

رویکرد ترکیبی برنامه‌ریزی احتمالی و بهینه‌سازی استوار در مساله مکان‌یابی - مسیریابی و حل آن از طریق الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

عبدالسلام قادری^{۱*}، چیمین خانزاده^۲

۱- استادیار، دانشگاه کردستان، گروه مهندسی صنایع، سنندج، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، دانشکده مهندسی، سنندج، ایران

رسید مقاله: ۱۵ خرداد ۱۳۹۷

پذیرش مقاله: ۲۳ شهریور ۱۳۹۸

چکیده

مساله مکان‌یابی-مسیریابی یکی از مسایل ترکیبی مهم در طراحی زنجیره تأمین بوده که به صورت همزمان تصمیمات مرتبط با مکان‌یابی انبارها و مسیریابی وسایل نقلیه را انجام می‌دهد. در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مساله تک انبار مکان‌یابی-مسیریابی غیرقطعی ارائه شده که در آن هزینه حمل و نقل، تقاضای مشتریان و هزینه وسیله نقلیه به عنوان منابع عدم قطعیت فرض شده‌اند. پارامترهای نامشخص مساله با احتمال مشخصی تحت سناریوهای مختلف اتفاق افتاده و برای مواجهه با عدم قطعیت از رویکرد ترکیبی احتمالی P-استوار استفاده شده است. این رویکرد یک روش نسبتاً جدید در برخورد با شرایط عدم قطعیت است که سعی می‌نماید معایب رویکردهای برنامه‌ریزی احتمالی و بهینه‌سازی استوار را برطرف کند. همچنین با توجه به NP-Hard بودن مساله مورد مطالعه، برای حل مدل ارائه شده یک الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر پیشنهاد شده است. نتایج به دست آمده از حل مسایل نمونه با استفاده از الگوریتم دقیق و ابتکاری، نشان از عملکرد قابل قبول الگوریتم ارائه شده دارد.

کلمات کلیدی: مساله مکان‌یابی-مسیریابی، برنامه‌ریزی احتمالی، بهینه‌سازی استوار، رویکرد ترکیبی احتمالی P-استوار

۱ مقدمه

مفهوم زنجیره تأمین نخستین بار در اواخر دهه ۱۹۸۰ توسط جونز و ریلی مطرح شد و سپس در دهه ۱۹۹۰ گسترش یافت [۱]. این مفهوم را می‌توان یکی از مهم‌ترین گرایش‌های مدیریتی و عملیاتی دو دهه اخیر دانست. یکی از عوامل این اهمیت، سهم بالای هزینه‌های لجستیکی در هزینه تمام شده یک محصول است. به همین دلیل، حمل و نقل و مسایل مرتبط با آن، همواره یکی از موضوعات مورد علاقه محققان مختلف در حوزه طراحی زنجیره تأمین بوده است. مساله مکان‌یابی-مسیریابی^۱ یکی از مسایل مهم در حوزه حمل و نقل و طراحی زنجیره تأمین

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: ab.ghaderi@gmail.com

^۱ Location- Routing Problem (LRP)

است. این مسأله یکی از مهم‌ترین شاخه‌های مسایل مکان‌یابی در نزد تحلیل‌گران سیستم‌های لجستیکی در دهه‌های اخیر بوده است و به دلیل در نظر گرفتن روابط متقابل بین مکان تسهیلات و مسیریابی ناوگان حمل و نقل، دید قوی‌تری در اختیار تحلیل‌گران و مدیران گذاشته و از یافتن بهینه محلی مسایل مکان‌یابی و مسیریابی به صورت جداگانه جلوگیری می‌کند.

اولین قدم‌ها در زمینه ایجاد مسایل مکان‌یابی-مسیریابی به واسطه دهه ۱۹۶۰ میلادی بازمی‌گردد که مسایلی از قبیل مکان‌یابی-کوتاه‌ترین مسیر ایجاد شدند [۲]. پس از آن تا به امروز توسعه‌های مختلفی در مسأله مکان‌یابی-مسیریابی توسط محققان مختلف ارایه شده است. مسایل مکان‌یابی-مسیریابی هاب [۳]، مکان‌یابی-مسیریابی با برداشت و تحویل [۴]، مکان‌یابی-مسیریابی با پنجره زمانی [۴]، مکان‌یابی-مسیریابی چند دوره‌ای [۵]، مکان‌یابی-مسیریابی چند هدفه [۶] و مکان‌یابی-مسیریابی با عدم قطعیت [۷] از آن جمله هستند.

یکی از شاخه‌های مهم مسایل بهینه‌سازی، مسایل غیرقطعی هستند. در مسایل دنیای واقعی به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات دقیق و یا هزینه بالای به دست آوردن آن‌ها، همواره با عدم قطعیت روبرو هستیم. در ادبیات موضوع جهت مواجهه با بحث عدم قطعیت، محققان عمدتاً از دو رویکرد «برنامه‌ریزی احتمالی» و «برنامه‌ریزی استوار» بهره برده‌اند. برنامه‌ریزی احتمالی با در نظر گرفتن احتمال رخداد هر پیشامد، به دنبال بهینه کردن سود و یا هزینه انتظاری است؛ اما بهینه‌سازی استوار دنبال راه حلی است که نسبت به تغییرات مقاوم بوده و دچار تغییر نگردد. این رویکرد، یکی از روش‌های نسبتاً جدید در برنامه‌ریزی ریاضی است که توجه محققان زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. نخستین گام در طراحی روش‌های استوار توسط سویستر برداشته شد. وی مدلی پیشنهاد کرد که به ازای کلیه مقادیر که به مجموعه محدب‌ی تعلق داشت، جواب بهینه شدنی باقی بماند [۸] و پس از آن رویکردهای مختلفی برای بهینه‌سازی استوار توسط محققان مختلف ارایه گردید.

هر یک از رویکردهای احتمالی و استوار که برای مقابله با عدم قطعیت در برنامه‌ریزی استفاده می‌شوند، دارای یک سری معایب هستند و استفاده از آن‌ها به تنهایی ممکن است منجر به ایجاد جواب‌هایی گردد که تحت شرایط مشخصی از بهینگی به دور باشند. جواب به دست آمده از رویکرد احتمالی ممکن است برای برخی از سناریوها خیلی مناسب باشد؛ اما برای برخی دیگر به شکل قابل توجهی ضعیف باشد. از طرف دیگر بهینه‌سازی استوار به این مسأله که کدام رخداد قرار است اتفاق بیفتد توجهی ندارد. در نظر گرفتن رخدادی که احتمال روی دادن آن کم باشد، در واقع یک رویکرد بدبینانه به مسأله خواهد بود.

رویکرد بهینه‌سازی احتمالی p -استوار از مزایای هر دو رویکرد احتمالی و استوار بهره جسته و معایب آن‌ها را پوشش می‌دهد و لذا می‌تواند رویکرد کامل‌تری برای بهینه‌سازی مسایل باشد. در این تحقیق مسأله مکان‌یابی-مسیریابی احتمالی استوار با در نظرگیری هزینه‌های سفر، هزینه وسیله و تقاضای غیرقطعی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به علاوه فرض شده است پارامترهای غیرقطعی به صورت سناریویی و با احتمال مشخص برای هر سناریو داده می‌شوند. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته توسط نویسندگان این مقاله، مسأله مکان‌یابی-مسیریابی احتمالی p -استوار برای اولین بار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. از طرف دیگر هر دو مسأله مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی وسیله نقلیه به تنهایی جزو مسایل NP-hard بوده و حل دقیق آن‌ها توسط الگوریتم‌های دقیق در زمان

حل قابل قبولی امکان پذیر نیست؛ لذا ترکیب این دو مساله که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است نیز NP-hard است؛ لذا نوآوری دیگر این مقاله ارایه روش حل فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر برای حل مساله پیشنهادی با مثال‌هایی در اندازه‌های مختلف است.

ساختار این پژوهش به این ترتیب است که در ادامه به تعریف مساله و شرح رویکرد بهینه‌سازی احتمالی p -استوار پرداخته خواهد شد. سپس ادبیات موضوع مکان‌یابی استوار، مسیریابی استوار و مکان‌یابی-مسیریابی غیرقطعی بررسی می‌شود. در ادامه مدل ریاضی پیشنهادی به همراه علائم مورد استفاده معرفی می‌گردد. در بخش بعدی الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر پیشنهادی شرح داده شده و در نهایت محاسبات عددی به همراه تحلیل و نتایج ارایه می‌شود.

۱-۱ تعریف مساله

مساله مورد مطالعه در این تحقیق، مساله مکان‌یابی تک دپویی و مسیریابی وسایل نقلیه جهت توزیع (جمع‌آوری) کالا بین مشتریان تحت شرایط عدم قطعیت است. در این مساله نواحی مشتری از قبل مشخص بوده و محل‌های کاندید برای احداث انبار معلوم است. از میان محل‌های بالقوه برای احداث انبار، یک محل برای احداث انبار انتخاب می‌شود. برای نزدیک شدن مساله به شرایط دنیای واقعی، برخی پارامترهای مساله به صورت غیرقطعی در نظر گرفته خواهد شد و برای حل مساله غیرقطعی از رویکرد احتمالی p -استوار استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است که در این مساله هزینه حمل و نقل، تقاضای مشتریان و هزینه استفاده از وسیله به عنوان منابع عدم قطعیت در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به شرایط ترافیکی حمل و نقل، هزینه حمل و نقل متغیر بوده و بسته به شدت ترافیک می‌توان سناریوهای مختلفی برای زمان سفر مطرح نمود. تعیین قطعی تقاضای مشتریان نیز در شرایط دنیای واقعی تقریباً غیرممکن است و برای این مورد نیز سناریوهای مختلفی در نظر گرفته شده است. هزینه وسایل حمل و نقل، به عنوان سومین منبع عدم قطعیت این مساله در نظر گرفته شده است. با توجه به مدت زمان نامعین استفاده از وسیله حمل و هزینه‌های جانبی وسیله، هزینه استفاده از وسیله نیز مشمول عدم قطعیت می‌گردد.

۱-۲ رویکرد بهینه‌سازی احتمالی p -استوار

این رویکرد برای بهره جستن از مزایای دو رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی و بهینه‌سازی استوار، معرفی شده است. تاکنون بر روی ترکیب رویکردهای برنامه‌ریزی احتمالی و بهینه‌سازی استوار جهت مواجهه با مبحث عدم قطعیت تعداد تحقیقات اندکی انجام شده است. یکی از اولین تحقیقات در این زمینه توسط اشنایدر و داسکین انجام شده است [۹]. این رویکرد به دنبال یافتن جواب p -استوار با کم‌ترین هزینه است که در آن میزان پشیمانی در نظر گرفته شده برای هر سناریو نمی‌تواند بیش‌تر از p باشد ($p \geq 0$). در ادامه این رویکرد شرح داده می‌شود.

فرض کنید \mathcal{K} مجموعه سناریوهای ممکن باشد به علاوه فرض می‌شود که پارامترهای مساله تحت هر سناریو دارای مقدار مشخص بوده و احتمال رخداد هر سناریو نیز از قبل مشخص و داده شده است. P_s یک مساله کمینه‌سازی قطعی تحت سناریوی s باشد (برای هر سناریوی $s \in \mathcal{K}$ یک مساله متفاوت P_s وجود دارد که ساختار همه یکسان است؛ ولی داده‌های آن‌ها متفاوت است). برای هر s فرض کنید که z_s^* مقدار بهینه تابع هدف مساله P_s باشد و همچنین فرض کنید که برای تمامی سناریوهای s داریم $z_s^* > 0$.

تعریف ۱. فرض کنید $p \geq 0$ یک عدد ثابت باشد و x یک جواب شدنی برای مسأله P_s برای تمامی $s \in S$ باشد و $z_s(x)$ مقدار تابع هدف مسأله P_s برای جواب شدنی x باشد. جواب x را p -استوار می‌گوییم هرگاه برای تمامی $s \in S$ داشته باشیم:

$$\frac{z_s(x) - z_s^*}{z_s^*} \leq p \quad (1)$$

یا معادل آن را داشته باشیم:

$$z_s(x) \leq (1+p)z_s^* \quad (2)$$

در سمت چپ رابطه اول میزان پیشمانی نسبی سناریوی s نوشته شده است و پیشمانی مطلق برابر خواهد بود با $z_s(x) - z_s^*$.

استفاده از p -استواری در ابتدا در جایابی تسهیلات معرفی شد [۱۰] و پس از آن در یک مسأله یافتن منابع در سطح بین‌المللی [۱۱] و یک مسأله طراحی شبکه [۱۲] استفاده گردید.

همچنین می‌توان برای هر سناریو s ، یک حد پیشمانی p_s متفاوت بیان کرد. به عنوان مثال به سناریوهایی با احتمال رخ دادن پایین اجازه داد که میزان پیشمانی بیش‌تری را قبول کنند. در این حالت در روابط p -استواری فوق به جای p از p_s استفاده می‌شود؛ بنابراین بردار p به صورت $(p_1, \dots, p_{|S|})$ خواهد بود. رویکرد اندازه‌گیری p -استواری می‌تواند با تابع هدف کمینه‌سازی هزینه انتظاری ترکیب گردد که در این صورت رابطه (۳) را خواهد داد:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{s \in S} q_s z_s(x) \\ \text{s.t.} \quad & z_s(x) \leq (1+p)z_s^* \quad \forall s \in S \\ & x \in X \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن: S مجموعه تمام سناریوهای ممکن است و داده‌های مسأله تحت سناریوهای مختلف با یکدیگر متفاوت است. q_s احتمال روی دادن سناریوی s است و X مجموعه تمامی جواب‌هایی است که برای تمامی P_s ها شدنی است. این شیوه بهینه‌سازی استوار، رویکرد احتمالی p -استوار نامیده می‌شود [۱۳]. در این رویکرد فرض می‌شود داده‌های مسأله به صورت گسسته و براساس سناریوهای از قبل تعریف شده تغییر می‌یابند. جوابی که از این رویکرد به دست می‌آید با مقدار بهینه هر کدام از سناریوها نباید از یک نسبتی بزرگ‌تر باشد به نحوی که هزینه مورد انتظار تابع هدف حداقل شود.

۲ مرور ادبیات

در این پژوهش مسأله تک‌دپویی مکان‌یابی-مسیریابی احتمالی p -استوار ارایه می‌گردد. در این بخش تحقیقات مرتبط در حوزه مسایل بهینه‌سازی استوار مورد بررسی قرار خواهند گرفت. به دلیل نبود هیچ پژوهشی در مورد

مسایل مکان‌یابی-مسیریابی استوار، مسایل مسیریابی و مکان‌یابی تسهیلات استوار به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در نهایت مسایل احتمالی p -استوار موجود در این حوزه بررسی خواهند شد.

یکی از اولین پژوهش‌ها در این زمینه توسط برتسیماس و سیمچی-لوی انجام شده است. نویسندگان مساله مسیریابی وسایل حمل و نقل را با تقاضاهای غیرقطعی مورد بررسی قرار دادند و الگوریتم ابتکاری را مبتنی بر مکان‌یابی برای آن پیشنهاد کردند [۱۴]. سونگور و همکاران یک رویکرد بهینه‌سازی استوار برای حل مساله مسیریابی وسایل نقلیه با تقاضاهای غیرقطعی ارائه کردند [۱۵]. مقدم و همکاران یک مساله مسیریابی وسایل حمل و نقل با ناوگان حمل محدود و تقاضاهای غیرقطعی ارائه نمودند. فرض شده است که تقاضاهای غیرقطعی هستند و هیچ داده گذشته در این مورد در دسترس نمی‌باشد تا بتوان توزیع احتمالی آن‌ها را به دست آورد. برای حل مساله ابتدا یک الگوریتم شاخه و برش برای حل مثال‌های کوچک ارائه شده است و سپس یک الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان برای حل پیشنهاد گردید [۱۶].

مسیریابی وسایل حمل و نقل چندهدفه با زمان سرویس احتمالی و تقاضای فازی تحت محدودیت‌های پنجره زمانی توسط دهباری و همکاران بررسی گردید [۱۷]. به دلیل پیچیدگی مساله مسیریابی وسایل حمل و نقل از الگوریتم فراابتکاری چندهدفه رقابت استعماری جهت یافتن جواب‌های پارتو استفاده شده و عملکرد آن در مقایسه با الگوریتم‌های شناخته شده NSGA-II و PAES نیز ثابت شد. آوردوز مساله مسیریابی وسایل حمل و نقل را تحت شرایط عدم قطعیت مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه منابع عدم قطعیت عبارتند از: هزینه‌ها، تقاضا، زمان و تعداد مشتریان [۱۸]. لی و همکاران یک مساله مسیریابی وسیله حمل با ظرفیت و فرصت تحویل محدود ارائه نمودند. در این مساله فرض شده است که تقاضای مشتریان و زمان‌های سفر غیرقطعی هستند [۱۹]. مانیسری و همکاران یک مساله مسیریابی استوار وسیله‌های حمل با پنجره‌های زمانی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش زمان‌های سفر به عنوان منابع عدم قطعیت در نظر گرفته شدند [۲۰].

آگرا و همکاران مساله مسیریابی استوار را با پنجره‌های زمانی ارائه کردند. در مدل ارائه شده تنها مسیرهایی مجاز هستند که برای تمامی مقادیر زمان‌های سفر غیرقطعی مشخص شده شدنی باشند. نویسندگان دو رویکرد متفاوت برنامه‌ریزی استوار را پیشنهاد کردند. در نهایت نتایج مثال واقعی برای هر دو رویکرد را حل نموده و باهم مقایسه کردند [۲۱]. آدلایسکا و جیلت به بررسی مساله مسیریابی وسایل حمل و نقل با تاریخ تحویل محدود و با زمان‌های سفر غیرقطعی با دو رویکرد احتمالی و استوار پرداختند. در رویکرد استوار فرض شده است که زمان‌های سفر به خانواده مشخصی از توزیع‌های احتمالی تعلق دارند [۲۲]. جیلت و کی مساله مسیریابی وسایل حمل و نقل را تحت شرایط عدم قطعیت مورد بررسی قرار دادند. زمان‌های سفر و تقاضای مشتریان به عنوان منابع عدم قطعیت در نظر گرفته شده است [۲۳]. سولانو-کاریس و همکاران مساله مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود را برای توانایی برخورد با کمان‌های هزینه‌ای غیرقطعی توسعه دادند [۲۴].

احمدی و همکاران رویکرد تصمیم‌گیری استوار را برای مسایل مکان‌یابی p -میان و بر اساس برنامه‌ریزی احتمالی دو سطحی و تئوری میانگین-واریانس استفاده کردند. نویسندگان رویکردی را برای به دست آوردن سیاست‌هایی با قابلیت اطمینان بیش‌تر در محیط‌های احتمالی ارائه نمودند [۲۵] غفاری نسب و همکاران، از

بهینه‌سازی استوار برای طراحی شبکه‌های هاب استفاده کردند. تحقیق ایشان مسایل مکان‌یابی و تخصیص را با تقاضاهای احتمالی مورد بررسی قرار داده است. هدف آن تعیین تعداد تسهیلات هاب، محل آن‌ها و تخصیص تقاضا به این تسهیلات است به نحوی که از انتقال تمامی کالاها در شبکه اطمینان حاصل شود و هزینه کل کمینه گردد [۲۶] پایدار و همکاران یک مدلی دو هدفه برای برنامه‌ریزی تسهیلات در مساله لجستیک امدادی با به کارگیری روش بهینه‌سازی استوار ارایه نمودند. برای حل مدل پیشنهادی در گام اول با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار، مدل تبدیل به یک مدل قطعی شده و در گام دوم با به کارگیری روش برنامه‌ریزی آرمانی مدل دو هدفه قطعی شده حل شده است [۲۷].

بررسی‌های صورت گرفته نشان داده تاکنون رویکرد ترکیبی احتمالی p -استوار در ادبیات مسایل مکان‌یابی-مسیریابی انجام نشده و به کارگیری آن محدود به چند تحقیق بوده که در ادامه به مرور این رویکرد در مسایل مکان‌یابی پرداخته شده است. اشنایدر و داسکین کاربرد رویکرد ترکیبی احتمالی p -استوار را در دو مساله کلاسیک مکان‌یابی تسهیلات نگهداری و طراحی شبکه مورد بررسی قرار دادند. در این رویکرد هزینه انتظاری در حالی که حد مشخصی از پشیمانی در هر سناریو در نظر گرفته شده، کمینه می‌شود [۹]. هان و همکاران به بررسی رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مساله مسیریابی پرداختند. آن‌ها مساله مسیریابی وسیله نقلیه را با زمان‌های سفر غیرقطعی مورد بررسی قرار دادند، که در آن برای هر وسیله‌ای که از حد زمانی مشخص شده تجاوز نماید، جریمه‌ای در نظر گرفته شده است [۲۸]. قادری و رحمانیانی به بررسی مساله مکان‌یابی p -هاب میانه با تخصیص تکی تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند. آن‌ها تقاضاها و زمان‌های سفر را به صورت غیرقطعی در نظر گرفتند و از یک روش بهینه‌سازی استوار جهت پرداختن به عدم قطعیت در پارامترها و طراحی شبکه استفاده کردند [۲۹]. تیان و یو مساله طراحی زنجیره تأمین p -استوار را مورد بررسی قرار دادند. طراحی زنجیره تأمین این مساله شامل انتخاب تأمین‌کنندگان، مکان‌یابی تسهیلات و تعیین ظرفیت آن‌ها می‌شود. در این پژوهش تقاضاها و هزینه‌ها به صورت غیرقطعی و تحت سناریوهای مختلف فرض شده‌اند [۳۰]. کیوانشکوه و همکاران از رویکرد ترکیبی احتمالی-استوار برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته استفاده نمودند. در این مطالعه هزینه‌ها، تقاضاها و میزان کالاهای برگشتی به عنوان منبع عدم قطعیت تعیین شده است [۳۱].

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره گردید، براساس بررسی‌های صورت گرفته، مساله مکان‌یابی-مسیریابی احتمالی p -استوار در تحقیقات محققان دیده نشده است و نخستین بار در این مقاله به بررسی این موضوع پرداخته شده است. مساله مکان‌یابی-مسیریابی یکی از مسایل مهم در طراحی زنجیره‌های تأمین توزیع (جمع‌آوری) کالا می‌باشد و برای طراحی یک زنجیره تأمین نمی‌توان این مساله را به سادگی نادیده گرفت. همچنین مساله مذکور متأثر از پارامترهای مختلفی نظیر تقاضا و زمان سفر بوده که در دنیای واقعی ماهیت نامشخص و غیرقطعی دارند. عدم در نظرگیری این موضوع ممکن است منجر به ساده‌سازی مساله شده و جواب‌های به دست آمده ممکن است در واقعیت غیربهینه و حتی نشدنی باشند؛ بنابراین با توجه به اهمیت موضوع و کاربردهای زیاد مساله در دنیای واقعی، استفاده از رویکردی کارا جهت مدل‌سازی مساله تحت شرایط عدم قطعیت ضروری است. مطابق بررسی صورت گرفته، در ادبیات موضوع معمولاً رویکردهای برنامه‌ریزی احتمالی و بهینه‌سازی استوار به صورت جداگانه

بررسی شده که هر کدام به تنهایی دارای ایراداتی می‌باشند و جواب‌های این دو رویکرد به ترتیب ممکن است برای برخی سناریوها نامناسب و یا محافظه کارانه باشد. از طرفی دیگر عدم دسترسی به احتمال دقیق زمان‌های سفر، استفاده از رویکرد سنتی برنامه‌ریزی احتمالی را غیرممکن نموده است. همچنین در صورت در نظر گیری تنها یک بازه‌ی واحد و بزرگ برای زمان سفر به جای چندین بازه‌ی کوتاه‌تر همان‌گونه که اغلب در بهینه‌سازی استوار استفاده می‌شود، منجر به جواب‌های بسیار محافظه کارانه خواهد شد؛ لذا در این مساله مشخص و با توجه به زمان سفر در نظر گرفته شده بسته به شرایط ترافیکی، رویکردهای برنامه‌ریزی احتمالی و بهینه‌سازی استوار با محدودیت‌هایی مواجه بوده و توسعه‌ی رویکردی که به درستی بتواند آن‌ها را در همدیگر ادغام نماید، ضروری می‌باشد.

در این تحقیق زمان سفر به عنوان یکی از پارمترهای تعیین کننده مساله به صورت نامشخص در نظر گرفته شده است. همچنین از آنجا که دانش دقیق از احتمال زمان‌های سفر معمولاً در دسترس نبوده، فرض شده است که با توجه به تجارب گذشته به صورت تقریبی پیش‌بینی‌هایی از زمان سفر در بازه‌های مختلف انجام شود. بدین صورت که زمان سفر بین دونقطه بسته به شرایط ترافیکی قابل پیش‌بینی بوده و احتمال مواجه شدن با هر کدام از شرایط ترافیکی بین دونقطه نیز مشخص است. بررسی منابع موجود در ادبیات حوزه مورد مطالعه نشان داد که مطالعات بسیار زیادی بر روی مسایل مکان‌یابی-مسیریابی طی سال‌های اخیر انجام شده و همچنان با هدف نزدیک‌تر کردن فضای مساله به کاربردهای دنیای واقعی، مفروضات جدیدی بدان اضافه شده است. نوآوری اصلی این پژوهش به کارگیری رویکرد احتمالی P -استوار برای مساله مکان‌یابی-مسیریابی جهت مواجهه با عدم قطعیت و ارایه یک روش حل فراابتکاری برای آن است.

۳ فرمولاسیون ریاضی مساله

در ادامه مقاله، فرمولاسیون ریاضی مورد استفاده در این مقاله ارایه خواهد شد. بدین منظور نخست مفروضات تحقیق، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مساله آورده شده و سپس به ارایه مدل ریاضی پرداخته شده است.

مفروضات تحقیق

مفروضات مساله مورد نظر به شرح زیر است:

- (۱) هزینه‌ی جابه‌جایی، تقاضای مشتریان و هزینه استفاده از وسایل متغیر بوده و به صورت سناریویی در نظر گرفته می‌شود.
- (۲) احتمال رخ دادن سناریوها از قبل مشخص و ثابت است.
- (۳) تعداد مشتریان و هزینه ثابت است.
- (۴) هر یک از مشتریان دقیقاً توسط یک وسیله نقلیه خدمت‌دهی می‌شوند.
- (۵) تقاضای کل در هر مسیر، حداکثر برابر با ظرفیت وسیله نقلیه اختصاص داده شده به مسیر است.
- (۶) هر مسیر از یک انبار شروع شده و به همان انبار نیز ختم می‌شود.
- (۷) ناوگان حمل‌ونقل همگن فرض شده است.

مجموعه‌ها

I	مجموعه مکان‌های کاندید برای انبار $i \in I$
J	مجموعه مشتری‌ها $j \in J$
K	مجموعه وسایل نقلیه $k \in K$
V	مجموعه مشتری‌ها و انبارها $V = I \cup J$
S	مجموعه سناریوها $s \in S$

پارامترها

N	تعداد مشتری‌ها
t_{ij}^s	هزینه‌ی جابه‌جایی بین گره‌های i و j در سناریوی s ، $i, j \in V$
O_i	هزینه ثابت تأسیس انبار i
C_s	هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه در سناریوی s
P_s	احتمال وقوع سناریوی s
d_j^s	تقاضای مشتری j در سناریوی s
Q	ظرفیت وسیله نقلیه

متغیرهای تصمیم

x_{ijk}^s : اگر وسیله k تحت سناریوی s از گره i به گره j حرکت نماید یک و در غیر این صورت صفر؛
 y_i : اگر انبار i ام تأسیس شود یک و در غیر این صورت صفر؛
 f_{ij}^s : اگر در سناریوی s مشتری j به انبار i تعلق گیرد یک در غیر این صورت صفر؛
 U_{jk} : متغیر کمکی برای حذف محدودیت زیرتور برای مسیر k

نکته قابل توجه در این مساله وابسته نبودن متغیرهای مکان‌یابی به سناریوهای مختلف بوده و تنها متغیرهای مسیریابی تحت سناریوهای مختلف تغییر خواهند نمود. این بدان معنی است که تصمیمات استراتژیک مساله تحت هر شرایطی ثابت بوده و متأثر از شرایط مختلف پارامترها نخواهد بود. از طرفی تحت شرایط مختلف مقادیر متغیرهای مسیریابی تغییر خواهند نمود.

با توجه به توضیحات بالا مساله مورد نظر در قالب مدل ریاضی به صورت زیر فرموله می‌شود. لازم به ذکر است مدل زیر توسعه‌یافته مدل مکان‌یابی-مسیریابی است که توسط پرینس و همکاران [۳۳] جهت مساله مکان-یابی-مسیریابی ارائه شده است. با این حال با توجه به شرایط و مفروضات مساله تغییراتی در مدل مساله داده شده است.

$$\min z = \sum_{i \in I} O_i y_i + \sum_{s \in S} P_s \left[\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} t_{ij}^s x_{ijk}^s + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_s x_{ijk}^s \right] \quad (۴)$$

s.t.

$$\sum_{i \in I} y_i = 1 \quad (۵)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk}^s = 1 \quad \forall j \in J, \quad s \in S \quad (۶)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in J} d_j^s x_{ijk}^s \leq Q \quad \forall k \in K, \quad s \in S \quad (۷)$$

$$U_{rk} - U_{jk} + N x_{rjk}^s \leq N - 1 \quad \forall r, j \in J, \quad k \in K \quad s \in S \quad (۸)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk}^s - \sum_{j \in V} x_{jik}^s = 0 \quad \forall i \in V, \quad k \in K, \quad s \in S \quad (۹)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk}^s \leq 1 \quad \forall k \in K, \quad s \in S \quad (۱۰)$$

$$-f_{ij}^s + \sum_{m \in J} x_{imk}^s + \sum_{m \in V \setminus \{j\}} x_{mjk}^s \leq 1 \quad \forall i \in I, \quad j \in J, \quad k \in K, \quad s \in S \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i \in I} O_i y_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} t_{ij}^s x_{ijk}^s + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_s x_{ijk}^s \leq (1 + \alpha) z_s^* \quad \forall s \in S \quad (۱۲)$$

$$x_{ijk}^s, f_{ij}^s, y_i \in \{0, 1\}, \quad U_{jk} \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad j \in V, \quad k \in K, \quad s \in S \quad (۱۳)$$

در مدل مذکور، رابطه (۴) تابع هدف مساله را نشان می‌دهد که شامل کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت و هزینه مورد انتظار مسیریابی و بهره‌گیری از وسایل نقلیه است. جمله اول تابع هدف به هزینه احداث انبار اشاره دارد و به سناریو وابسته نیست. همچنین جمله دوم و سوم تابع هدف، به ترتیب به هزینه حمل و نقل و هزینه استفاده از وسیله نقلیه اشاره دارند که به صورت سناریویی مشخص شده‌اند. رابطه (۵) بیان می‌کند که در این مساله تنها یک انبار در بین مکان‌های کاندید احداث می‌گردد. رابطه (۶) مشخص می‌کند که هر مشتری تنها به یک تور (مسیر) و به یک وسیله اختصاص می‌یابد. رابطه (۷) در خصوص محدودیت ظرفیت برای وسایل نقلیه است و بیان می‌کند که در هر سناریو، مجموع تقاضای مشتریان اختصاص یافته به هر تور نباید از ظرفیت وسیله بیش‌تر شود. رابطه (۸) محدودیت حذف زیرتور مساله است و اجازه نمی‌دهد تورهای بدون انبار تشکیل شوند. در ادبیات موضوع رویکردهای مختلفی جهت حذف زیرتور آورده شده است که از آن جمله می‌توان به رویکرد پرینس و همکاران [۳۲] و وو و همکاران [۳۳] اشاره نمود. در این تحقیق رویکرد وو و همکاران [۳۳] مورد استفاده قرار گرفته است. رابطه (۹) محدودیت تعادل جریان برای مساله را نشان می‌دهد. این محدودیت بیان می‌کند که در صورت ورود یک وسیله به یک گره، وسیله از همان گره نیز باید خارج شود. رابطه (۱۰) تضمین می‌کند که هر وسیله در صورت استفاده، تنها یک بار می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. رابطه (۱۱) نشان‌دهنده این است که یک مشتری در صورتی می‌تواند به یک انبار اختصاص یابد که مسیری از انبار به سمت مشتری وجود داشته باشد. رابطه (۱۲) محدودیت شرایط استوار است. بر اساس این محدودیت هزینه هر سناریو نباید بیش‌تر از $(1 + \alpha)\%$ هزینه بهینه آن سناریو z_s^* باشد؛ به عبارت دیگر این محدودیت اطمینان حاصل می‌کند در صورتی که سناریوها را جداگانه در نظر بگیریم، جواب به دست آمده هر سناریو از $(1 + \alpha)\%$ جواب بهینه آن سناریو بدتر نشود، در صورتی که در این رابطه $\alpha = 0$ انتخاب شود آنگاه جواب مساله برای هر کدام از سناریوها در حالت کلی نیز بهینه خواهد بود؛

با این حال دستیابی به جواب بهینه مساله در این حالت به ندرت اتفاق افتاده و مساله معمولاً غیرموجه خواهد شد. هرچه مقدار α بیش تر گردد احتمال دستیابی به جواب موجه بیش تر خواهد شد. در انتها رابطه (۱۳) تعیین کننده علامت و نوع متغیرهای تصمیم مساله است.

۴ رویکرد حل

به دلیل NP-hard بودن هر کدام از مسایل مکان‌یابی و مسیریابی، مساله ترکیبی مکان‌یابی-مسیریابی نیز جزء این مسایل طبقه‌بندی می‌شود. رویکرد احتمالی p -استوار نیز موجب پیچیده‌تر شدن حل مساله می‌گردد؛ لذا برای حل مساله در ابعاد متوسط و بزرگ، معمولاً رویکردهای دقیق توانایی حل مذکور را نداشته و به‌ناچار از رویکردهای حل ابتکاری استفاده خواهد شد. در این پژوهش، الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر^۱ مورد استفاده قرار گرفته که در ادامه جزئیات آن آورده شده است.

الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر (VNS) در سال ۱۹۹۶ توسط بریمبرگ و ملادنویچ طراحی شد. الگوریتم VNS یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری بوده که با تغییر سیستماتیک همسایگی در درون یک الگوریتم جستجوی محلی به وجود می‌آید. این الگوریتم در سال‌های اخیر در حل مسایل بهینه‌سازی ترکیبی استفاده شده و نتایج خوبی داده است. برخلاف سایر الگوریتم‌های فراابتکاری که به روش‌های جستجوی محلی متکی هستند (از قبیل شبیه‌سازی تبرید، جستجوی ممنوع و ...)، VNS فقط همسایگی کنونی (همسایه‌های مرتبه اول) را بررسی نکرده؛ بلکه همسایگی‌های با مرتبه بیش تر را نیز مورد جستجو قرار داده و چنانچه بهبودی حاصل گردد، از یک جواب به جواب دیگری می‌رود. چارچوب اصلی الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در جدول ۱ آورده شده است.

۴-۱ نحوه‌ی نمایش جواب مساله

مساله مورد مطالعه در این تحقیق از دو مساله مکان‌یابی و مسیریابی تشکیل شده است؛ بنابراین نوع نمایش جواب باید به نحوی باشد که اولاً بتواند از میان محل‌های بالقوه احداث انبار، یک محل را برای احداث انبار انتخاب کند و ثانیاً تعیین کند که چند وسیله برای ارسال کالا به مشتری به کار گرفته شود و هر وسیله برای کدام مشتریان باشد و به چه ترتیبی برسد. برای این منظور از رشته‌ای از اعداد استفاده می‌گردد. برای تشکیل این رشته عددی، از سه مجموعه اعداد، شماره‌های انبار، شماره‌های مشتریان و شماره‌های وسایل حمل به ترتیب استفاده می‌شود. شروع شماره مشتریان و شماره انبارها از عدد یک و شروع شماره وسایل حمل از شماره آخرین مشتری به بعد است.

عدد ابتدایی رشته کد، از مجموعه اعداد انبارها انتخاب می‌شود و اعداد بعدی ترکیب تصادفی از مجموعه شماره‌های مشتریان و مجموعه شماره‌های وسایل حمل منهای عضو آخر ($n-1$ عضو ابتدایی) است. تعداد مسیرهای ملاقات مشتری و ترتیب حضور مشتریان در این مسیرها به قرار زیر تعیین می‌شود. شماره مشتریانی که مابین شماره انبار احداثی (عدد ابتدایی) و اولین شماره وسیله حمل (بدون در نظر گرفتن ترتیب شماره‌های وسایل

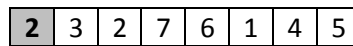
¹ Variable Neighborhood Search (VNS)

قرار دارند، ترتیب مشتریان نسبت داده شده به مسیر اول را نشان می‌دهند. شماره مشتریان مابین عدد اول وسیله حمل و عدد دوم وسیله حمل، نشان دهنده ترتیب مشتریان حاضر در مسیر دوم هستند. به همین ترتیب تخصیص مشتریان به مسیرها ادامه می‌یابد تا در نهایت از شماره وسیله حمل آخر تا انتهای رشته کد به مسیر انتهایی نسبت داده می‌شود. تعداد کل مسیرها برابر با تعداد وسایل حمل است و بدیهی است اگر اعداد مورد نظر برای شماره وسیله‌ها پشت سر هم قرار بگیرند و هیچ شماره مشتری ما بین آن‌ها حضور نداشته باشد، مسیر مورد نظر تهی بوده و از وسیله مربوطه استفاده نخواهد شد.

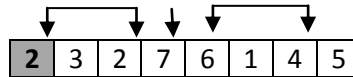
جدول ۱. بدنه اصلی الگوریتم جستجوی متغیر همسایگی

(آغاز سازی و آماده‌سازی برای شروع)	
ورود اطلاعات مساله و الگوریتم	
۱-	انتخاب مجموعه ساختارهای همسایگی $N_k, k = 1, 2, \dots, k_5$
۲-	تولید جواب اولیه X با استفاده از تابع تولید جواب اولیه
۳-	استخراج تورهای جواب اولیه
۴-	بررسی موجه بودن جواب اولیه و تعمیر آن در صورت نیاز
۵-	محاسبه هزینه برای جواب اولیه با استفاده از تابع ارزیابی جواب
۶-	قرار بده $k \leftarrow 1$ و $tt \leftarrow 1$
تکرار مراحل زیر تا رسیدن معیار توقف:	
الف) جستجوی همسایگی: تولید یک نقطه تصادفی x' از یک همسایگی مرتبه k ام	
ب) استخراج تور و بررسی موجه بودن جواب: استخراج تورهای x' و بررسی موجه بودن و تعمیر در صورت نیاز	
ب)	ارزیابی جواب: به دست آوردن هزینه x' با استفاده از تابع ارزیابی جواب
ت)	حرکت به سمت جواب دیگر یا نه. اگر جواب به دست آمده بهتر از جواب قبلی است، قرار بده $x' \leftarrow x$ ، و ادامه جستجو با همسایگی مرتبه اول $(k \leftarrow 1)$ ، در غیر این صورت اگر $tt < t_{max}$ ، ادامه جستجو در همان همسایگی مرتبه اول؛ یعنی $(k \leftarrow 1)$ در غیر این صورت: افزایش همسایگی یعنی $k \leftarrow k + 1$:
ث)	اگر $k > k_{max}$ ، به همسایگی مرتبه اول برگرد و $k \leftarrow 1$
نمایش جواب نهایی	

برای روشن شدن بیش تر رشته کد، مثال عددی زیر با ۵ مشتری، ۳ محل بالقوه احداث انبار و ۳ وسیله حمل شرح داده می‌شود. مجموعه اعداد مربوط به انبارها $\{1, 2, 3\}$ ، مجموعه اعداد مربوط به مشتریان $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ و مجموعه اعداد مربوط به وسایل حمل $\{6, 7, 8\}$ خواهند بود. عدد ابتدایی، از مجموعه مکان‌های بالقوه انبار استخراج می‌گردد و تعیین می‌کند کدام انبار باید احداث گردد. بر اساس توضیحات مذکور، عدد ابتدایی رشته کد (شماره ۲) بیان می‌کند که در این جواب، مکان ۲ برای احداث انبار انتخاب شده است. ما بقی اعداد رشته کد از ترکیب تصادفی اعداد مشتریان و اعداد ۶ و ۷ (اعداد وسیله‌ها منهای یک) تشکیل می‌شود.



لذا همان‌طور که تشریح شد، مسیرهای ارایه خدمت به مشتریان نیز به قرار زیر تعیین می‌شوند:



اعداد مربوط به شماره‌های مشتریان مابین شماره انبار و اولین شماره وسیله، مسیر مربوط به وسیله حمل اول را مشخص می‌کند که در اینجا اعداد ۳ و ۲ هستند. شماره‌های مشتری، مابین اولین و دومین شماره وسیله حمل، مسیر مربوط به وسیله حمل دوم را مشخص می‌کنند. در این رشته کد شماره وسیله اول؛ یعنی ۷ و شماره وسیله دوم؛ یعنی ۶، پشت سر هم قرار گرفته‌اند و هیچ شماره مشتری مابین آن‌ها حضور ندارد؛ بنابراین مسیر مربوط به وسیله دوم تهی بوده و از وسیله دوم استفاده نخواهد شد. در نهایت شماره‌های مشتری مابین عدد وسیله دوم و انتهای رشته کد، به مسیر وسیله سوم تخصیص می‌یابند که در این مثال به ترتیب مشتریان شماره ۱، ۴ و ۵ در این مسیر حضور دارند. حال با توجه به تعداد سناریوهای در نظر گرفته شده، به غیر از مکان انبار فرایند فوق به تعداد سناریوی در نظر گرفته شده تکرار خواهد شد.

۴-۲ تولید جواب اولیه

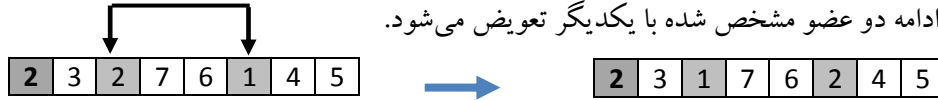
در فاز راه‌اندازی الگوریتم VNS باید یک جواب اولیه ایجاد و به‌عنوان ورودی الگوریتم استفاده کنیم. برای این منظور از یک رویه ساده جهت تولید جواب اولیه استفاده شده است. ابتدا تمامی مشتریان (از n مشتری)، $m-1$ وسیله حمل ابتدایی (از m وسیله حمل موجود) و یک محل تصادفی انبار انتخاب می‌شود. مشتریان از ۱ تا n و وسیله‌های حمل از $n+1$ تا $n+m-1$ شماره گذاری می‌شوند. در ادامه شماره‌های مشتریان و وسیله‌های حمل به صورت تصادفی کنار هم قرار می‌گیرند و در نهایت شماره انبار به صورت تصادفی انتخاب و به ابتدای این رشته کد اضافه می‌شود. فرایند مذکور به تعداد سناریوهای مساله تکرار خواهد شد.

۴-۳ ساختار همسایگی‌ها

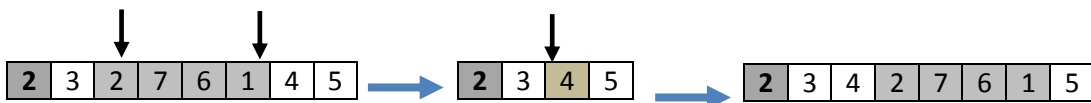
یکی از اصلی‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده الگوریتم VNS، ساختار همسایگی‌های آن است. در این تحقیق از پنج ساختار همسایگی مختلف (N_1 تا N_5) استفاده شده که در ادامه هر کدام از آن‌ها تشریح گردیده‌اند. N_1 : نخستین ساختار همسایگی به این ترتیب است که در آن ابتدا یکی از سناریوها به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد و سپس دو عدد تصادفی متفاوت مابین دومین عدد (عدد نخست مرتبط با دپو است) و طول رشته کد انتخاب می‌شود. سپس عضو متناظر با عدد تصادفی کوچک‌تر به بعد از عدد متناظر با عدد تصادفی بزرگ‌تر منتقل می‌شود:



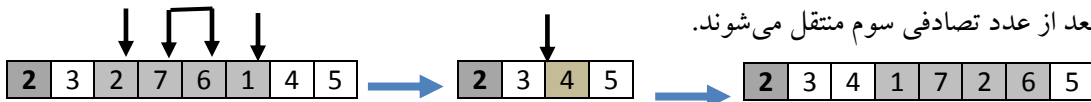
N_4 : در ساختار همسایگی دوم نیز یکی از سناریوها به صورت تصادفی انتخاب خواهد شد. حال دو عدد تصادفی متفاوت بین دومین عدد و طول رشته کد انتخاب شده و اعضای متناظر با آن‌ها در رشته کد تعیین می‌گردد. در ادامه دو عضو مشخص شده با یکدیگر تعویض می‌شود.



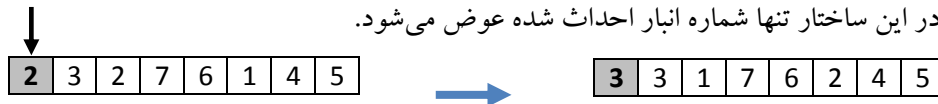
N_4 : در ساختار همسایگی سوم دو عدد تصادفی متفاوت مابین دومین عدد و طول رشته کد در یکی از سناریوها انتخاب می‌شود. اعضای متناظر با این دو عدد و اعضای مابین آن‌ها مشخص شده و از رشته کد حذف می‌شوند. سپس یک عدد تصادفی دیگر مابین دومین عدد و تعداد اعضای باقی مانده رشته کد انتخاب می‌شود. قسمت حذف شده، به بعد از عدد تصادفی مشخص شده منتقل می‌گردد.



N_4 : در ساختار همسایگی چهارم گام‌های اولیه ساختار همسایگی سوم تکرار می‌شود. با این تفاوت که در ساختار همسایگی چهارم، رشته اعداد حذف شده از کد، ابتدا چیش آن‌ها به صورت تصادفی تغییر کرده، سپس به بعد از عدد تصادفی سوم منتقل می‌شوند.



N_5 : در ساختار همسایگی پنجم، ترتیب مشتریان دست نخورده باقیمانده و متغیرهای مسیر یابی تغییر نمی‌کنند. در این ساختار تنها شماره انبار احداث شده عوض می‌شود.



در این نوع ساختار همسایگی باید به این نکته توجه گردد که متغیر مکان‌یابی به نوع سناریو وابسته نبوده و در صورت تغییر مقدار متغیر مکان‌یابی در یک سناریو، در کل سناریوها مقدار آن تغییر خواهد یافت.

۴-۴ نحوه تولید همسایگی مرتبه k ام

برای تولید همسایگی مرتبه k ام، به اندازه k بار یکی از همسایگی‌ها (۵ نوع تعریف شده) به صورت تصادفی انتخاب شده و بروی جواب مورد بررسی اعمال می‌گردد. به عنوان مثال اگر هدف تولید همسایگی مرتبه دوم بر روی یک جواب باشد به این صورت عمل می‌گردد که دو بار یکی از همسایگی‌ها به صورت تصادفی از بازه [۱، ۵] انتخاب شده و با توجه به ساختار همسایگی تعریف شده در دو بار، یک جواب جدید تولید خواهد شد. بدیهی است هر چه همسایگی بیش‌تر باشد تغییرات روی جواب بیش‌تر خواهد بود؛ بنابراین در این الگوریتم یک حداکثر همسایگی با k_{max} تعریف خواهد شد که مقدار آن تنظیم شده است.

۴-۵ ارزیابی جواب

در تابع هدف مساله این تحقیق سه نوع هزینه محاسبه می‌شود که عبارتند از: هزینه احداث انبار، هزینه مربوط به زمان جابه‌جایی در مسیرهای ارسال کالا به مشتریان و هزینه استفاده از وسایل نقلیه. مجموع این سه هزینه

تعیین‌کننده هزینه کل برای هر رشته کد است. نکته‌ای قابل توجه در این قسمت، بررسی موجه بودن محدودیت استواری است که هزینه هر سناریو نباید از مقدار سمت راست محدودیت تجاوز نماید.

الف) هزینه احداث انبار: برای محاسبه هزینه احداث انبار، ابتدا عضو اول رشته کد (محل بالقوه برای احداث انبار)، شناسایی شده و سپس هزینه مرتبط با آن تعیین می‌گردد.

ب) هزینه جابه‌جایی: هزینه جابه‌جایی وابسته به تعداد و ترتیب حضور مشتریان در مسیرهاست؛ لذا در ابتدا باید مسیرهای مشتریان مشخص گردد و سپس هزینه جابه‌جایی تعیین گردد. مسیرها با استفاده از الگوریتم استخراج مسیر، مشخص می‌گردد. سپس هزینه جابه‌جایی از انبار تا اولین مشتری (اولین یال مسیر) و از آخرین مشتری تا انبار (آخرین یال مسیر) محاسبه می‌شود. در ادامه با شمارش دو به دو اعضای هر مسیر، هزینه طی مسیر از ماتریس فواصل هزینه خوانده می‌شود. در نهایت مجموع هزینه‌های جابه‌جایی به دست آمده در گام ۲ و ۳ به عنوان هزینه جابه‌جایی مسیر محاسبه می‌شود.

ج) هزینه استفاده از وسیله: در هر رشته کد به تعداد وسایل نقلیه، مسیر ارسال کالا به مشتریان مشخص می‌شود و بنابراین تعداد مسیرهای غیر تهی برابر با تعداد وسایلهای حمل مورد استفاده است.

بررسی موجه بودن محدودیت استوار: در این مرحله نخست هزینه مربوط به هر سناریو محاسبه شده و با مقدار هزینه بهینه در حالت قطعی آن مقایسه می‌گردد. اگر این مقدار بیش‌تر از $(1+\alpha)$ برابر آن باشد، جواب مورد بررسی حذف شده، در غیر این صورت جواب موجه خواهد بود.

۴-۶ استخراج مسیرها و بررسی موجه بودن مسیر وسایل نقلیه

یکی از محدودیت‌هایی که در مدل ریاضی آورده شده و از اهمیت زیادی برخوردار است، محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه است و در هر کدام از سناریوها، تقاضای مشتریان موجود در هیچکدام از مسیرها از ظرفیت وسیله تجاوز نماید. در الگوریتم مورد بررسی، استخراج مسیرها از رشته کد صورت گرفته و تعویض جواب‌های نشدنی با جواب‌های شدنی به صورت زیر انجام شده است. نشدنی بودن یک جواب، بستگی به میزان تقاضای مشتریان حاضر در مسیرهای آن دارد. اگر مجموع تقاضای مشتریان حاضر در مسیر از ظرفیت وسیله فراتر رود جواب نشدنی خواهد بود. به عنوان مثال، سناریوی نخست یک مساله با ۳ مکان کاندید، ۹ مشتری و ۶ وسیله نقلیه به صورت زیر تولید شده است:

۲	۱۰	۳	۹	۱	۴	۶	۱۴	۱۳	۱۵	۱۲	۵	۲	۱۶	۷	۸	۱۱
---	----	---	---	---	---	---	----	----	----	----	---	---	----	---	---	----

در این رشته کد، نخستین شماره مرتبط با مکان تسهیل، شماره ۱ الی ۹ شماره مشتریان و ۱۰ الی ۱۶ شماره وسایل نقلیه است؛ بنابراین به راحتی می‌توان مسیرهای تشکیل دهنده را به صورت زیر استخراج نمود:

$$\{1:[3,9,1,4,6], 2:[5,2], 3:[7,8]\}$$

در صورتی که حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه ۳۵ واحد و تقاضای مشتریان به صورت زیر باشد:

$$\{1:17, 2:18, 3:13, 4:19, 5:12, 6:18, 7:13, 8:13, 9:17\}$$

آنگاه تقاضای هر کدام از مسیرهای تشکیل یافته برابر خواهد بود با: $\{84, 30, 26\}$

بنابراین چنانچه مشاهده می‌گردد مجموع تقاضای مسیر ۱ فراتر از ظرفیت وسیله نقلیه بوده و جواب غیرموجه است. حال برای تعمیر جواب فوق، رویه زیر به کار برده شده است. یکی از مسیرها را که تقاضای آن از ظرفیت وسیله نقلیه بیش تر است در نظر می‌گیریم، نخستین عضو این مسیر را از مجموعه حذف نموده و تا زمانی که ظرفیت سایر مسیرها اجازه دهد آن را به مسیر مربوطه اضافه می‌نماییم؛ در غیر این صورت یک مسیر جدید تشکیل خواهیم داد. حال مجدداً نسبت به به‌روزرسانی مقادیر تقاضای هر مسیر اقدام خواهیم نمود. پروسه فوق تا زمانی که مقدار تقاضای کل مسیرها از مقدار ظرفیت وسیله نقلیه کم تر گردد تکرار خواهد شد و جواب موجه تولید می‌گردد. در مثال فوق، مسیر اول منجر به غیرموجه شدن جواب شده است؛ لذا عضو اول آن یعنی مشتری ۳ از مسیر اول حذف می‌شود. حال در صورتی که ظرفیت وسیله نقلیه اجازه دهد آن را به مسیرهای دوم و سوم اضافه می‌نماییم؛ در غیر این صورت یک مسیر جدید تشکیل می‌دهیم. با توجه به تقاضای مسیر ۳ باید مسیر جدید تشکیل داد و جواب این سناریو در نخستین مرحله به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$\{1:[9,1,4,6], 2:[5,2], 3:[7,8], 4:[3]\}$$

$$\{71, 30, 26, 13\}$$

حال با به‌روزرسانی تقاضای مسیرها خواهیم داشت:

با مشاهده تقاضای گره‌ها، همچنان جواب غیرموجه است؛ بنابراین پروسه فوق تکرار شده تا نهایتاً جواب موجه

$$\{1:[6], 2:[5,2], 3:[7,8], 4:[3,9], 5:[1], 6:[4]\}$$

زیر تولید گردد:

۴-۷ شرط توقف

معیار تعیین شده برای توقف الگوریتم در این تحقیق، محدودیت زمان حل است. الگوریتم پس از رسیدن به زمان توقف از پیش تعیین شده، متوقف می‌گردد.

۴-۸ تنظیم پارامترهای الگوریتم

جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم از روش سعی و خطا استفاده شده است. برای این منظور دو مساله‌ی نمونه با تعداد ۱۵ گره و ۲۵ گره انتخاب شده است. پارامترهای بررسی شده عبارتند از:

- t_{max} : تعداد جواب‌های بررسی شده در همسایگی مرتبه نخست

- k_{max} : بیش‌ترین تعداد همسایگی

- K : مرتبه همسایگی

نتایج گرفته شده نشان داد که عملکرد الگوریتم زیاد به پارامترهای k_{max} و t_{max} بستگی نداشته، هرچند که بیش‌تر بهبودها در همسایگی مرتبه اول اتفاق افتاده است. همچنین بهبود در همسایگی مرتبه ۵ نیز منجر به بهبود جواب مساله خواهد شد؛ لذا بر اساس نتایج به‌دست آمده مقدار k_{max} در این الگوریتم برابر با ۵ و مقدار t_{max} برابر با ۳ برای سایر محاسبات تنظیم می‌شود.

۵ نتایج محاسباتی

برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مدل مسأله، تعدادی مسایل عددی در ابعاد مختلف با استفاده از الگوریتم حل شده و نتایج آن با حل‌کننده‌ی CPLEX مقایسه شده‌اند. برای تولید مثال‌های عددی از پرادهان (۲۰۰۶) استفاده شده است [۳۴]؛ بدین منظور برای تولید مثال‌هایی با ابعاد کوچک‌تر، تعدادی از انبارها و مشتریان مثال‌های پرادهان به کار گرفته شده است. همچنین جهت تولید سناریوهای مختلف، مثال عددی ارائه شده توسط پرادهان به‌عنوان سناریوی اول در نظر گرفته شده است و برای ایجاد سناریوهای بعدی، پارامترهای وابسته به سناریو؛ یعنی هزینه سفر، ظرفیت وسیله و تقاضاهای مشتریان، در سناریوی اول، به یک عدد تصادفی تولید شده در بازه $[0/5, 1/5]$ ضرب شده‌اند. همچنین احتمال وقوع سناریوها نیز برابر فرض شده است. جدول ۲ ابعاد مسایل نمونه تولید شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مسایل نمونه‌ای تولید شده

نام مثال	تعداد مشتری	تعداد دپو	تعداد سناریو	نام مثال	تعداد مشتری	تعداد دپو	تعداد سناریو
TP1	۳	۲	۴	TP8	۲۵	۵	۴
TP2	۶	۲	۴	TP9	۴۵	۵	۴
TP3	۷	۳	۴	TP10	۱۵	۵	۳
TP4	۹	۳	۴	TP11	۲۵	۵	۲
TP5	۱۱	۴	۴	TP12	۹	۳	۳
TP6	۱۵	۵	۴	TP13	۲۰	۵	۲
TP7	۲۰	۵	۴				

برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده و بررسی تأثیر استواری مدل، از مثال هشت‌گانه‌ی TP2 استفاده گردید. در این مثال سناریوها در ابتدا به‌صورت جداگانه و سپس با بهره‌گیری از شاخص p -استوار با استفاده از حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار GAMS اجرا شدند. جواب به‌دست آمده از این اجراها در جدول ۴ نمایش داده شده است. اشکال شماره ۱ تا ۸ نیز تفاوت جواب سناریوها را در حالت قطعی و استوار، به‌صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

جدول ۳. جواب به‌دست آمده برای سناریوها در حالت قطعی و استوار

سناریوها	سناریوی اول	سناریوی	سناریوی	سناریوی
جواب	۱۴۰۶۸	۱۳۲۴۹	۱۳۴۳۹	۱۳۹۴۶
جواب	۱۴۰۸۵	۱۳۳۰۳	۱۳۴۸۲	۱۳۹۸۳

همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، جواب احتمالی p -استوار نسبت به حالت قطعی و تک سناریویی دارای هزینه بیش‌تری است و هزینه مذکور، هزینه عدم قطعیتی است که به مسأله، تحت متغیر بودن پارامترهای آن به هر کدام از سناریوها تحمیل می‌گردد و در واقع جواب مسأله احتمالی p -استوار جوابی است که همزمان تمامی

سناریوها را در نظر گرفته به طوری که فاصله آن از حالت بهینه هر کدام از سناریوها از مقدار مشخصی بیش تر نشود. چنانچه از اشکال ۱ تا ۸ دیده می شود انبار نخست به عنوان مکان بهینه مساله انتخاب شده و متغیرهای مسیریابی بسته به نوع سناریو متفاوت خواهند بود. در سناریوهای اول، دوم و چهارم انبار تاسیس شده در حالت قطعی متفاوت از سناریوی استوار است و در این سناریوها استواری جواب نیازمند تغییر در طراحی زنجیره تأمین با تغییر در محل انبار تاسیس شده است، اما در سناریوی سوم جواب استوار موجب تغییر انبار تاسیس شده نسبت به جواب قطعی نشده است.

جدول ۴. نتایج محاسبات عددی برای CPLEX

CPLEX									نام مثال
جواب	جواب	زمان	خطای حد پایین	جواب	سناریو	سناریو	سناریو	سناریو	
بهبینه	موجه	حل	و جواب موجه	استوار	۴	۳	۲	۱	
*	-	۱/۴	۰	۱۱۶۲۷/۵	۱۱۶۰۴	۱۱۴۵۸	۱۱۹۷۵	۱۱۶۲۷	TP1
*	-	۱۷۴۵۱	۰	۱۳۷۰۲/۵	۱۳۹۴۶	۱۳۴۳۹	۱۳۲۴۹	۱۴۰۶۸	TP2
-	*	۱۸۰۰۰	٪۲۶/۹	۸۴۶۵/۲۵	۸۶۶۱	۸۱۰۱	۷۶۲۰	۹۴۷۹	TP3
-	*	۱۸۰۰۰	٪۱۷/۸	۱۷۲۱۴/۲۵	۱۹۹۴۶	۱۴۶۱۶	۱۶۶۷۳	۱۷۵۴۸	TP4
-	*	۱۸۰۰۰	٪۴۴/۵	۱۱۴۹۵/۲۵	۱۱۳۷۰	۱۰۱۳۰	۱۳۵۲۲	۱۱۰۴۴	TP5
-	*	۱۸۰۰۰	٪۴۱/۷	۱۷۸۸۲/۵	۱۸۸۶۳	۱۷۶۶۳	۱۷۴۸۰	۱۷۲۹۴	TP6
-	*	۱۸۰۰۰	٪۶۲/۷	۱۶۱۴۸/۵	۱۷۵۸۶	۱۷۶۱۲	۱۳۵۰۴	۱۵۸۵۶	TP7
-	*	۱۸۰۰۰	٪۶۸/۱۳	۱۸۱۲۳/۲۵	۱۶۲۲۹	۱۲۹۳۵	۲۰۳۶۵	۱۸۱۵۰	TP8
-	*	۱۸۰۰۰	٪۷۵/۷	۳۷۷۳۲	۴۱۷۷۱	۳۹۱۶۹	۳۷۶۸۲	۳۲۰۹۲	TP9
-	*	۱۸۰۰۰	٪۳۵/۹	۱۷۳۹۴/۹۴	-	۱۷۶۶۳	۱۷۴۸۰	۱۷۲۹۴	TP10
-	*	۱۸۰۰۰	٪۷۰	۱۹۲۷۹/۵	-	-	۲۰۸۸۴	۱۸۷۷۳	TP11
-	*	۱۸۰۰۰	٪۱۴/۴	۱۶۲۳۴/۱۲	-	۱۴۶۱۶	۱۶۶۷۳	۱۷۵۴۸	TP12
-	*	۱۸۰۰۰	٪۶۰/۵	۱۴۶۹۹	-	-	۱۳۵۰۴	۱۵۸۵۶	TP13

برای به دست آوردن جواب بهینه مسایل نمونه ای تولید شده، الگوریتم CPLEX در مدت زمان ۱۸۰۰۰ ثانیه، توسط نرم افزار گمز اجرا شده اند. نتایج به دست آمده برای مساله نمونه ای شماره یک و دو جواب دقیق مساله بوده ولی برای سایر مسایل، بهترین جواب به دست آمده در مدت زمان ذکر شده، گزارش شده است.

نتایج گرفته شده نشان داد به واسطه پیچیدگی بسیار بالای مدل، حل کننده ی CPLEX قادر به یافتن جواب بهینه در بیش تر مسایل نبوده و تنها جواب موجهی از آن گزارش شده است. درصد بالای خطای گزارش شده نیز نشان از عدم توانایی CPLEX در حل مساله دارد؛ بنابراین بهره گیری از یک رویکرد ابتکاری که بتوان در مدت زمان کم به جواب مناسبی برسد ضروری است؛ لذا مسایل آورده شده توسط الگوریتم پیشنهادی نیز حل شده و نتایج دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه خواهد شد. بدین منظور اختلاف نسبی (خطای محاسباتی) نرم افزار CPLEX و الگوریتم پیشنهادی، از رابطه زیر تعیین شده است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه جواب حاصل از الگوریتم CPLEX نیز به جواب بهینه نمی رسد، مقدار محاسبه شده در واقع اختلاف نسبی جواب یافته شده توسط دو الگوریتم است.

$$GAP = \frac{Obj - LB}{Obj}$$

LB: جواب موجه مسأله محاسبه شده توسط CPLEX

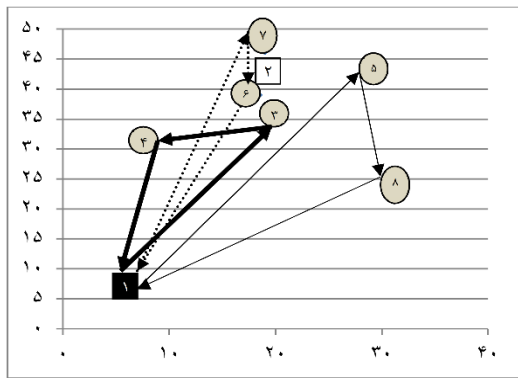
Obj: بهترین مقدار تابع هدف پیدا شده توسط الگوریتم VNS

از آنجاکه الگوریتم پیشنهادی به عوامل مختلفی نظیر جواب اولیه، ساختار همسایگی و ... وابسته است؛ لذا ممکن است هربار اجرای آن منجر به جواب‌های متفاوتی شود؛ بنابراین برای مقایسه بهتر هر کدام از مسایل نمونه ۴ بار توسط الگوریتم حل شده و خلاصه‌ای نتایج در جدول ۵ آورده شده‌اند. در این جدول، بهترین مقدار به‌دست آمده توسط الگوریتم در ۴ تکرار، متوسط مقدار تابع هدف و متوسط زمان اجرای الگوریتم گزارش شده است.

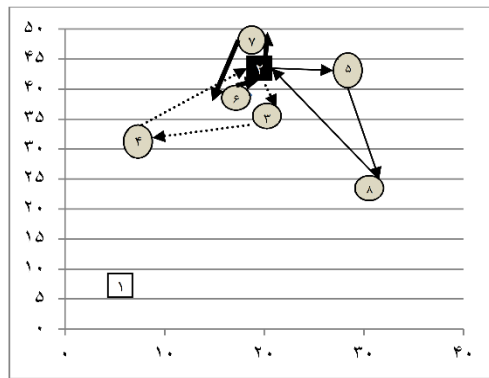
جدول ۵. نتایج محاسبات عددی برای الگوریتم VNS

VNS				نام مثال	VNS				نام مثال
اختلاف نسبی VNS	متوسط زمان حل (ثانیه)	مقدار متوسط	بهترین مقدار		اختلاف نسبی VNS	متوسط زمان حل	مقدار متوسط	بهترین مقدار	
۰/۰۰۹	۶۰۰	۱۸۵۷۹/۸۷	۱۸۳۰۱	TP8	۰	۰/۵	۱۱۶۷۲/۵	۱۱۶۷۲/۵	TP1
-۰/۱۰۱	۱۰۰۰	۳۵۱۱۴/۲۵	۳۴۲۴۶/۲۵	TP9	۰	۱/۶	۱۳۷۰۲/۵	۱۳۷۰۲/۵	TP2
۰/۰۲	۳۰۰	۱۸۸۵۳/۸	۱۷۷۸۹/۲۹	TP10	۰/۰۲	۲۰۰	۸۷۸۴/۶۸	۸۷۰۱/۲۵	TP3
۰/۰۵	۳۰۰	۲۰۶۰۶/۵	۲۰۳۴۷/۵	TP11	-۰/۰۱	۲۴۰	۱۷۱۰۹/۸۷	۱۷۰۳۴/۵	TP4
-۰/۰۱	۱۸۰	۱۵۹۸۶/۸۶	۱۵۹۴۵/۰۴	TP12	-۰/۰۳	۳۰۰	۱۱۳۳۴/۸۱	۱۱۱۵۹/۵	TP5
۰/۰۷	۲۵۰	۱۶۷۳۴/۳	۱۵۷۹۴/۵	TP13	۰/۰۷	۴۰۰	۱۹۸۳۶/۹۳	۱۹۲۵۱/۵	TP6
					۰/۰۵	۵۰۰	۲۰۰۵۰/۰۶	۱۷۱۵۶	TP7

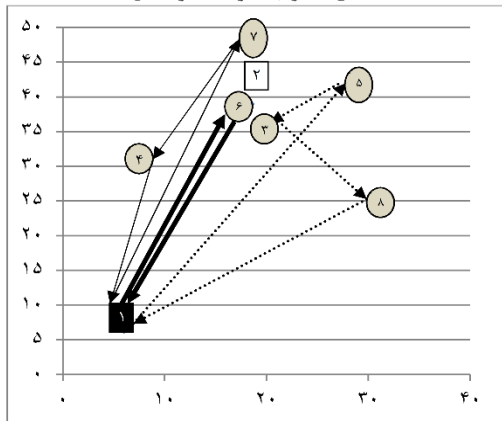
بر اساس نتایج به‌دست آمده، الگوریتم VNS در زمان قابل قبولی توانسته مسأله را حل کند. همچنین نتیجه به‌دست آمده برای الگوریتم VNS در مسأله‌های با ابعاد کوچک؛ یعنی مسایل شماره یک و دو، دقیقاً مشابه جواب دقیق به‌دست آمده توسط CPLEX بوده است. این در حالی است که الگوریتم CPLEX با گذشت بیش از ۵ ساعت به جواب بهینه برسد در حالی که زمان یافتن جواب بهینه توسط الگوریتم پیشنهادی مقدار ناچیز ۱/۶ ثانیه است. به علاوه، در مسایل شماره ۴، ۵، ۹ و ۱۲ میزان خطای گزارش شده بین جواب الگوریتم و CPLEX منفی بوده است و این به معنای برتری الگوریتم VNS به نرم‌افزار CPLEX در این دسته از مسایل است. در سایر مسایل خطای گزارش شده مثبت است؛ ولی مقدار اندک خطای گزارش شده، نشان‌دهنده نزدیکی جواب‌های الگوریتم پیشنهادی و نرم‌افزار CPLEX است که زمان حل پایین الگوریتم، می‌تواند توجیه مناسبی برای استفاده از الگوریتم در این مسایل نیز باشد.



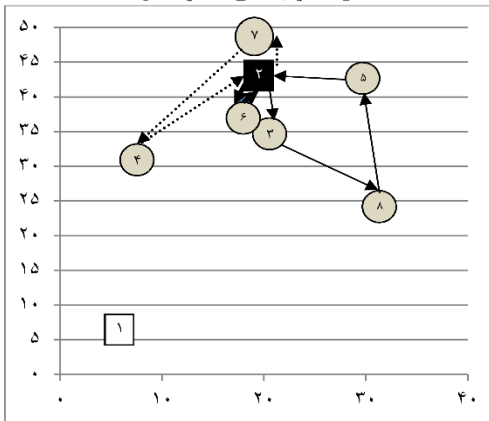
شکل ۲: جواب استوار سناریوی اول



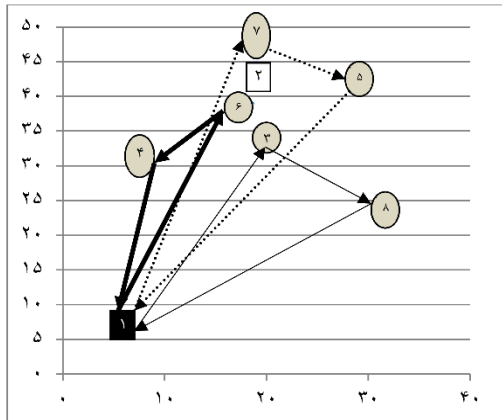
شکل ۱: جواب قطعی سناریوی اول



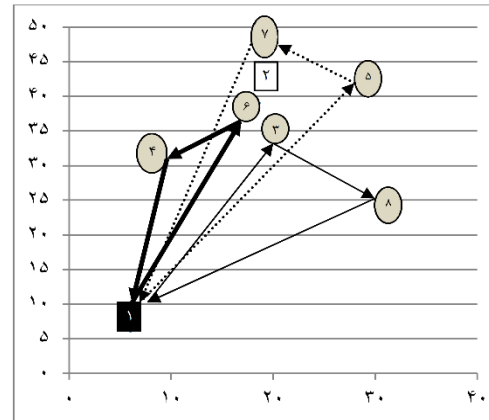
شکل ۴: جواب استوار سناریوی دوم



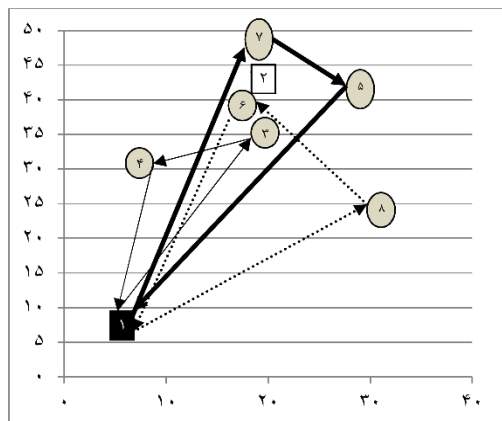
شکل ۳: جواب قطعی سناریوی دوم



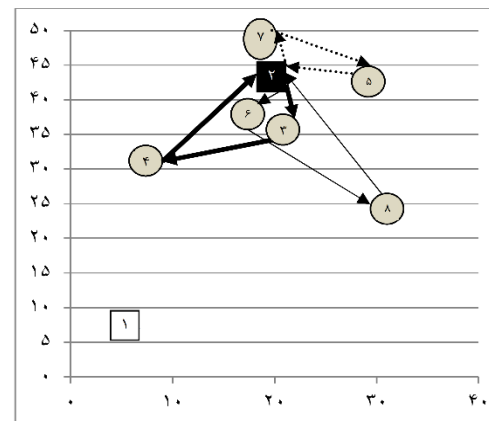
شکل ۶: جواب استوار سناریوی سوم



شکل ۵: جواب قطعی سناریوی سوم

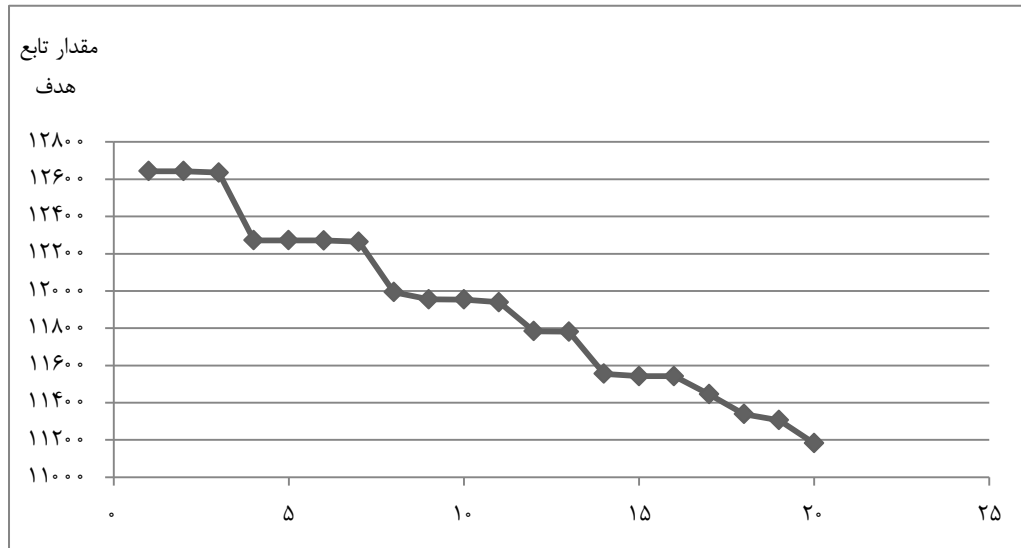


شکل ۸: جواب استوار سناریوی چهارم



شکل ۷: جواب قطعی سناریوی چهارم

شکل ۹ نیز روند بهبود الگوریتم برای یک مسأله نمونه در تکرارهای مختلف است که نشان می‌دهد همگرایی الگوریتم به سمت جواب به شکل مناسبی طی شده است و طی تکرارهای مختلف الگوریتم توانسته است جواب مسأله را بهبود بخشد.



شکل ۹. روند بهبود الگوریتم برای مسأله نمونه‌ای TP5 در تکرارهای مختلف الگوریتم

۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای مسأله تک‌دپویی ظرفیت‌دار مکان‌یابی-مسیریابی تحت شرایط عدم قطعیت ارائه شد. برای مواجهه با عدم قطعیت مسأله، دو رویکرد متداول برنامه‌ریزی احتمالی و بهینه‌سازی استوار در یکدیگر ادغام شدند. جواب حاصل از رویکرد ترکیبی، به دنبال کمینه‌سازی متوسط هزینه‌ها در سناریوهای داده شده است به نحوی که مقدار تابع هدف جواب به‌دست آمده برای هر کدام از سناریوها از مقدار بهینه آن به اندازه مشخصی (استواری) تجاوز ننماید. با توجه به سخت بودن حال مسأله ارائه شده در این پژوهش، یک الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی همسایگی متغیر توسعه داده شد. این الگوریتم محل احداث انبار را تعیین کرده و مسیرهای حرکت وسیله‌های حمل از انبار احداث شده به مشتریان را مشخص می‌کند و تعیین می‌کند در هر مسیر مشتریان به چه ترتیبی ملاقات شوند. نتایج به‌دست آمده از اجراهای مختلف الگوریتم VNS در حل مثال‌های با ابعاد مختلف نشان از عملکرد مناسب الگوریتم ارائه شده در مقایسه با CPLEX دارد.

تحقیق حاضر در ادامه پژوهش‌های انجام شده در حوزه مسایل مکان‌یابی-مسیریابی بوده و برای اولین بار در این حوزه از رویکرد ترکیبی احتمالی p-استوار جهت مواجهه با عدم قطعیت استفاده شده است. در این پژوهش مدل پایه مسأله مکان‌یابی-مسیریابی در شرایط عدم قطعیت بررسی گردید؛ بنابراین می‌توان از رویکرد ترکیبی احتمالی p-استوار در مدل‌سازی سایر مدل‌های مکان‌یابی-مسیریابی استفاده نمود. به عنوان ادامه کار می‌توان

مساله تک انباره بررسی شده در این مقاله را به مساله با چند انبار تعمیم داده و با توجه به پیچیدگی مساله راه حل مناسب برای آن پیشنهاد داد. همچنین، ارایه الگوریتم (های کارا) جهت حل مساله ارایه شده می تواند مورد بررسی قرار گیرد. برای مطالعه بیشتر، پیاده سازی سایر رویکردهای بهینه سازی استوار جهت مدل سازی مسایل مکان یابی-مسیریابی می تواند مورد توجه محققان قرار گیرد.

منابع

[۱۷] صالح دهباری، علیرضا پورروستا، مهدی نادری بنی، احسان قبادیان، رضا توکلی مقدم. مسیریابی وسایل حمل و نقل چندهدفه با زمان سرویس احتمالی و تقاضای فازی تحت محدودیت های پنجره زمانی. تحقیق در عملیات در کاربردهای آن. ۱۳۹۱؛ ۹ (۴)، ۸۵-۱۰۶.

[۲۷] پایدار محمد مهدی، داودی درزی اشکان، یوسفی بابادی ابوالقاسم. ارایه مدل دو هدفه برنامه ریزی تسهیلات برای مساله لجستیک امدادی با به کارگیری روش بهینه سازی استوار. تحقیق در عملیات در کاربردهای آن. ۱۳۹۳؛ ۱۱ (۲)، ۹۵-۱۰۵.

- [1] Jones, T., Riley, D. W., (1985). Using Inventory for Competitive Advantage through Supply Chain Management. The International Journal of Physical Distribution and Materials Management 15, 16-26.
- [2] Maranzana, F. E., (1964). On the location of supply points to minimize transport costs. IBM systems journal, 261-270.
- [3] 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.
- [4] Burks, R. E. J., (2006). An Adaptive Tabu Search Heuristic For The Location Routing Pickup And Delivery Problem With Time Windows With A Theater Distribution Application, Graduate School of Engineering and Management. Ohio, Air Force Institute Of Technology. Ph.D.
- [5] Pirkwieser, S., Raidl, G. R., (2010) Variable Neighborhood Search Coupled with ILP-Based Very Large Neighborhood Searches for the (Periodic) Location-Routing Problem, in: M. J. Blesa, C. Blum, G. Raidl, A. Roli, M. Sampels (Eds.), Hybrid Metaheuristics, Lecture Notes in Computer Science 6373, Springer Berlin Heidelberg, 174-189.
- [6] Samanlioglu, F., (2013). A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. European Journal of Operational Research, 226 332-340.
- [7] Conde, E., (2007). Minmax Regret Location-Allocation Problem on a Network under Uncertainty. European Journal of Operational Research, 179 (3) 1025-1039.
- [8] Soyster, A. L., (1973). Technical note-convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. Operations Research, 21(5), 1154-1157.
- [9] Snyder, L. V., Daskin, M. S., (2006). Stochastic p-robust location problems. IIE Trans., 38(11), 971-985.
- [10] Kouvelis, P., Kurawarwala, A. A., Gutierrez, G. J., (1992). Algorithms for robust single and multiple period layout planning for manufacturing systems. European Journal of Operational Research, 63(2), 287-303.
- [11] Gutierrez, G. J., Kouvelis, P., (1995) A robustness approach to international sourcing. Annals of Operations Research, 59(1), 165-193.
- [12] Gutiérrez, Kouvelis, G. J., P., Kurawarwala, A. A., (1996). A robustness approach to uncapacitated network design problems. European Journal of Operational Research, 94(2), 362-376.
- [13] Snyder, L. V, Daskin, M. S., (2005) Reliability models for facility location: the expected failure cost case. Transportation Science, 39(3), 400-416.
- [14] Bertsimas, D., Sim M., (2003). Robust discrete optimization and network flows," Math. Program, 98(1), 49-71.
- [15] Sungur, I., Ordóñez, F., Dessouky, M., (2008) A robust optimization approach for the capacitated vehicle routing problem with demand uncertainty. IIE Transaction, 40(5), 509-523.
- [16] Moghadam, B. F., Sadjadi, S. J., Seyedhosseini, S. M., (2010) Comparing Mathematical and Heuristic Methods for Robust Vehicle Routing Problem. IJRRAS, 2(2), 108-116.
- [18] Ordóñez, F., (2010) Robust vehicle routing. TUTORIALS Oprations Research, 153-178.

- [19] Lee, C., Lee, K., Park, S. (2012) Robust vehicle routing problem with deadlines and travel time/demand uncertainty. *Journal of Operational Research Society*, 63(9), 1294–1306.
- [20] Manisri, T., Mungwattana, A., Janssens, G. K., (2011) Minimax optimisation approach for the Robust Vehicle Routing Problem with Time Windows and uncertain travel times. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 10(4), 461–477.
- [21] Agra, A., Christiansen, M., Figueiredo, R., Hvattum, L. M., Poss, M., Requejo, C., (2013). The robust vehicle routing problem with time windows. *Computers and Operations Research*, 40(3), 856–866.
- [22] Adulyasak, Y., Jaillet, P., (2015) Models and algorithms for stochastic and robust vehicle routing with deadlines. *Transportation Science*, 50(2), 608–626.
- [23] Jaillet, P., Qi, J., Sim, M., (2015) Routing optimization under uncertainty. *Operations research*, 64(1), 186–200.
- [24] Solano-Charris, E., Prins, C., Santos, A. C., (2015). Local search based metaheuristics for the robust vehicle routing problem with discrete scenarios. *Applied Soft Computing*, 32, 518–531.
- [25] Ahmadi, T., Karimi, H., Davoudpour, H., Hosseiniyou, S. A., (2015). A robust decision-making approach for p-hub median location problems based on two-stage stochastic programming and mean-variance theory: a real case study,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 77(9–12), 1943–1953, 2015.
- [26] N. Ghaffari-Nasab, M. Ghazanfari, and E. Teimoury, (2014). Robust optimization approach to the design of hub-and-spoke networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(5–8), 1091–1110.
- [28] Han, J., Lee, C., Park, S., (2013). A robust scenario approach for the vehicle routing problem with uncertain travel times. *Transportation Science*, 48(3), 373–390.
- [29] Ghaderi, A., Rahmaniani, R., (2015). Meta-heuristic solution approaches for robust single allocation p-hub median problem with stochastic demands and travel times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 1–21.
- [30] Tian, J., Yue, J., (2014) Bounds of Relative Regret Limit in p-Robust Supply Chain Network Design. *Production and Operation Management*, 23(10), 1811–1831.
- [31] Keyvanshokoh, E., Ryan, S. M., Kabir, E., (2016) Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 76–92.
- [32] Prins, C., Prodhon, C., Ruiz, A., Soriano, P., Calvo, R.W., (2007) Solving the Capacitated Location-Routing Problem by a Cooperative Lagrangean Relaxation-Granular Tabu Search Heuristic. *Transportation Science*, 41(4), 470–483.
- [33] Wu, T.-H., Low, C., Bai, J.-W., (2002) Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. *Computers and Operations Research*, 29(10), 1393–1415.
- [34] Prodhon, C., (2006) *Le Problème de Localisation-Routage (The location-routing problem)*. Ph.D. thesis, Troyes University of Technology, Troyes, France (in French), 2006.