‌ی تحقیق حذف می‌شود.

یک جریان متقابل تقاضای پستی بین هر جفت گره در شبکه وجود دارد که ما این‌ها را در قالب یک جریان دو به دوی رفت و برگشتی در نظر می‌گیریم. با توجه به این که ارسال بسته‌های پستی در حال حاضر به‌صورت خط مستقیم یا نقطه به نقطه توسط وسایل نقلیه از یک شهر تا شهر دیگر انجام می‌پذیرد، تعداد وسایل نقلیه‌ی مورد نیاز بسیار زیاد خواهد شد. ما مسیرهای حلقوی (یا تور) بین هر محور و اقمارش را در نظر می‌گیریم تا تعداد وسایل نقلیه را کمینه کنیم و شناسایی این مسیرها همان مسئله‌ی مسیریابی ما را مطرح می‌کند. در این شرایط در هر دوره یک وسیله‌ی نقلیه از هر شهر محوری به هریک از شهرهای اقماریش گسیل می‌شود و در این آمد و شد بسته‌ی پستی ایشان را نیز جمع می‌کند.

بنابراین مسئله‌ی مورد نظر ما شامل دو تصمیم‌گیری اساسی خواهد بود: یکی مکان‌یابی‌های محوری و دومی تخصیص مسیرها به هر محور که این کار به‌معنای تعیین تعداد وسایل نقلیه در هر مسیر خواهد بود. در این صورت، در سطح بالای شبکه‌ی ما تخصیص‌های تکی می‌تواند زمان تحویل و ارسال را برای محورها کمینه

کند به‌طوری که بسته‌ها در کم‌ترین زمان بین محورها جابه‌جا شوند. از طرف دیگر، به‌خاطر این که طول مسیرهای حلقوی ما معین و ثابت است امکان دادن وعده برای زمان تحویل یا زمان‌بندی بهتر جدی‌تر می‌شود. چرا که با هر فاصله و در نظرگرفتن مثلاً سرعت ۸۰ یا ۹۰ کیلومتر در ساعت می‌توانیم درمورد زمان ارسال پیش‌بینی داشته باشیم. درواقع ما در محدویت‌های مدل ریاضی خود، زمان تحویل را در قالب فاصله وارد می‌کنیم تا موجب شناسایی تورهای ثابت یا همان مسیرهای حلقوی شود. پوشش مسیرها در مدل ما در جهت عقربه‌های ساعت است تا محاسبه‌ی فواصل بین شهرها بعد از مسیریابی ممکن شود. همچنین، در مدل P محور مرکز ما مقدار قابلیت اطمینان براساس دو فاکتور حجم بسته‌های ارسالی بین دو شهر i و j، (W_{ij}) و فاصله‌ی بین جفت شهرهای i و j تعیین می‌شود. اینک به تشریح مدل ریاضی مورد نظر می‌پردازیم.

۱.۲. مدل ریاضی

چنان که پیش‌تر مطرح کردیم، مدل ریاضی جدید ما ساختاری سه‌هدفه دارد که با بهره‌گیری از مدل ستینر[۸] و مدل حسنی و همکارانش[۱۴] ساخته شده است. ما برای شناسایی دقیق تأثیر هریک، از نماد Θ برای ستینر و نماد O برای حسنی و همکارانش استفاده کرده‌ایم:

$$\text{Max} \quad Z \qquad O \qquad (۱)$$

$$\text{Min} \quad \sum_{k=۱}^{N} A_{kk}\Big[\sum_{i=۱}^{N}\sum_{j=۱}^{N} d_{ij}A_{ik}A_{jk}V_{ijk}\Big] \qquad \Theta \qquad (۲)$$

$$\text{Max} \quad \sum_{k=۱}^{N} m_k A_{kk} \qquad \Theta \qquad (۳)$$

Subject to :

$$Z \le X_{ijkl}(R_{ik}R_{kl}^{-\alpha}R_{lj}) + (۱ - X_{ijkl}) \times M$$
$$i,j,k,l = ۱,۲,...,N \qquad O \qquad (۴)$$

$$A_{ik} \le A_{kk} \qquad i,k = ۱,۲,...,N \qquad O \qquad (۵)$$

$$\sum_{k=۱}^{N} A_{ik} = ۱ \qquad i = ۱,۲,...,N \qquad O \qquad (۶)$$

$$\sum_{k=۱}^{N} A_{kk} = P \qquad O \qquad (۷)$$

$$\sum_{l=۱}^{N} X_{ijkl} = A_{ik} \qquad i,j,k = ۱,۲,...,N \qquad O \qquad (۸)$$

$$\sum_{k=۱}^{N} X_{ijkl} = A_{lj} \qquad i,j,l = ۱,۲,...,N \qquad O \qquad (۹)$$

$$X_{ijkl} \le A_{ik} \qquad i,j,k,l = ۱,۲,...,N \qquad \Theta \qquad (۱۰)$$

$$X_{ijkl} \le A_{jl} \qquad i,j,k,l = ۱,۲,...,N \qquad \Theta \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{i=۱}^{N} A_{ik}A_{jk}V_{ijk} = A_{kk} \qquad j,k = ۱,۲,...,N \qquad \Theta \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{j=۱}^{N} A_{ik}A_{jk}V_{ijk} = A_{kk} \qquad i,k = ۱,۲,...,N \qquad \Theta \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{i=۱}^{N} A_{ik}V_{ikk} = m_k A_{kk} \qquad k = ۱,۲,...,N \qquad \Theta \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{j=۱}^{N} A_{jk}V_{kjk} = m_k A_{kk} \qquad k = ۱,۲,...,N \qquad \Theta \qquad (۱۵)$$

$$A_{kk}(u_{ik} - u_{jk} + d_{ij}A_{ik}A_{jk}V_{ijk} - (T)(۱ - A_{ik}A_{jk}V_{ijk})) \le ۰$$
$$\text{For} \quad k = ۱,۲,...,N \quad i,j \in \{۱,۲,...,N\}\backslash\{k\}$$
$$\text{and} \quad i \ne j \qquad \Theta \qquad (۱۶)$$

$$(u_{ik} + \sum_{j=۱}^{N} d_{ij}A_{ik}A_{jk}V_{ijk}) \le T \qquad k = ۱,۲,...,N$$
$$i \in \{۱,۲,...,N\}\backslash\{k\} \qquad \Theta \qquad (۱۷)$$

$$A_{kk}(d_{ki}A_{ik}V_{kik} + u_{kk}) \le u_{ik} \qquad k = ۱,۲,...,N$$
$$i \in \{۱,۲,...,N\}\backslash\{k\} \qquad \Theta \qquad (۱۸)$$

$$u_{kk} = ۰ \qquad k = ۱,۲,...,N \qquad (۱۹)$$

$$V_{kkk} = ۰ \qquad k = ۱,۲,...,N \qquad (۲۰)$$

$$X_{i,j,k,l} \in \{۰,۱\} \qquad i,j,k,l = ۱,۲,...,N \qquad (۲۱)$$

$$V_{i,j,k} \in \{۰,۱\} \qquad i,j,k = ۱,۲,...,N \qquad (۲۲)$$

$$A_{i,k} \in \{۰,۱\} \qquad i,k = ۱,۲,...,N \qquad (۲۳)$$

$$u_{i,k} \ge ۰ \qquad i,k = ۱,۲,...,N \qquad (۲۴)$$

$$m_k \in Z^{+} \qquad k = ۱,۲,...,N \qquad (۲۵)$$

در این مدل سه‌هدفه، محدودیت ۱ تابع هدف اول ما را نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان بین گره‌های محوری و گره‌های غیر محوری تخصیص داده شده به آن را بیشینه می‌کند. رابطه‌ی ۲ هدف دوم را نشان می‌دهد و بیان‌گر کل طول مسیر حرکتی وسایل نقلیه (و در واقع زمان ارسال) است که کمینه می‌شود. رابطه‌ی ۳ هدف سوم ما را نشان می‌دهد که بیان‌گر تعداد کل وسایل نقلیه‌یی است که برای ارائه‌ی خدمت به یک محورخاص مورد نیاز است و باید کمینه شود.

یادآور می‌شود که در این مدل N تعداد کل شهرهایی است که مرکز استانی‌اند، P تعداد مراکز استانی محورشده، d_{ij} فاصله‌ی بین شهر i و شهر j، W_{ij} تعداد کل بسته‌های ارسالی (تقاضا) از شهر i به شهر j، T حداکثر طول مسیری که یک وسیله‌ی نقلیه می‌تواند طی کند، α ضریب کاهشی برای هزینه‌های حمل و نقل محور به k محور، R_{ik} میزان قابلیت اطمینان بین گره محور k و گره i تخصیص داده شده به آن، و M یک عدد بزرگ است.

همچنین، در مدل بالا متغیرهای تصمیم‌گیری عبارت‌اند از X_{ijkl} نماینده‌ی بخشی از جریانی که از شهر i به شهر j از طریق محور k و محور l حمل می‌شود؛ H_k متغیر صفر و ۱، بدین‌صورت که اگر یک محور در شهر k قرار داده شود ۱ و در غیر این صورت صفر خواهد شد؛ V_{ijk} نشان می‌دهد که اگر یک وسیله‌ی نقلیه مربوط به محور k از شهر i به شهر j برود مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر خواهد شد؛ A_{ik} نشان می‌دهد که اگر شهر غیر محوری i به شهر محوری k تخصیص یابد ۱ و در غیر این صورت صفر خواهد شد، m_k عبارت است از تعداد وسایل نقلیه‌یی که برای محور k فعالیت می‌کند، u_{ik} متغیری کمکی است برای مدیریت طول مسیر وسیله‌ی نقلیه که از شهر i و از طریق محور k عبور می‌کند و درواقع همانند برچسبی است که در هر نقطه، مسافت طی شده تا آن نقطه را نشان می‌دهد.

علاوه بر سه تابع هدف ۱ تا ۳، رابطه‌های ۴ به بعد محدودیت‌های مدل ریاضی پیشنهادی را نشان می‌دهند. محدودیت ۴ حداقل قابلیت اطمینان هر جریان بین جفت شهر محوری و شهر غیرمحوری را تضمین می‌کند. محدودیت ۵ تضمین می‌کند که فقط یک تخصیص از طریق یک گره محوری امکان‌پذیر است. محدودیت ۶ تضمین می‌کند که هر گره فقط به یک گره محور اختصاص داده می‌شود. محدودیت ۷ بیان می‌کند که فقط تعداد P محور می‌توانیم داشته باشیم. محدودیت ۸ و ۹ تضمین می‌کنند که جریان $i-j$ از طریق محورهای k و l صورت نمی‌پذیرد مگر این که از مبدأ i به محور k و به مقصد j از طریق محور l وصل شود. محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهند که تنها زمانی جریان بین شهرها به‌واسطه‌ی محورها برقرار می‌شود که این شهرها به محورهای مربوطه تخصیص داده شده باشند. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳ به‌منظور جلوگیری از اختصاص چندباره‌ی یک وسیله‌ی نقلیه مشخص به یک شهر به‌کار گرفته شده است. محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ تعداد وسایل نقلیه برای هر محور را تعیین می‌کند. محدودیت‌های ۱۶ تا ۱۸ محدودیت‌های مربوط به حذف زیر دور در مسئله‌ی مسیریابی است که محدودیت طول مسیر طی شده توسط هر وسیله‌ی نقلیه را نیز در نظر می‌گیرند. محدودیت‌های ۱۹ تا ۲۵ محدودیت‌های ساختاری مسئله‌اند و نشان‌گر نوع و مقدار هریک از متغیرهایند.

به وضوح مشخص است که مدل ریاضی توسعه‌یافته‌ی پیشنهادی یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی درجه دو (کوادراتیک) است که می‌توان آن را به یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح تبدیل کرد. اما هنوز چنین مسئله‌ی مکان‌یابی P محور میانه و مسیریابی یک مسئله‌ی NP-Hard است[۸] و به‌همین خاطر معمولاً نمی‌توان از الگوریتم‌های دقیق برای حل آنها استفاده کرد. لذا رویکرد حلی که ما ارائه می‌کنیم رویکرد ادغامی جست‌وجوی همسایگی متغیر و شبیه‌سازی تبریدی (VNS-SA) به‌صورت تکرارپذیر است که البته یک حل نادقیق خواهد بود. ما به‌خاطر نشان‌دادن عمومیت رویکرد جدید خود این روش حل فراابتکاری را به‌کار گرفته‌ایم، اگرچه به‌خاطر این که شبکه‌ی پستی ایران را در بالاترین سطح آن مدل می‌کنیم امکان حل دقیقش را داریم و نتایجش را هم گزارش می‌کنیم.

۳. رویکرد حل: الگوریتم VNS-SA تکرارپذیر

در این بخش، الگوریتم حل پیشنهادی خود را برای مدل ریاضی مطرح شده با فرض این که چنین مسئله‌یی معمولاً بزرگ‌مقیاس است ارائه می‌کنیم. نشان خواهیم داد که ایده‌ی تکرارپذیر بودن این الگوریتم[۸] نتایج خوبی تولید می‌کند. تکرارپذیری را روی الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر (VNS) و الگوریتم شبیه‌سازی تبریدی (SA) اجرا می‌کنیم. علت انتخاب الگوریتم VNS، ایده‌ی اصلی موجود در آن ــ ایجاد امکان تغییر ساختار محورها و متنوع ساختن جواب‌ها ــ است. در واقع، ساختارهای مختلف را حتی با کوچک‌ترین تغییری مورد ملاحظه قرار می‌دهد و در نهایت با حل دقیق با سرعت بالاتری به جواب می‌رسد.

همچنین به‌دلیل ظرفیت جست‌وجوی گسترده‌یی که الگوریتم SA دارد تصمیم گرفتیم از آن برای بخش مسیریابی حلقه‌ها استفاده کنیم. ستینر از هیچ یک از دو الگوریتم VNS و SA استفاده نمی‌کند، چرا که در مدل او مکان‌یابی و مسیریابی با روش‌های دقیق حل می‌شوند. ما هم برای بررسی سطح بالای شبکه‌ی پستی ایران امکان به دست آوردن حل دقیق را داریم، اما چون معمولاً مسائل مکان‌یابی ـ مسیریابی NP-hard هستند، با به‌کارگیری روش‌های فراابتکاری بالا عمومی بودن رویکرد جدید خود را دنبال کردیم. تفاوت دیگر ما با ستینر استفاده از ماتریس قابلیت اطمینان به جای ماتریس تکرار، به‌منظور عملی کردن شناسایی مکان‌های محوری مطمئن است.

تفاوت بین رویکرد پیشنهادی ما با دیگر رویکردها[۱۴] در این است که آن‌ها فقط به بخش مکان‌یابی پرداخته‌اند، از الگوریتم VNS استفاده کرده‌اند ولی تکرارپذیر نیستند. اما در مطالعه‌ی حاضر ما از VNS برای مکان‌یابی همراه با مسیریابی با SA در یک ساختار تکرارپذیر استفاده کرده‌ایم. بدین‌ترتیب گام اول در رویکرد ما شناسایی شهرهای محوری، و تخصیص شهرهای اقماری به این شهرهاست. درگام دوم مسیریابی می‌کنیم که خود شامل دو مرحله است: تخمین تعداد اولیه‌ی تعداد وسایل نقلیه با استفاده از الگوریتم کلارک ـ رایت،[۲۱] و به‌کارگیری مدل VRP برای بهینه‌سازی تعداد وسایل نقلیه. در این صورت، اجرای فرایند تکرارپذیری نیز با به‌روزرسانی فواصل صورت می‌گیرد (شکل ۱).

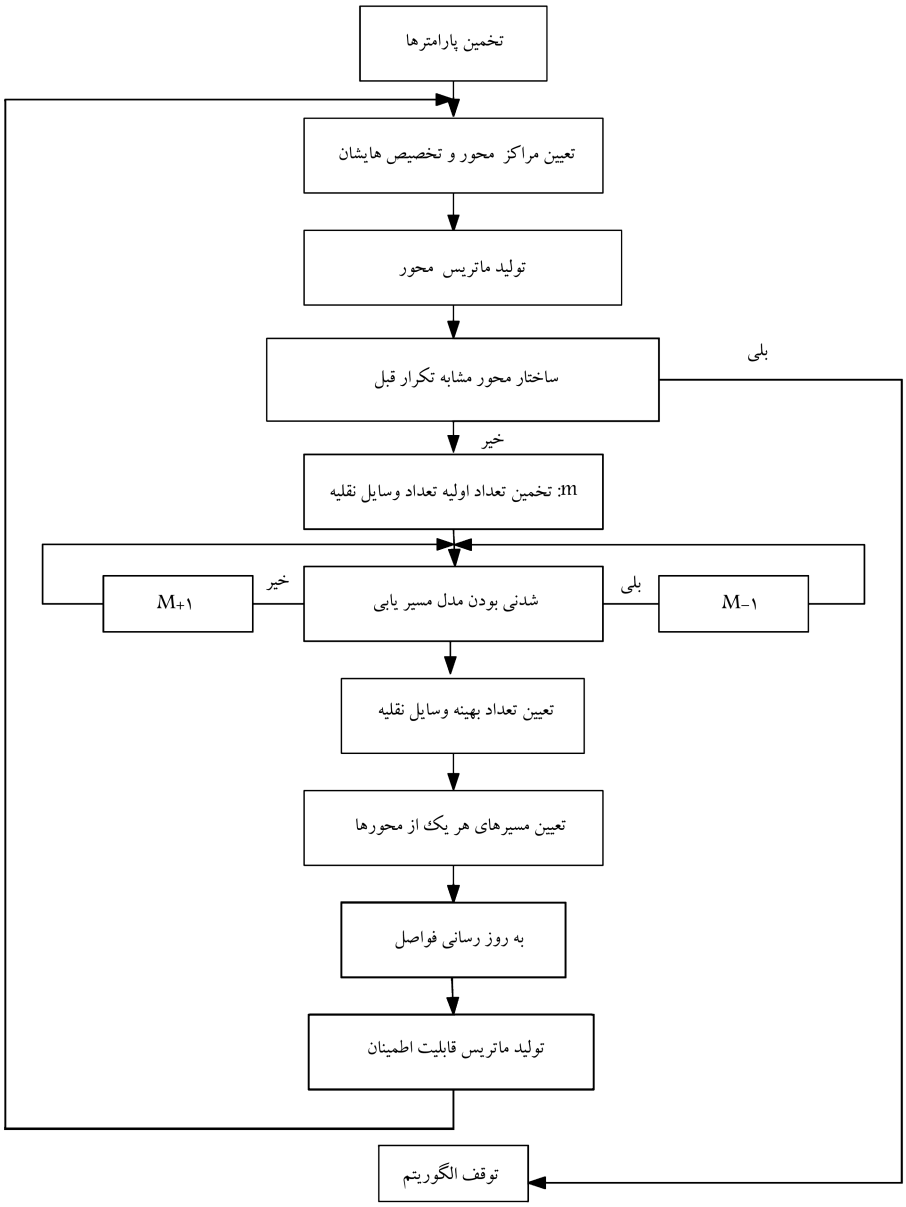
۱.۳. مکان‌یابی: شناسایی محورها و تعیین تخصیص‌های اقماری

در این مرحله ابتدا پارامترهای مهم مسئله مانند میزان جریان ارسالی، قابلیت اطمینان و تعداد محورها تخمین زده می‌شود و سپس مکان‌های بهینه‌ی محورها همراه با تخصیص شهرهای اقماری یا غیرمحور مشخص می‌شود. در ادامه، مسیرهای مربوط به هر جفت مبدأ و مقصد نیز تعیین می‌شود. این مسیرها شامل سفرهای مستقیم از شهر مبدأ به محور اولیه است که شهر مبدأ به آن تخصیص یافته، و سپس از محور اولیه به محور ثانویه که شهر مقصد به آن تخصیص یافته، و نهایتاً از محور ثانویه به شهر مقصد جریان می‌یابد. به این نوع تخصیص مستقیم، تخصیص ستاره‌یی می‌گوییم. یعنی فرضاً دو محور ۱ و ۲ داریم و آنگاه شهرهای ۳ و ۴ به محور ۱ و شهرهای ۵ و ۶ به محور ۲ تعلق می‌گیرد. آنگاه برای انتقال یک بسته از شهر ۳ به شهر ۶ باید ابتدا بسته از شهر ۳ (مبدأ) به محور اولیه‌ی ۱ و از محور اولیه‌ی ۱ به محور ثانویه‌ی ۲ و سپس از محور ثانویه‌ی ۲ به شهر مقصد ۶ برود.

در هر صورت، لازم است بیشینه فاصله‌ی پوششی را ــ یعنی بیشترین مسافتی که یک وسیله‌ی نقلیه در یک ارسال می‌تواند طی کند ــ محاسبه کنیم. برای این منظور (محاسبه‌ی بیشینه فاصله‌ی پوششی) از روش داسکین[۲۲] استفاده می‌کنیم.

۲.۳. مسیریابی: الگوریتم کلارک ـ رایت و VRP به کمک الگوریتم SA

پس از این که ما مرحله مکان‌یابی محورها را به انجام رساندیم و P محور را شناسایی کردیم آنگاه مسئله‌ی ما در واقع به P زیرمسئله در ارتباط با P شهر محوری تقسیم می‌شود. هرکدام از این P محور تخصیص‌های اقماری خود را دارند. هر زیرمسئله، با استفاده از الگوریتم کلارک ـ رایت[۲۱] و مدل VRP به‌کمک SA حل می‌شود. با انجام این کار تعداد وسایل نقلیه برای هر محور و همچنین مسیرهای مناسب وسایل نقلیه تعیین می‌شود. از این رو مسیرهای حلقوی را می‌توان جایگزین مسیرهای مستقیمی کرد که قبلاً استفاده می‌شدند و بدین‌ترتیب صرفه‌جویی قابل توجهی را در زمان و هزینه می‌توان به دست آورد. در شکل ۲ تفاوت بین روش حمل مستقیم و حلقوی نشان داده شده است. ما برای مسیریابی از الگوریتم شبیه‌سازی تبریدی یا SA استفاده می‌کنیم. این الگوریتم ساده است، همگرایی سریعی دارد و جواب‌های خوبی را تولید می‌کند.



شکل ۱. رویکرد مکان‌یابی ـ مسیریابی جدید تکرارپذیر.

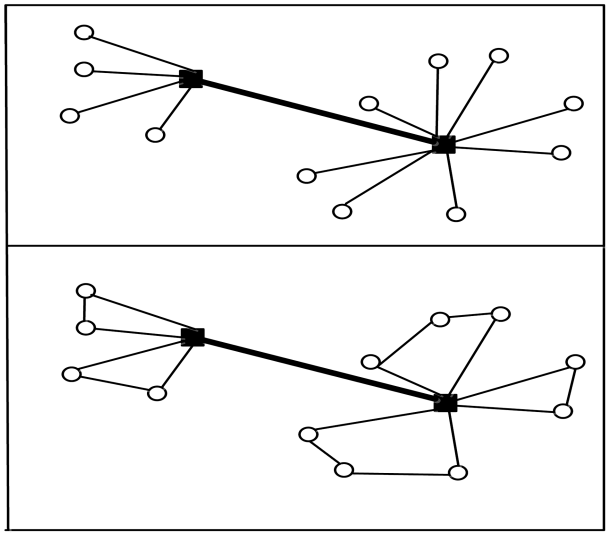
۳.۳. تکرارپذیری فرایند حل

در ادامه لازم است بهینه‌بودن جواب‌های به دست آمده از دو مرحله‌ی مکان‌یابی و مسیریابی را بررسی کنیم. در صورتی که الگوریتم حل ما بهینه باشد معلوم است که جواب‌های مرحله‌یی ما هم بهینه خواهد بود. اما حتی در چنین صورتی هم نمی‌توان نسبت به بهینگی کل اظهار نظر کرد چرا که بهینه‌سازی ما همزمان نیست بلکه به‌صورت دومرحله‌یی است. از طرف دیگر، استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فرابتکاری بهینگی جواب‌ها را نامطمئن می‌سازد. درست به‌دلیل این دو ویژگی است که با استفاده از ایده ستینر[۸] جواب‌های مرحله‌یی به دست آمده را با دید تکرارپذیری می‌سنجیم تا کیفیت جواب‌ها را تأمین کنیم.

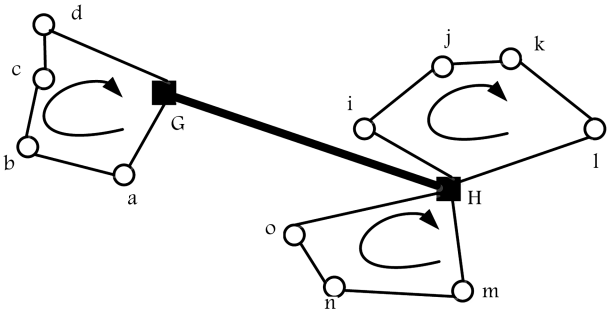
برای این کار، لازم است دو ماتریس تولید کنیم: ماتریس محور[۱] و ماتریس تکرار[۲]. ماتریس محور با استفاده از تخصیص‌های به دست آمده از جواب اولیه تولید می‌شود. در واقع می‌توانیم ماتریس محور را به‌صورت یک ماتریس چهاربعدی در نظر بگیریم که بعد اول آن شهر مبدأ، بعد دوم آن محور اولیه (که شهر مبدأ به آن تعلق دارد)، بعد سوم آن محور ثانویه (که شهر مقصد به آن تعلق دارد) و بعد چهارم آن شهر مقصد است. همچنین اگر این ماتریس را به‌صورت دوبعدی ببینیم می‌توان گفت که سطرهای ماتریس بیان‌گر شهرهای مبدأ و ستون‌های آن بیان‌گر شهرهای مقصد است و در این صورت هر درایه‌ی آن شامل یک جفت از شهرهای محوری خواهد بود.

از سوی دیگر، فواصل مسیریابی شده در جواب اولیه را ما در ماتریس تکرار ثبت می‌کنیم. برای نشان دادن روش محاسبه‌ی ماتریس تکرار از یک مثال با دو محور به همراه مسیرهایش مطابق شکل ۳ کمک می‌گیریم. در جدول ۱ نیز برخی از فواصل مورد نیاز برای محاسبه‌ی ماتریس تکرار ثبت شده است.

مثلا اگر دو محور در دو شهر k و l باشند برای انتقال بسته‌های پستی بین دو شهر i و j باید از این دو محور استفاده کنیم که با استفاده از ماتریس محور کنترل می‌شود. در واقع، برای این که ماتریس‌های تکرار (فواصل جدید) را محاسبه



شکل ۲. مقایسه‌ی سفرهای مستقیم در مقابل سفرهای حلقوی (مسیریابی شده).



شکل ۳. مثالی با دو محور و مسیرهای حلقویش.

جدول ۱. ماتریس تکرار محاسبه شده در شکل ۳.

مبدأ	مقصد	فواصل محقق مسیریابی شده (ماتریس تکرار)
a	c	$d_{ab} + d_{bc}$
c	a	$d_{cd} + d_{dG} + d_{Ga}$
k	a	$d_{kl} + d_{lH} + \alpha d_{HG} + d_{Ga}$

کنیم لازم است بدانیم هر شهر به کدام محور تعلق دارد. آنگاه فاصله‌ی بین شهر i و شهر j از طریق فواصل مسیریابی شده بین این دو شهر شناخته می‌شود، که ما آنها را با استفاده از ماتریس تکرار به دست می‌آوریم. در گام بعد لازم است میزان قابلیت اطمینان را محاسبه کنیم و دوباره مدل P محور مرکز را اجرا کنیم تا جواب جدیدی به دست آوریم. با این جواب جدید، دوباره برای محورها مسیریابی‌های خودشان را انجام می‌دهیم و مجدداً ماتریس‌های تکرار و محور تعیین می‌کنیم. در هر تکرار، شهرهای محوری و مسیرهای حلقوی مربوطه را تولید کرده‌ایم. چنین فرایندی به‌صورت تکرارشونده ادامه می‌یابد تا همگرایی خوبی به دست آید. به بیان دیگر، وقتی دو تکرار متوالی دقیقاً پیکربندی محور یکسانی را به دست داد رویکرد حل ما به پایان خود رسیده است. توجه دارید که در هر دور، مکان‌یابی با الگوریتم VNS انجام می‌گیرد، یعنی ساختارها و تخصیص‌های مختلفی توسط الگوریتم جست‌وجو تولید می‌شود تا نتیجه‌یی با قابلیت اطمینان بالاتر به دست آید. چنین نتیجه‌یی ورودی الگوریتم مسیریابی SA خواهد شد تا مسیرهای بهتر را برای هر محور شناسایی کند.

بدین‌ترتیب رویکرد جدید ما با استفاده از مختصات شهرها، جهت‌یابی بین مسیرها، ماتریس‌های تکرار، ماتریس‌های محور و فواصل واقعی بین جفت شهرها کار می‌کند تا به جواب نهایی با کیفیتی برسد. علت این امر تغییر رویکردهای مدل مکان‌یابی است زیرا در پایان هر تکرار در الگوریتم تکرارپذیر ستینر فاصله‌ها مستقیماً در تغییر ضرایب و نتیجتاً در ساختار محورها تأثیر می‌گذارد؛ اما در الگوریتم تکرارپذیر ما به‌دلیل این که تابع هدف مدل مکان‌یابی عوض می‌شود میزان قابلیت اطمینان در ساختار محورها تأثیر می‌گذارد. به‌همین دلیل در الگوریتم ما فاصله‌های ایجاد شده ابتدا در میزان قابلیت اطمینان تعریف شده و سپس در ساختار محورها اثر می‌گذارد.

۴. اجرای رویکرد جدید روی سطح بالای سامانه‌ی پستی ایران

در مدل‌سازی سامانه‌ی پستی ایران که برای اولین بار در این تحقیق انجام می‌گیرد مراکز استان‌ها را به‌عنوان نقاط بالقوه برای محور شدن یا مرکز پستی جدید شدن در نظر می‌گیریم. از بین این مراکز استانی تعدادی محور و بقیه غیر محوری خواهند شد. مراکز غیر محوری سپس به محورها تخصیص داده می‌شود. مدل‌سازی ما درمورد سامانه‌ی پستی ایران در همین سطحی که سطح بالای سامانه است قرار می‌گیرد و ما وارد توزیع ثانویه که لازمه‌ی رسیدن بسته‌ی پستی به دست مشتری یا گرفتن بسته‌ی پستی از دست مشتری است نمی‌شویم. مسیرهای تعیین شده برای هر مرکز استان محوری در واقع حلقه‌های ایجاد شده با مراکز استان‌های دیگر خواهد بود. بدین‌ترتیب، یکی از داده‌های مورد نیاز ما فاصله‌ی بین مراکز استان‌ها است که براساس اطلاعات جاده‌یی سایت اینترنتی به‌راه[۲۳] جمع‌آوری شده و همچنین اطلاعات جمعیتی براساس داده‌های آماری ۱۳۹۰ در نظرگرفته شده است.[۲۴] ما از اطلاعات جمعیتی برای تخمین تقاضا یا میزان بسته‌های ارسالی بین شهرها استفاده کرده‌ایم. در واقع تجمیع تقاضاهای پستی استان را در مرکز استان در نظرگرفته‌ایم؛ گویی فقط این مراکز استان‌ها با هم مبادله‌ی پستی دارند. اینک با توجه به این که مدل مکان‌یابی ما P مرکز با معیار قابلیت اطمینان است لازم است برای اجرای مدل میزان قابلیت اطمینان بین شهرها، ضریب کاهشی و تعداد محورها را تعیین کنیم. میزان قابلیت اطمینان بین جفت شهرها با استفاده از فاصله و حجم بسته‌های پستی ارسالی بین شهرها محاسبه می‌شود.[۲۵] چنان‌که پیش‌ترگفتیم حجم بسته‌های پستی بین شهرها با استفاده از داده‌های جمعیتی تقریب زده شده است. مقدار ضریب کاهشی در تابع هدف به‌منظور در نظرگرفتن کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل بین محورها با فرض استفاده از مزایای اقتصادی در این مسیرها به کار می‌رود. ضریب کاهشی را با توجه به ادبیات موضوعی برابر با ۰٫۸ در نظرگرفته‌ایم.[۲۵] «تعیین تعداد محورها» پارامتر مورد نیاز بعدی ماست که به‌دلیل نقش اساسی آن در هزینه‌ها و زمان ارسال بسته‌های پستی، تقریب صحیح آن اهمیت زیادی دارد. لذا مدل خود را با تعداد محورهای مختلف، و در واقع با نوعی سعی وخطا اجرا کردیم تا نتیجه‌ی برتر را به دست آوریم. محاسبات نشان داد که تعداد محورها برای شبکه‌ی پستی ایران برابر ۴ است.

اکنون لازم است مدل کمپل را که یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مسئله‌ی P محور میانه است، برای مراکز استان‌ها اجرا کنیم تا نقاط محوری و تخصیص‌هایشان به دست آید.[۲۵] این درواقع به‌خاطر گرفتن حل دقیقی است که برای ارزیابی رویکرد جدید خود نیاز داریم. ما همچنین بیشینه فاصله‌ی پوششی را با استفاده از روش داسکین[۲۲] به دست می‌آوریم. روش داسکین شامل دو گام است: ۱. با اجرای مدل داسکین مقداری تحت عنوان بیشینه فاصله‌ی پوششی خام

جدول ۲. تخمین تعداد وسایل نقلیه در هر محور با استفاده از کلارک ـ رایت در تکرار اول.

شهر محور (شماره شهر)	مشهد (۲۸)	کرج (۲۴)	تهران (۱۲)	اصفهان (۴)
تعداد وسایل نقلیه	۱	۲	۱	۲

حاصل می‌شود؛ ۲. این مقدار با استفاده از یک گام به جلو بزرگ‌تر می‌شود تا جایی که مدل مکان‌یابی ما به یک جواب شدنی برسد. با محاسبات ما، بیشینه فاصله‌ی پوششی به دست آمده برای سامانه‌ی پستی ایران با استفاده از روش داسکین ۱۴۰۰ کیلومتر می‌شود.[۲۵] با این حساب، حداکثر مسافتی که یک وسیله‌ی نقلیه می‌تواند طی کند برابر ۲۸۰۰ کیلومتر است چرا که یک رفت و یک برگشت در طی حلقه دارد.

۱.۴. نتایج اجرای رویکرد

چنان که قبلاً بیان شد، ما از یک الگوریتم VNS برای مکان‌یابی محورها استفاده می‌کنیم. در اجرای اول یا در اولین تکرار شهرهای اصفهان، تهران، کرج و مشهد به‌عنوان شهرهای محوری انتخاب شدند. علاوه بر آن، تخصیص‌های مربوط به این محورها یا شهرهای اقماری آنها هم مشخص شدند. سپس وارد مرحله‌ی مسیریابی، که در واقع مرحله‌ی دوم رویکرد تکرارپذیر ماست می‌شویم. در این مرحله، ابتدا با الگوریتم کلارک ـ رایت[۲۱] تعداد وسایل نقلیه را تخمین می‌زنیم که نتایج حاصل از آن در تکرار اول را در جدول ۲ آورده‌ایم. در این جدول اعداد ۴، ۱۲، ۲۴ و ۲۸ به‌ترتیب شماره شهرهای اصفهان، تهران، کرج و مشهد هستند که به‌ترتیب ۲، ۱، ۲ و ۱ وسیله‌ی نقلیه نیاز دارند. اما این تعداد وسیله‌ی نقلیه برای هریک از این محورها ممکن است شدنی بودن مدل VRP را به خطر بیاندازد، اگرچه در حال حاضر این‌طور نشده است.

پس از آن که مسیرهای هریک از محورها تعیین شد، الگوریتم وارد مرحله‌ی سوم ـ همان قرارگرفتن در فرایند تکرارپذیری ـ می‌شود. در این مرحله فاصله‌های واقعی جفت شهرهای مبدأ و مقصد، که دیگر فاصله‌ی مستقیم بین این شهرها نیستند بلکه فواصل مسیریابی شده بین شهرها هستند، محاسبه می‌شود. ماتریس‌های تکرار و محور دوباره تولید، و در محاسبات به کارگرفته می‌شود. این ماتریس‌ها در محاسبات جدید میزان قابلیت اطمینان و در نتیجه روی ترکیب شهرهای محوری تأثیر می‌گذارند به‌طوری که پیکره‌بندی سازگار و پایداری به وجود آورند. این فرایند تکرارپذیر را روی سامانه‌ی پستی ایران اجرا کردیم و مشاهده کردیم که خوشبختانه به‌سرعت (در تکرار سوم) به نتیجه دلخواه ما رسید یعنی پیکره‌بندی پایداری را شناسایی کرد (جدول ۳). $Z_۱$، $Z_۲$ و $Z_۳$ در جدول ۳ نشان‌گر مقادیر اهداف سه‌گانه‌ی ما مطابق مدل ریاضی ارائه شده در بخش ۱.۲. است. همچنین نتایج اجرای الگوریتم کلارک ـ رایت درمورد تعداد وسائل نقلیه‌ی مورد نیاز را در سه تکرار در جدول ۴ ببینید.

چنان که در جدول ۳ مشاهده می‌شود این الگوریتم در تکرار سوم به ساختاری مشابه با تکرار قبل می‌رسد و بنابراین الگوریتم را متوقف می‌کنیم. مشاهده می‌کنید که جای کرج را شیراز گرفته است. همچنین میزان قابلیت اطمینان ($Z_۱$) در تکرار سوم نسبت به تکرار اول بیشتر شده که نشانه رسیدن به ساختار قابل اطمینان‌تری است. ممکن است در ظاهر چنین به نظر آید که جواب‌های به دست آمده منطقی نیستند چرا که مثلاً مشهد و شیراز دو برابر تهران وسیله‌ی نقلیه نیاز دارند؟ اما باید توجه کرد که ما هم جمعیت و هم فواصل را در محاسبه‌ی تعداد وسایل نقلیه مورد توجه قرار داده‌ایم و در این صورت نتایج منطقی خواهند شد.

جدول ۳. نتایج الگوریتم VNS-SA در سه مرحله تکرار.

تکرار	ساختار محور	$Z_۱$	$Z_۲$	$Z_۳$
اول	اصفهان، تهران، کرج، مشهد	۰٫۹۳۴	۱۳۳۶۴	۶ = مسیرها ۶ = پیشنهادی ۱۲ = کل
دوم	اصفهان، تهران، شیراز، مشهد	۰٫۹۷۶	۱۱۴۸۴	۶ = مسیرها ۶ = پیشنهادی ۱۲ = کل
سوم	اصفهان، تهران، شیراز، مشهد	۰٫۹۷۶	۱۱۴۸۴	۶ = مسیرها ۶ = پیشنهادی ۱۲ = کل

جدول ۴. تخمین تعداد وسایل نقلیه در هر محور با استفاده از الگوریتم کلارک ـ رایت در سه مرحله تکرار.

تکرار	محورهای انتخاب شده			
اول	مشهد	کرج	تهران	اصفهان
	۱	۲	۱	۲
دوم	مشهد	شیراز	تهران	اصفهان
	۲	۲	۱	۱
سوم	مشهد	شیراز	تهران	اصفهان
	۲	۲	۱	۱

توجه دارید که در جدول ۳ ما قبل از اجرای مدل VRP به‌منظور در دست داشتن تعداد اولیه‌ی مناسبی برای تعداد وسایل نقلیه از الگوریتم کلارک ـ رایت که روشی فراابتکاری است استفاده و با استفاده از نرم‌افزار اکسل پیاده‌سازی کرده‌ایم. این تعداد را به‌عنوان مسیرها در نظرگرفتیم و آن را با مقدار پیشنهادی جمع کردیم. منظور از مقدار پیشنهادی این است که اگر به‌ازای هر مسیر یک وسیله‌ی نقلیه بیشتر در نظر بگیریم، زمانی که وسیله‌ی نقلیه‌ی اصلی ارسال شده به نیمه راه خود رسیده است می‌توانیم وسیله‌ی نقلیه بعدی را ارسال کنیم تا به این ترتیب زمان را به نصف کاهش دهیم. مثلاً برای یکی از مسیرهای ۲۱گانه شیراز، چنان که در جدول ۵ مشاهده می‌شود مقدار مسافت طی شده برابر با ۲۴۶۲ داریم و اگر یک وسیله‌ی نقلیه بتواند این مسافت را با سرعت تقریباً ۸۰ کیلومتر در ساعت طی کند این مسیر را تقریباً در ۳۰ ساعت البته بدون در نظرگرفتن زمان لازم برای تخلیه و بارگیری و همچنین استراحت طی خواهد کرد. بنابراین استفاده از یک وسیله‌ی نقلیه‌ی دیگر در زمانی که تقریباً نصف مسیر وسیله‌ی اولیه طی شد می‌تواند ما را در ارسال‌ها و دریافت‌های بعدی کمک کند، چرا که لازم نیست حتماً وسیله‌ی نقلیه‌ی اول به نقطه‌ی اولیه بازگردد و مجدداً فرایند آغاز شود.

به‌همین خاطر، مقدار مسافت طی شده که حاصل جمع مجموع مسیرهای طی شده مطابق با جدول ۳ است در تکرار آخر برابر با ۱۱۴۸۴ است که نسبت به تکرار اول که برابر با ۱۳۳۶۴ بود کم‌تر شده و بدین‌ترتیب نسبت به تکرار اول ۱۴٫۰۷ درصد بهبود یافته است.

جدول ۵. نتایج مسیرها درتکرار سوم.

محور	طول مسیر طی شده (کیلومتر)	مسیرهای تخصیص یافته (شماره شهرها)
اصفهان	۲۶۹۵	۴،۳۱،۱،۲۹،۱۹،۲۶،۶، ۱۳،۲۰،۴
تهران	۲۲۹۸	۱۲،۲۳،۲۴،۲۲،۱۶،۳،۱۱، ۲،۱۴،۱۲
شیراز	۲۴۶۲ ۱۳۹۶	۲۱،۲۵،۱۵،۹،۲۱ ۲۱،۱۰،۵،۳۰،۲۱
مشهد	۱۶۷۱ ۹۶۲	۲۸،۷،۲۷،۱۷،۱۸،۲۸ ۲۸،۸،۲۸

شکل ۴. شناسایی شهرهای محوری در سامانه‌ی پستی ایران با کمک الگوریتم (VNS) در تکرار سوم.

در شکل ۴ نتایج حاصل اونز مکان‌یابی در تکرار آخر الگوریتم تکرارپذیر را روی نقشه‌ی ایران نشان داده‌ایم. در این شکل دایره‌ها مراکز استانی محوری را نشان می‌دهند و خطوط متصل به این محورها تخصیص‌های مربوط به هریک از محورها یا شهرهای اقماری در سامانه‌ی جدید پستی ایران است. مشاهده می‌شود ۵ شهر به محور مشهد، ۶ شهر به محور شیراز، ۸ شهر به محور اصفهان، و ۸ شهر نیز به محور تهران تخصیص پیدا کرده است. در شکل ۵ نیز نتایج حاصل از مسیریابی برای هر محور در تکرار آخر الگوریتم تکرارپذیر روی نقشه ایران نشان داده شده است که در آن خطوط مسیریابی شده برای هریک از محورها نیز نمایش داده شده است. خطوط پررنگ‌تر نیز نماینده‌ی اتصالات بین شهرهای محور است. مشاهده می‌شود که محورهای اصفهان و تهران هرکدام دارای یک مسیر حلقوی و محورهای مشهد و شیراز هرکدام دارای دو مسیر حلقوی هستند.

۲.۴. ارزیابی عملکرد رویکرد پیشنهادی

اینک باتوجه به اجرای رویکرد جدید روی سامانه‌ی پستی ایران و اثبات کارکرد آن، لازم است کیفیت نتایج تولید شده را ارزیابی کنیم. برای انجام این کار عملکرد الگوریتم

شکل ۵. شناسایی مسیرهای حلقوی مربوط به شهرهای محوری با کمک الگوریتم (SA) در تکرار سوم.

حل فراابتکاری VNS-SA تکرارپذیر را با نتایج به دست آمده از یک حل دقیق مقایسه می‌کنیم. توجه دارید که مسائل مکان‌یابی محور ـ مسیریابی عموماً در زمره مسائل NP-hard هستند و به‌همین خاطر ما در رویکرد جدید خود از الگوریتم‌های ابتکاری ـ فراابتکاری استفاده کردیم تا ظرفیت حل این مسائل را نشان دهیم. اما در اینجا می‌توانیم مدل ریاضی خود را که برنامه‌ریزی عدد صحیح است با حل دقیق به دست آوریم چرا که اندازه‌ی مسئله‌ی پستی ما بزرگ نشده و ما می‌توانیم حل دقیق را هم داشته باشیم. با این حساب، در این مرحله برای این که در تکرارهای فرایند تکرارپذیر با به‌کارگیری یک حل دقیق ساختار محور متفاوتی حاصل نشود، تصمیم گرفتیم مدل مکان‌یابی را با تحمیل نقاط محوری به دست آوریم. همچنین برای مرحله‌ی مسیریابی نیز از تخصیص‌های مربوط به نتایج قبل استفاده می‌کنیم و سپس با یک حل دقیق مدل VRP را اجرا می‌کنیم. برای اجرای حل دقیق از نرم‌افزار CPLEX استفاده می‌کنیم. باید توجه داشت که مدل ریاضی ارائه شده در بخش ۱.۲. یک مدل سه‌هدفه است که تحلیل بهینگی پارتو آن برای ادامه‌ی تحقیق در نظرگرفته شده است، اما در اینجا در مرحله‌ی اول از فرایند تکرارپذیر دو هدف ۱ و ۲ و در مرحله‌ی دوم هدف ۳ فعال می‌شود. هدف اول به‌صورت محدودیت و هدف دوم به‌صورت تابع هدف عمل می‌کند. به‌منظور مقایسه‌ی نتایج حاصله، از درصد انحراف نسبی (RPD) استفاده می‌کنیم:

$$\text{RPD} = \frac{\text{Exact Solution} - \text{VNS Solution}}{\text{Exact Solution}} \times ۱۰۰ \qquad (۲۶)$$

بدین‌منظور الگوریتم VNS را برای مدل مکان‌یابی ۱۰ بار اجرا کرده و میانگین آن‌ها را در نظر می‌گیریم. در جدول ۶ نتایج این مقایسه ارائه شده است.

نتایج RPD نشان می‌دهد که VNS در فرایند تکرارپذیر جواب‌های خوبی تولید کرده است. به‌همین ترتیب، ما می‌خواهیم نتایج حل دقیق را برای مرحله‌ی مسیریابی نیز به دست آوریم. در جدول ۷ نتایج اجرای چنین مقایسه‌یی ارائه شده است.

نتایج حاصل از تعداد وسایل نقلیه بدون اضافه‌کردن مقدارهای پیشنهادی در نظرگرفته شده است. برای اجرای حل دقیق، پس از اجرای الگوریتم کلارک ـ رایت لازم بود مدل VRP را با حل دقیق اجرا کنیم و با توجه به شدنی بودن یا نبودن آن درمورد کاهش یا افزایش تعداد وسایل نقلیه تصمیم بگیریم.

جدول ۶. مقایسه‌ی نتایج نهایی الگوریتم VNS و الگوریتم دقیق در سه تکرار با مقادیر $P = 4$ و $N = 31$.

تکرار	جواب دقیق	جواب VNS (یا مقدار Z_1)	درصد اختلاف یا RPD
اول	۹۴٫۵	۹۳٫۴	۱٫۱
دوم	۹۸٫۳	۹۷٫۶	۰٫۷۱
سوم	۹۸٫۳	۹۷٫۶	۰٫۷۱

جدول ۷. مقایسه‌ی نتایج نهایی الگوریتم SA و الگوریتم دقیق در هر تکرار.

مرحله	محورها	تخصیص‌ها	حل با SA		حل دقیق	
			Z_3	Z_2	Z_3	Z_2
اول	اصفهان	۵،۹،۱۰، ۱۳،۲۰،۲۱، ۳۰،۳۱	۲	۴۰۴۵	۲	۳۸۹۳
	تهران	۱،۶،۷، ۱۱،۱۹	۱	۲۷۳۸	۱	۲۷۳۸
	کرج	۲،۳،۱۴۱۶، ۱۷،۱۸،۲۲، ۲۳،۲۶،۲۹	۲	۳۵۱۳	۲	۳۵۱۳
	مشهد	۸،۱۵،۲۵، ۲۷	۱	۳۰۶۸	۱	۳۰۶۸
دوم و سوم	اصفهان	۱،۴،۶،۱۳، ۱۹،۲۰،۲۶، ۲۹	۱	۲۶۹۵	۱	۲۶۹۵
	تهران	۲،۳،۱۱،۴، ۱۵،۲۲،۲۳، ۲۴	۳	۲۲۹۸	۱	۲۲۹۸
	شیراز	۵،۹،۱۰،۱۵، ۲۱،۲۵،۳۰	۲	۳۸۵۸	۲	۳۸۵۸
	مشهد	۷،۸،۱۷، ۱۸،۲۷	۲	۲۶۳۳	۱	۱۹۹۳
مجموع		تکرار اول	۶	۱۳۳۶۴	۶	۱۳۲۱۲
		تکرار دوم و سوم	۶	۱۱۴۸۴	۵	۱۰۸۴۸

همانطورکه در جدول ۷ مشاهده می‌شود در روش دقیق کم‌تر بودن تعداد وسایل نقلیه در برخی محورها در تکرار دوم و سوم، نسبت به روش SA منطقی است. اختلاف ایجاد شده مربوط به محور مشهد است که در روش شبیه‌سازی تبریدی (SA) دارای دو مسیر یا دو وسیله‌ی نقلیه است اما در روش دقیق دارای یک مسیر است، که البته این میزان اختلاف قابل قبول است. همچنین در جدول ۷ مجموع مسیرهای طی شده برای هر محور نشان داده شده است که به‌دلیل کم بودن تعداد گره‌ها برای هر محور تقریباً در برخی از محورها نتایج روش‌های SA و دقیق به یک میزان حاصل شده است. اما مثلاً در تکرار آخر مجموع مسیر طی شده برای محور مشهد تغییر کرده است که در مجموع کل مسیرهای طی شده یا Z_2 نیز تأثیرگذاشته است. در روش‌های SA و دقیق میزان اختلاف بین دو روش برای Z_2 دارای درصد انحراف نسبی ۵٫۵۷ درصد است.

نتایج بالا هم برای مرحله‌ی مکان‌یابی و هم برای مرحله‌ی مسیریابی نشان‌دهنده‌ی کیفیت قابل قبول رویکرد پیشنهادی است. اگرچه این رویکرد هنوز نیاز به بررسی‌های جامع‌تری دارد، مطالعه‌ی موردی ما نشان می‌دهد که در شبکه‌های توزیعی مانند شبکه‌ی پستی استفاده از ساختارهای محور ـ اقماری موفق‌تر است.[۲۵]

۵. نتیجه‌گیری

به‌منظور مدیریت بهتر هزینه و زمان و با توجه به نیاز شبکه‌ها و سامانه‌های توزیعی مانند پست به داشتن مراکز محوری، در این تحقیق رویکرد مکان‌یابی ـ مسیریابی جدیدی را پیشنهاد کردیم. این رویکرد در دو بعد مدل‌سازی و حل نوآورانه است. تفکیک یک مسئله‌ی NP-hard به دو مسئله‌ی مکان‌یابی و مسیریابی در ساختاری تکرارپذیر نوآوری نظری این تحقیق بود. از سوی دیگر، روش حلی که ما انتخاب کردیم فراابتکاری تکرارپذیر بود که به جای گرفتار شدن در دام ترکیبیات امکان حل کارامد را برای ما به وجود آورد. اجرای این رویکرد جدید روی سامانه‌ی پستی ایران نشان داد که شهرهای اصفهان، تهران، شیراز و مشهد می‌توانند مکان‌های محوری ما در سامانه‌ی جدید پستی باشند به‌طوری که هرکدام تعدادی از مراکز استانی دیگر را زیر چتر خود بگیرند تا همه مراکز استان‌ها پوشش یابد که همان سطح بالای سامانه‌ی پستی پیشنهادی ما باشد.

درادامه‌ی تحقیق، به‌کارگیری داده‌های دقیق‌تر برای نهایی کردن انتخاب مکان‌های محوری پیشنهاد می‌شود، اگرچه انتظار نمی‌رود تغییر زیادی حاصل شود. همچنین، می‌توان رویکرد جدید را با توجه به این‌که داده‌های مربوط به حجم و فراوانی بسته‌های پستی مورد استفاده ما ماهیتی غیر دقیق (احتمالی و فازی) دارند به‌صورت مدل‌های احتمالی و فازی ارزیابی کرد. از سوی دیگر، تحلیل پارتوابتیمال مدل سه‌هدفه‌ی ما را به نتایج دقیق‌تر و بهتری رهنمون می‌سازد که به‌کارگیری آن در چارچوب تکرارپذیر جذاب خواهد بود.

پانوشت‌ها

1. hub matrix
2. iteration matrix

منابع (References)

1. Montoya-Torres, J.R., Franco, J.L. and Isaza, S.N. "A literature review on the vehicle routing problem with

multiple depots", *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, **79**, pp. 115-129 (Jan. 2015).

2. Drexl, M. and Schneider, M. "A survey of variants and extensions of the location-routing problem", *European Journal of Operational Research*, Elsevier, **241**(2), pp. 283-308 (March 2015).
3. Baumung, M.N., Gündüz, H.I. and Müller, T. "Strategic planning of optimal networks for parcel and letter mail", 8th Workshop on Logistics and Supply Chain Management, Berkeley, California, USA, Springer, pp. 81-103 (2015).
4. Min, H., Jayaraman, V. and Srivastava, R. "Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions", *European Journal of Operational Research*, **108**, pp. 1-15 (1998).
5. Cooper, L. "The transportation-location problem", *Operations Research*, **20**, pp. 94-108 (1972).
6. Cooper, L. "An efficient heuristic algorithm for the transportation-location problem", *Journal of Regional Science*, **16**, pp. 309-315 (1976).
7. Jacobsen, S.K. and Madsen, O.B. "A comparative study of heuristics for a two-level routing-location problem", *European Journal of Operational Research*, **5**, pp. 378-387 (1980).
8. Çetiner, S., *An Iterative Hub Location and Routing Problem for Postal Delivery Systems*, Middle East Technical University (2003),
9. Kim, H. and O'Kelly, M.E. "Reliable p-hub location problems in telecommunication networks", *Geographical Analysis,* **41**, pp. 283-306 (2009).
10. Snyder, L.V. and Daskin, M.S. "Models for reliable supply chain network design", In Critical Infrastructure, Springer, pp. 257-289 (2007).
11. Snyder, L.V. and Daskin, M.S. "Reliability models for facility location: The expected failure cost case", *Transportation Science*, **39**, pp. 400-416 (2005).
12. Davari, S., Zarandi, M.F. and Turksen, I. "The fuzzy reliable hub location problem", in *Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS)*, 2010 Annual Meeting of the North American, pp. 1-6 (2010).
13. Alumur, S. and Kara, B.Y. "Network hub location problems: The state of the art", *European Journal of Operational Research*, **190**, pp. 1-21 (2008).
14. Hassani, A. Hooshangi-Tabrizi, P. Khatami, M. and Moosavi, B. "An effective variable neighborhood search for the reliable p-hub center location problem", *Archives Des Sciences*, **65**, (2012).
15. Klincewicz, J.G. "Heuristics for the p-hub location problem", *European Journal of Operational Research*, **53**, pp. 25-37 (1991).
16. Abdinnour-Helm, S. "A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem", *European Journal of Operational Research,* **106**, pp. 489-499 (1998).
17. Abdinnour-Helm, S. and Venkataramanan, M. "Solution approaches to hub location problems", *Annals of Operations Research*, **78**, pp. 31-50 (1998).
18. Topcuoglu, H., Corut, F., Ermis, M. and Yilmaz, G. "Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms", *Computers & Operations Research,* **32**, pp. 967-984 (2005).
19. Chen, J.-F. "A hybrid heuristic for the uncapacitated single allocation hub location problem", *Omega*, **35**, pp. 211-220 (2007).
20. Cunha, C.B. and Silva, M.R. "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**, pp. 747-758 (2007).
21. Clarke, G. and Wright, J. "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points", *Operations Research*, **12**, pp. 568-581 (1964).
22. Daskin, M.S., *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications*, 2nd Edition, Wiley (1995).
23. www.behrah.com
24. www.wikipedia.org
25. Behzadi Pishkenari, S. "A new iterative hub-loction and routing model and its implementation on Iran's postal network", Master thesis, University of Alzahra, School of Engineering (in Persian) (2014).