مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال شانزدهم، شماره چهارم (پیاپی ۶۳)،زمستان ۹۸، ص ص ۳۶-۱۵
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

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

**عبدالسلام قادری [۱*]، چیمن 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 انباره مکان‌یابی-مسیریابی غیرقطعی ارایه شده که در آن هزینه‌ی حمل‌ونقل، تقاضای مشتریان و هزینه وسیله نقلیه به‌عنوان 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 باتوجه به NP-Hard بودن مساله مورد مطالعه، برای حل مدل ارایه شده یک الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر پیشنهاد شده است. نتایج به‌دست آمده از حل مسایل نمونه با استفاده از الگوریتم دقیق و ابتکاری، نشان از عملکرد قابل قبول الگوریتم ارایه 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، حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل و طراحی زنجیره تامین

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: ab.ghaderi@gmail.com

[۱] Location- Routing Problem (LRP)



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

است. این مساله 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 اواسط دهه ۱۹۶۰ میلادی بازمی‌گردد که مسایلی از قبیل مکان‌یابی-کوتاه‌ترین مسیر ایجاد شدند [۲]. پس از آن تا به امروز توسعه‌های مختلفی در مساله 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 به‌دلیل عدم دسترسی به اطلاعات دقیق و یا هزینه بالای به‌دست آوردن آن‌ها، همواره با عدم قطعیت روبرو هستیم. در ادبیات موضوع جهت مواجهه با بحث عدم‌قطعیت، محققان عمدتا 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 نسبتا 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 مساله که کدام رخداد قرار است اتفاق بیفتد توجهی ندارد. در نظرگرفتن رخدادی که احتمال روی دادن آن کم باشد، در واقع یک رویکرد بدبینانه به مساله 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 مساله 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، مساله مکان‌یابی-مسیریابی احتمالی p-استوار برای اولین بار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. از طرف دیگر هر دو مساله مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی وسیله نقلیه به تنهایی جزو مسایل NP-hard بوده و حل دقیق آن‌ها توسط الگوریتم‌های دقیق در زمان



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

حل قابل قبولی امکان‌پذیر 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 مدل‌ریاضی 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 عدم‌قطعیت است. در این مساله نواحی مشتری از قبل مشخص بوده و محل‌های کاندید برای احداث انبار معلوم است. از میان محل های بالقوه برای احداث انبار، یک محل برای احداث انبار انتخاب می‌شود. برای نزدیک شدن مساله به شرایط دنیای واقعی، برخی پارامترهای مساله به‌صورت 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 حمل‌ونقل، تقاضای مشتریان و هزینه استفاده از وسیله به عنوان منابع عدم قطعیت در نظرگرفته شده‌اند. با توجه به شرایط ترافیکی حمل‌ونقل، هزینه حمل‌ونقل 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 نظرگرفته شده است. هزینه وسایل حمل‌ونقل، به‌عنوان سومین منبع عدم قطعیت این مساله در نظرگرفته 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 نظرگرفته شده برای هر سناریو نمی‌تواند بیش‌تر از p باشد ($p \geq 0$). در ادامه این رویکرد شرح داده می‌شود.

فرض کنید $S$ 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 $s \in S$ 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 $z_s^* > 0$.



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

تعریف۱. فرض کنید $p \geq 0$ یک عدد ثابت باشد و $x$ یک جواب شدنی برای مساله $P_s$ برای تمامی $s \in S$ باشد و $z_s(x)$ مقدار تابع هدف مساله $P_s$ برای جواب شدنی $x$ باشد. جواب $x$ را $p$-استوار می‌گوییم هرگاه برای تمامی $s \in S$ داشته باشیم:

$$\frac{z_s(x) - z_s^*}{z_s^*} \leq p \qquad (۱)$$

یا معادل آن را داشته باشیم:

$$z_s(x) \leq (1+p) z_s^* \qquad (۲)$$

در سمت چپ رابطه اول میزان پشیمانی نسبی سناریوی $s$ نوشته شده است و پشیمانی 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 مساله یافتن منابع در سطح بین‌المللی [۱۱] و یک مساله طراحی شبکه [۱۲] استفاده گردید.

همچنین می‌توان برای هر سناریو $s$، یک حد پشیمانی $p_s$ متفاوت بیان کرد. به عنوان مثال به سناریوهایی با احتمال رخ دادن پایین اجازه داد که میزان پشیمانی بیش‌تری را قبول کنند. در این حالت در روابط p-استواری فوق به‌جای $p$ از $p_s$ استفاده می‌شود؛ بنابراین بردار $p$ به صورت $(p_1, \ldots, p_{|S|})$ خواهد بود.

رویکرد اندازه‌گیری $p$-استواری می‌تواند با تابع هدف کمینه‌سازی هزینه انتظاری ترکیب گردد که در این صورت رابطه (۳) را خواهد داد:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{s \in S} q_s z_s(x) \\ s.t. \quad & z_s(x) \leq (1+p) z_s^* \qquad \forall s \in S \\ & x \in X \end{aligned} \qquad (۳)$$

که در آن: S مجموعه تمام سناریوهای ممکن است و داده‌های مساله 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 مساله به صورت گسسته و براساس سناریوهای از قبل تعریف شده تغییر می‌یابند. جوابی که از این رویکرد به‌دست می‌آید با مقدار بهینه هرکدام از سناریوها نباید از یک نسبتی بزرگ‌تر باشد به نحوی‌که هزینه مورد انتظار تابع هدف حداقل شود.

## ۲ مرور ادبیات

در این پژوهش مساله تک دپویی 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



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

مسایل مکان‌یابی-مسیریابی استوار، مسایل مسیریابی و مکان‌یابی تسهیلات استوار به‌صورت 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 حمل‌ونقل 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 ارایه کردند [۱۵]. مقدم و همکاران یک مساله مسیریابی وسایل حمل‌ونقل با ناوگان حمل محدود و تقاضاهای غیرقطعی ارایه نمودند. فرض شده است که تقاضاها 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 ارایه شده است و سپس یک الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان برای حل پیشنهاد گردید [۱۶].

مسیریابی وسایل حمل‌ونقل 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 فرا ابتکاری 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. اوردونز مساله مسیریابی وسایل حمل‌ونقل 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 ارایه 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 نظرگرفته شدند [۲۰].

آگرا و همکاران مساله مسیریابی استوار را با پنجره‌های زمانی ارایه کردند. در مدل ارایه‌شده 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]. آدلیاسکا و جیلت به بررسی مساله مسیریابی وسایل حمل‌ونقل با تاریخ تحویل محدود و با زمان‌های سفر غیرقطعی با دو رویکرد احتمالی و استوار پرداختند. در رویکرد استوار فرض شده است که زمان-های 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 $p$-میانه و بر اساس برنامه‌ریزی احتمالی دو سطحی و تئوری میانگین-واریانس استفاده کردند. نویسندگان رویکردی را برای به‌دست آوردن سیاست‌هایی با قابلیت اطمینان بیش‌تر در محیط‌های احتمالی ارایه نمودند [۲۵] غفاری نسب و همکاران، از



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

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 نظرگرفته شده، کمینه می‌شود [۹]. هان و همکاران به بررسی رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مساله مسیریابی پرداختند. آن ها 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 نظرگرفته شده است [۲۸]. قادری و رحمانیانی به بررسی مساله مکان‌یابی $p$-هاب میانه با تخصیص تکی تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند. آن ها تقاضاها و زمان‌های سفر را به صورت غیرقطعی در نظرگرفتند 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 تأمین کنندگان، 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 قبلا 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



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

بررسی شده که هرکدام به تنهایی دارای ایراداتی می‌باشند و جواب‌های این دو رویکرد به ترتیب ممکن است برای برخی سناریوها نامناسب و یا محافظه‌کارانه باشد. از طرفی دیگر عدم دسترسی به احتمال دقیق زمان‌های سفر، استفاده از رویکرد سنتی برنامه‌ریزی احتمالی را غیرممکن نموده است. همچنین در صورت درنظرگیری 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 محافظه‌کارانه خواهد شد؛ لذا در این مساله مشخص و با توجه به زمان‌سفر درنظر 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 تعیین‌کننده 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 هرکدام 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 به‌کارگیری 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 نظرگرفته می‌شود.

۲) احتمال رخ دادن سناریوها از قبل مشخص و ثابت است.

۳) تعداد مشتریان و هزینه ثابت است.

۴) هریک 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.



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

**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 این‌صورت صفر؛

$y_i$: اگر انبار $i$ام تأسیس شود یک و در غیر این‌صورت صفر؛

$f_{ij}^{s}$: اگر در سناریوی $s$ مشتری $j$به انبار $i$ تعلق گیرد یک در غیر این‌صورت 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 ارایه شده است. با این حال با توجه به شرایط و مفروضات مساله تغییراتی در مدل مساله داده شده است.



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

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

$s.t.$

$$\sum_{i\in I} y_i = ۱ \quad (۵)$$

$$\sum_{i\in V}\sum_{k\in K} x_{ijk}^s = ۱ \qquad \forall j\in J, \quad s\in S \quad (۶)$$

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

$$U_{rk} - U_{jk} + N x_{rjk}^s \le N-۱ \qquad \forall r,j\in J, \quad k\in K \quad s\in S \quad (۸)$$

$$\sum_{j\in V} x_{ijk}^s - \sum_{j\in V} x_{jik}^s = ۰ \qquad \forall i\in V, \quad k\in K, s\in S \quad (۹)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} x_{ijk}^s \le ۱ \qquad \forall k\in K \quad , s\in S \quad (۱۰)$$

$$-f_{ij}^s + \sum_{m\in J} x_{imk}^s + \sum_{m\in V\setminus\{j\}} x_{mjk}^s \le ۱ \qquad \forall i\in I, j\in J, k\in K, s\in S \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i\in I} O_i y_i + \sum_{i\in V}\sum_{j\in V}\sum_{k\in K} t_{ij}^s x_{ijk}^s + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} C_s x_{ijk}^s \le (۱+\alpha)\, z_s^* \quad \forall s\in S \quad (۱۲)$$

$$x_{ijk}^s, f_{ij}^s, y_i \in \{۰,۱\}, \quad U_{jk} \ge ۰, \qquad \forall i\in I, j\in V, k\in K, s\in S \quad (۱۳)$$

در مدل مذکور، رابطه (۴) تابع هدف مساله را نشان می‌دهد که شامل کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت و هزینه مورد انتظار مسیریابی و بهره گیری 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 هزینه‌ی حمل‌ونقل و هزینه استفاده از وسیله نقلیه اشاره دارند که به صورت سناریویی مشخص شده‌اند. رابطه (۵) بیان می کند که در این مساله تنها یک انبار در بین مکان‌های کاندید احداث می گردد. رابطه (۶) مشخص می کند 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 می کند که در هر سناریو، مجموع تقاضای مشتریان اختصاص‌یافته به هر تور نباید از ظرفیت وسیله بیش‌تر شود. رابطه (۸) محدودیت حذف زیرتور مساله است و اجازه نمی دهد 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 می کند که در صورت ورود یک وسیله به یک گره، وسیله از همان گره نیز باید خارج شود. رابطه (۱۰) تضمین می کند 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 $(۱+\alpha)\%$ هزینه بهینه آن سناریو $z_s^*$ باشد؛ به عبارت دیگر این محدودیت اطمینان حاصل می کند درصورتی که سناریوها را جداگانه در نظر بگیریم، جواب به دست آمده هر سناریو از $(۱+\alpha)\%$ جواب بهینه آن سناریو بدتر نشود، در صورتی که در این رابطه $\alpha = ۰$ انتخاب شود آنگاه جواب مساله برای هر کدام از سناریوها در حالت کلی نیز بهینه خواهد بود؛



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

با این حال دستیابی به جواب بهینه مساله در این حالت به ندرت اتفاق افتاده و مساله معمولاً غیرموجه خواهد شد. هرچه مقدار $\alpha$ بیش‌تر گردد احتمال دستیابی به جواب موجه بیش‌تر خواهد شد. در انتها رابطه (۱۳) تعیین‌کننده علامت و نوع متغیرهای تصمیم مساله است.

## ٤ رویکرد حل

به‌دلیل NP-hard بودن هرکدام 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[1] مورد استفاده قرار گرفته که در ادامه جزییات 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 به‌وجود 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 بیش‌تر 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.

### ٤-١ 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 به‌کار 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 نظرگرفتن ترتیب شماره‌های وسایل)

[1] Variable Neighborhood Search (VNS)



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

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 وآماده‌سازی برای شروع)**

**ورود اطلاعات مساله و الگوریتم**

۱- انتخاب مجموعه ساختارهای همسایگی $N_k, k = ۱,۲,...,k_۵$

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 $k \leftarrow ۱$ و $tt \leftarrow ۱$

**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:** به‌دست آوردن هزینه $x'$ با استفاده از تابع ارزیابی جواب

**ت) حرکت به سمت جواب دیگر یا نه.** اگر جواب به‌دست‌آمده بهتر از جواب قبلی است، قرار بده $x \leftarrow x'$، و ادامه جستجو با همسایگی مرتبه اول $(k \leftarrow ۱)$، در غیر این‌صورت اگر $tt < t_{\max}$، ادامه جستجو در همان همسایگی مرتبه اول؛ یعنی$(k \leftarrow ۱)$ در غیر این‌صورت: افزایش همسایگی یعنی $k \leftarrow k+۱$:

**ث)** اگر $k > k_{\max}$، به همسایگی مرتبه اول برگرد و $k \leftarrow ۱$

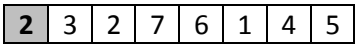
**نمایش جواب نهایی**

برای روشن شدن بیش‌تر 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 {۱،۲،۳}، مجموعه اعداد مربوط به مشتریان {۱،۲،۳،۴،۵} و مجموعه اعداد مربوط به وسایل حمل {۶،۷،۸} 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.

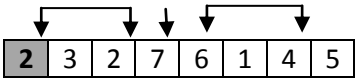


[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]




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 باتوجه به تعداد سناریوهای در نظر گرفته شده، به غیر از مکان انبار فرایند فوق به تعداد سناریوی در نظر گرفته شده تکرار خواهد شد.

## ٤-٢ 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 $n+m-1$ شماره‌گذاری می‌شوند. در ادامه شماره‌های مشتریان و وسیله‌های حمل به‌صورت 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.

## ٤-٣ 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 هرکدام از آن‌ها تشریح گردیده‌اند.

$N_1$: نخستین ساختار همسایگی به این ترتیب است که در آن ابتدا یکی از سناریوها به‌صورت تصادفی انتخاب می‌گردد و سپس دو عدد تصادفی متفاوت مابین دومین عدد (عدد نخست مرتبط با دپو است) و طول رشته‌کد انتخاب می‌شود. سپس عضو متناظر با عدد تصادفی کوچک‌تر به بعد از عدد متناظر با عدد تصادفی بزرگ‌تر منتقل می‌شود:

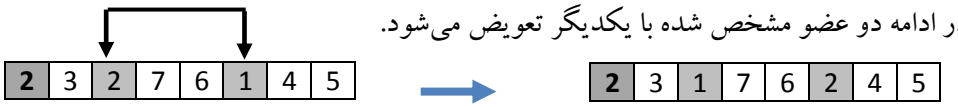




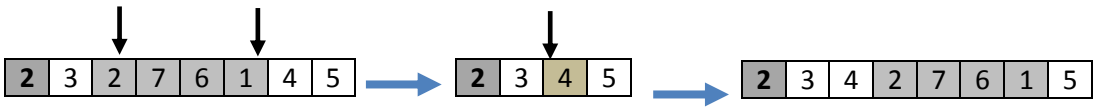

[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

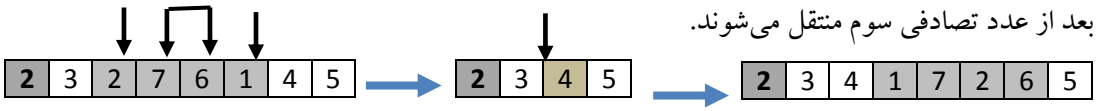
$N_2$ : در ساختار همسایگی دوم نیز یکی از سناریوها به‌صورت تصادفی انتخاب خواهد شد. حال دو عدد تصادفی متفاوت بین دومین عدد و طول رشته‌کد انتخاب شده و اعضای متناظر با آن‌ها در رشته‌کد تعیین می‌گردد. در ادامه دو عضو مشخص شده با یکدیگر تعویض می‌شود.



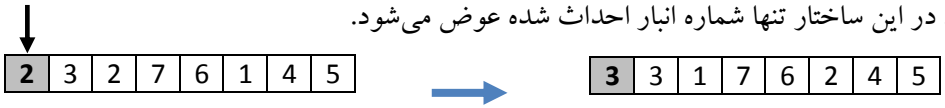

$N_3$ : در ساختار همسایگی سوم دو عدد تصادفی متفاوت مابین دومین عدد و طول رشته کد در یکی از سناریوها انتخاب می‌شود. اعضای متناظر با این دو عدد و اعضای مابین آن‌ها مشخص شده و از رشته کد حذف می‌شوند. سپس یک عدد تصادفی دیگر مابین دومین عدد و تعداد اعضای باقی‌مانده رشته کد انتخاب می‌شود. قسمت حذف شده، به 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 چینش 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 مسیریابی 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.

### ٤-٤ نحوه‌ی 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 برروی 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 $[1,5]$ 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.

### ٤-٥ ارزیابی جواب

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



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

تعیین‌کننده هزینه‌کل 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 دوی اعضای هر مسیر، هزینه طی مسیر از ماتریس فواصل هزینه خوانده می‌شود. در نهایت مجموع هزینه‌های جابه‌جایی به‌دست آمده در گام ۲ و ۳ به عنوان هزینه جابه‌جایی مسیر محاسبه می‌شود.

ج) هزینه استفاده از وسیله: در هر رشته‌کد به تعداد وسایل نقلیه، مسیر ارسال کالا به مشتریان مشخص می‌شود و بنابراین تعداد مسیرهای غیر تهی برابر با تعداد وسیله‌های 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 این‌صورت جواب موجه خواهد بود.

## ٤-٦ 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، ۹مشتری 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 صورتی‌که 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: $\{84,30,26\}$



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

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 بیش‌تر است در نظر می‌گیریم، نخستین عضو این مسیر را از مجموعه حذف نموده و تا زمانی‌که ظرفیت سایر مسیرها اجازه دهد آن را به مسیر مربوطه اضافه می‌نماییم؛ در غیر این‌صورت یک مسیر جدید تشکیل خواهیم داد. حال مجدداً نسبت به به‌روزرسانی مقادیر تقاضای هر مسیر اقدام خواهیم نمود. پروسه فوق تا زمانی‌که مقدار تقاضای کل مسیرها از مقدار ظرفیت وسیله نقلیه کم‌تر 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 صورتی‌که ظرفیت وسیله نقلیه اجازه دهد آن را به مسیرهای دوم و سوم اضافه می‌نماییم؛ در غیراین‌صورت 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:

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

حال با به‌روزرسانی تقاضای مسیرها خواهیم داشت: $\{71,30,26,13\}$

با مشاهده تقاضای گره‌ها، همچنان جواب غیرموجه است؛ بنابراین پروسه فوق تکرار شده تا نهایتاً جواب موجه زیر تولید گردد: $\{1:[6],2:[5,2],3:[7,8],4:[3,9],5:[1],6:[4]\}$

### ٤-٧ 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.

### ٤-٨ 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.



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

## ۵ نتایج محاسباتی

برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مدل مساله، 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 به‌کار گرفته شده است. همچنین جهت تولید سناریوهای مختلف، مثال عددی ارایه 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 [۰/۵,۱/۵] 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 ارایه شده و بررسی تأثیر استواری مدل، از مثال هشت گرهی 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 مساله، تحت متغیر بودن پارامترهای آن به هر کدام از سناریوها تحمیل می‌گردد و در واقع جواب مساله احتمالی p-استوار جوابی است که همزمان تمامی



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

سناریوها را در نظر گرفته به‌طوری که فاصله آن از حالت بهینه هر کدام از سناریوها از مقدار مشخصی بیش‌تر نشود. چنانچه از اشکال ۱ تا ۸ دیده می‌شود انبار نخست به‌عنوان 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 ٤.** نتایج محاسبات عددی برای CPLEX

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

برای به‌دست آوردن جواب بهینه مسایل نمونه‌ای تولید شده، الگوریتم CPLEX در مدت زمان ۱۸۰۰۰ ثانیه، توسط نرم‌افزار گمز اجرا شده‌اند. نتایج به‌دست آمده برای مساله نمونه‌ای شماره یک و دو جواب دقیق مساله بوده ولی برای سایر مسایل، بهترین جواب به‌دست آمده در مدت زمان ذکر شده، گزارش شده است.

نتایج گرفته شده نشان داد به واسطه پیچیدگی بسیار بالای مدل، حل‌کننده‌ی CPLEX قادر به یافتن جواب بهینه در بیش‌تر مسایل نبوده و تنها جواب موجهی از آن گزارش شده است. درصد بالای خطای گزارش‌شده نیز نشان از عدم توانایی CPLEX در حل مساله دارد؛ بنابراین بهره‌گیری 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) نرم‌افزار CPLEX و الگوریتم پیشنهادی، از رابطه زیر تعیین شده است. لازم به ذکر است باتوجه به اینکه جواب حاصل از الگوریتم CPLEX نیز به جواب بهینه نمی‌رسد، مقدار محاسبه شده در واقع اختلاف نسبی جواب یافته شده توسط دو الگوریتم است.



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

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

$LB$: جواب موجه مساله 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

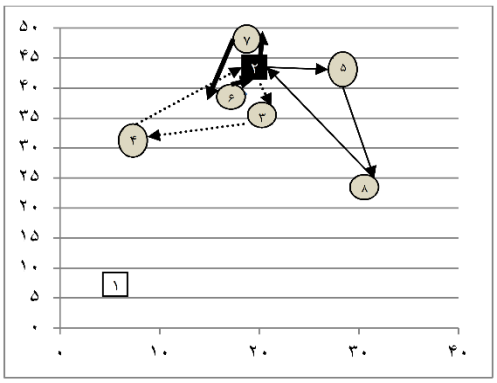
| نام مثال | VNS | | | | نام مثال | VNS | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | بهترین مقدار | مقدار متوسط | متوسط زمان حل | اختلاف نسبی VNS | | بهترین مقدار | مقدار متوسط | متوسط زمان حل(ثانیه) | اختلاف نسبی VNS |
| TP1 | ۱۱۶۷۲/۵ | ۱۱۶۷۲/۵ | ۰/۵ | ۰ | TP8 | ۱۸۳۰۱ | ۱۸۵۷۹/۸۷ | ۶۰۰ | ۰/۰۰۹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

بر اساس نتایج به‌دست آمده، الگوریتم VNSدر زمان قابل قبولی توانسته مساله را حل کند. همچنین نتیجه به‌دست آمده برای الگوریتم VNSدر مساله‌های با ابعاد کوچک؛ یعنی مسایل شماره یک و دو، دقیقا 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 درحالی‌که 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 VNSبه 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.

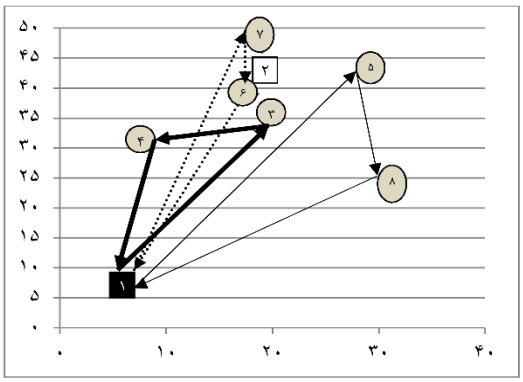


[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

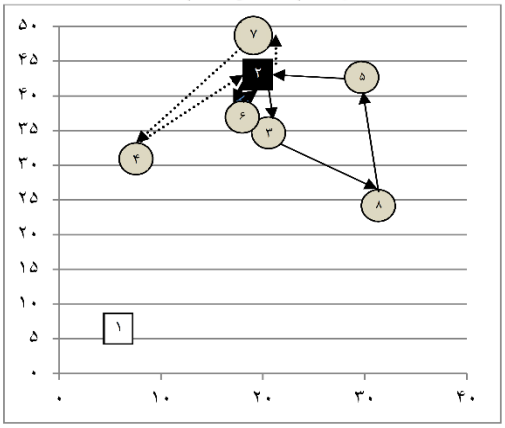
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]



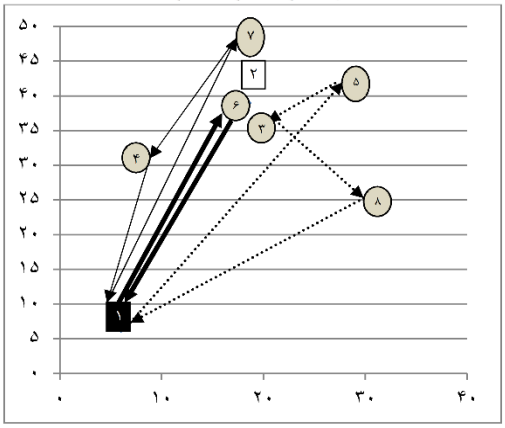
شکل ۱: جواب قطعی سناریوی اول



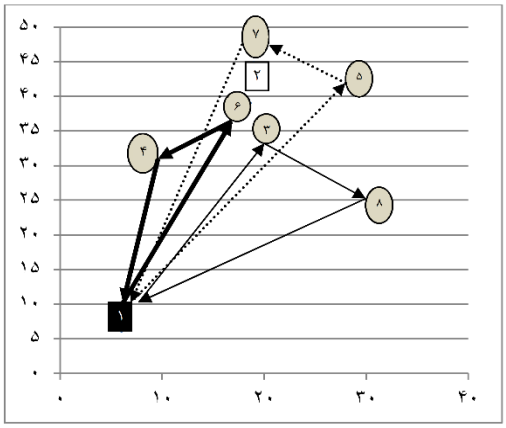
شکل ۲: جواب استوار سناریوی اول



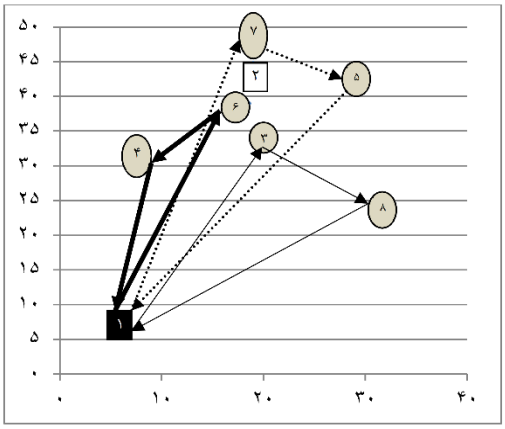
شکل ۳: جواب قطعی سناریوی دوم



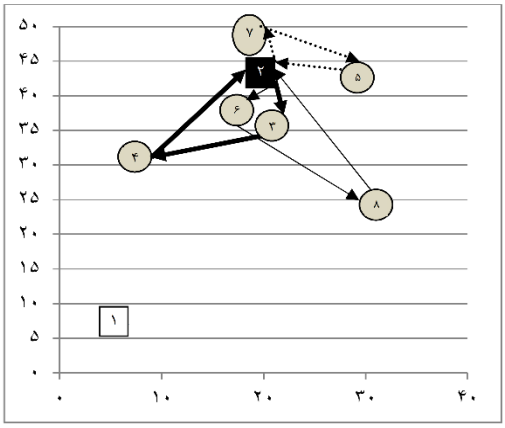
شکل ٤: جواب استوار سناریوی دوم



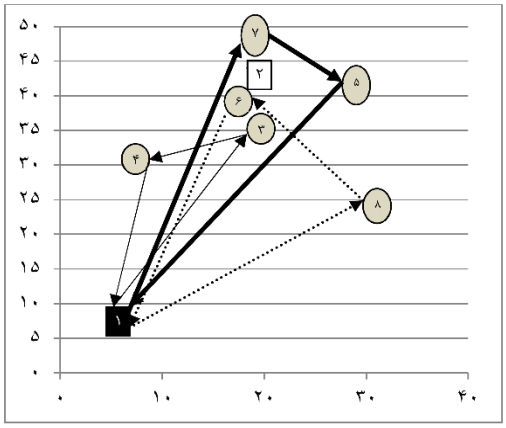
شکل ۵: جواب قطعی سناریوی سوم



شکل ٦: جواب استوار سناریوی سوم



شکل ۷: جواب قطعی سناریوی چهارم



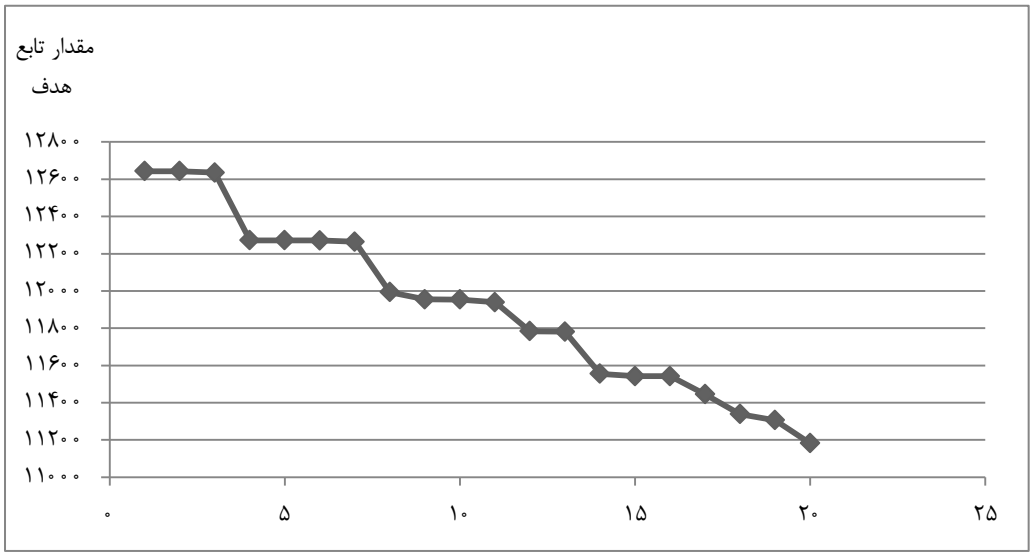
شکل ۸: جواب استوار سناریوی چهارم



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

شکل ۹ نیز روند بهبود الگوریتم برای یک مساله 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 مساله را بهبود بخشد.




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

## ٦ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای مساله تک دپویی ظرفیت‌دار مکان‌یابی-مسیریابی تحت شرایط عدم قطعیت ارایه شد. برای مواجهه با عدم قطعیت مساله، 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 نحوی‌که مقدار تابع هدف جواب به‌دست آمده برای هرکدام از سناریوها از مقدار بهینه آن به اندازه مشخصی (استواری) تجاوز ننماید. با توجه به سخت بودن حال مساله ارایه 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 ارایه 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 مساله 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



[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

مساله تک انباره بررسی شده در این مقاله را به مساله با چند انبار تعمیم داده و باتوجه به پیچیدگی مساله راه حل مناسب برای آن پیشنهاد داد. همچنین، ارایه الگوریتم(های کارا) جهت حل مساله ارایه شده می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. برای مطالعه بیش‌تر، پیاده‌سازی سایر رویکردهای بهینه‌سازی استوار جهت مدل‌سازی مسایل مکان‌یابی-مسیریابی می‌تواند 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 محدودیت‌های پنجره زمانی. تحقیق در عملیات در کاربردهای آن. ۱۳۹۱؛ ۹ (۴)، ۸۵-۱۰۶.

[۲۷] پایدار محمدمهدی، داودی درزی اشکان، یوسفی بابادی ابوالقاسم. ارایه مدل دو هدفه برنامه‌ریزی 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., Ordónez, 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.




[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]

[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., Hosseinijou, 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] Keyvanshokooh, 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.

[ Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.4.5.0 ]